



**UFR Sciences et Techniques Licence Renforcée de
Physique-Chimie**

Rapport du Projet Personnel de Recherche

Méthodes d'analyses des communautés planctoniques



Tom Fontugne
2023–2025

*Tuteur : Jean-Louis Jamet
Laboratoire : Institut Méditerranéen d'Océanologie*

Je souhaite tout d'abord remercier Mme Dominique Jamet ainsi que M. Jean-Louis Jamet pour m'avoir donné l'opportunité d'effectuer ce Projet Personnel de Recherche ainsi que pour leur aide et leurs précieux conseils.

Je tiens également à remercier Lallie Patard et Axelle Gherissi qui m'ont permis de me familiariser avec l'utilisation du PlanktoScope.

Table des matières

I Introduction	4
II Le plancton	4
1 Le phytoplancton	4
2 Le zooplancton	5
III Prélèvements	6
3 Sites de prélèvements	6
4 Méthodes de prélèvement	7
IV Appareils d'imagerie	8
5 Le ZooScan : généralités	8
6 Le PlanktoScope	9
6.1 Caractéristiques techniques	9
6.2 Fonctionnement et utilisation	9
6.3 Analyse de l'échantillon	11
V Traitement des données	12
7 Préparation des images	12
8 ÉcoTaxa	12
8.1 Présentation du logiciel	12
8.2 Fonctionnement et utilisation	14
VI Résultats et Discussion	14
9 Définition	15
9.1 Définition du biovolume	15
9.2 Définition de l'abondance	15
10 Résultats dans la Petite Rade	15
10.1 Le biovolume	15
10.2 L'abondance	16
11 Résultats dans la Grande Rade	16
11.1 Le biovolume	16
11.2 L'abondance	16
VII Conclusion	17
VIII Annexes : graphiques	18
IX Résumé	23

Première partie

Introduction

Le plancton vient du terme grec *plagktos* signifiant errant, il se définit par « l'ensemble des organismes pélagiques susceptibles d'être entraînés par le déplacement des eaux » (Bougis, 1974).

Contribuant à fixer 30 à 50 % du dioxyde de carbone de la planète et constituant la base d'une chaîne alimentaire mondiale, le plancton représente le plus grand mouvement quotidien de biomasse au monde lorsqu'il traverse les océans. Les formes et les couleurs de ces milliards de créatures sont aussi vastes que les mers qui les abritent. Il est essentiel de comprendre la structure, le fonctionnement et le rôle du plancton pour comprendre les écosystèmes marins et l'effet que nous avons sur eux. L'un des obstacles à ce type d'étude est l'immensité de la zone à explorer et les ressources limitées des flottes de recherche et des équipements spécialisés. En développant un moyen d'augmenter la qualité de l'exploration visuelle et de la documentation, nous pouvons améliorer considérablement notre compréhension du réseau complexe de la vie qui nous entoure et de la manière dont nous l'influençons à notre tour (Drouet, 2024).

Cependant, étant donné la taille de ces organismes et l'immensité de leur écosystème, l'étude du plancton présente de nombreux défis. C'est pour cela que des scientifiques ont mis au point des systèmes d'imagerie tels que le ZooScan ou le PlanktoScope, qui, couplés au logiciel Ecotaxa, permettent une analyse efficace du plancton. J'ai pu réaliser ce projet personnel de recherche (PPR) à l'Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO) dont les équipes et notamment Monsieur Jamet travaillent sur l'étude du plancton depuis plus de 30 ans.

Les objectifs seront d'abord de comprendre ce qu'est le plancton et comment on le prélève, puis de se familiariser avec les outils permettant de l'analyser. Enfin, nous verrons quels sont les résultats obtenus.

Deuxième partie

Le plancton

Nous pouvons classer le plancton en deux grandes catégories : le phytoplancton qui est la partie végétale et le zooplancton qui est la partie animale.

1 Le phytoplancton

Le phytoplancton est un ensemble d'organismes aquatiques autotrophes¹, composé principalement de microalgues comme les diatomées (voir figure 1), qui vivent en suspension dans l'eau. On estime qu'il existe plus de 160 000 espèces de phytoplancton, et leur classification est en constante évolution (Bernard, Duperron, 2022). Il joue un rôle crucial dans les écosystèmes marins, car il est à la base de presque toutes les chaînes alimentaires marines, fournissant de l'énergie par le biais de la photosynthèse.

Le phytoplancton représente à peine 1 % de la masse des organismes photosynthétiques de la Planète

1. Se dit des organismes capables de synthétiser leur propre matière organique à partir de substances inorganiques simples, sans nécessiter de matière organique préexistante, comme c'est le cas pour les bactéries photosynthétiques, les algues et les plantes vertes.(La langue française)

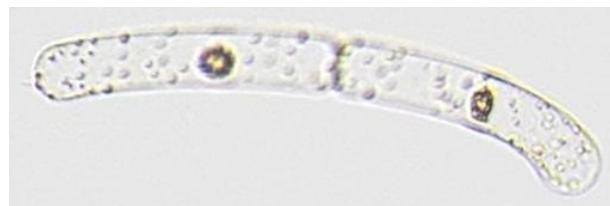


FIGURE 1 – Diatomée

mais produit à lui seul la moitié de l'oxygène sur Terre. C'est d'ailleurs l'apparition de ces premiers organismes photosynthétiques qui a majoritairement contribué aux flux d'oxygène vers l'atmosphère lors de la Grande Oxydation il y a 2,8 milliards d'années et contribué à l'émergence de la vie multicellulaire aérobie. (Deluzarche, 2021)

Ces milliards de micro-organismes absorbent également 37 milliards de tonnes de CO₂ annuellement, soit 40 % du CO₂ produit. Une « pompe à carbone » équivalente à 1 700 milliards d'arbres, soit quatre fois la forêt amazonienne. (Ralph Chami et al., 2019)

Le phytoplancton est également un indicateur important des changements environnementaux, car sa diversité et sa distribution peuvent refléter la santé des océans.

2 Le zooplancton

Le zooplancton est la partie non photosynthétique du plancton composée d'organismes de nature animale, donc hétérotrophes². Le zooplancton est composé de petits crustacés comme le krill, de larves de mollusques ou de poissons ou encore d'organismes unicellulaires (voir figure 2).



FIGURE 2 – Le zooplancton

L'étude du zooplancton présente un intérêt crucial dans plusieurs domaines scientifiques et environnementaux. Le zooplancton joue un rôle fondamental dans les écosystèmes marins en tant que consommateur primaire et secondaire. Il est sensible aux changements environnementaux, et des variations dans les populations de zooplancton peuvent refléter les impacts des changements climatiques, tels que les modifications de la température de l'eau, l'acidification des océans et les variations des courants marins.

Plusieurs catégories peuvent être définies selon la taille des organismes (microzooplancton < 200 µm, mésozooplancton 0,2 – 20 mm et le macrozooplancton > 20 mm) et la profondeur à laquelle on les trouve dans la colonne d'eau (épiplancton : couches superficielles, mésoplancton : couches intermédiaires et

2. Qui utilise pour se nourrir les matières organiques constituant ou ayant constitué d'autres organismes. (Larousse)

bathyplancton : couches profondes) (Bandeira, 2013). Ces catégories sont aussi définies selon le cycle biologique, si l'organisme reste planctonique durant toute sa vie on parle d'*holoplancton*, sinon on parle de *méroplancton* (Polar POD).

Troisième partie

Prélèvements

Chaque analyse d'échantillon débute par un prélèvement en mer lors d'une sortie en bateau.

3 Sites de prélèvements

La Rade de Toulon (France, Méditerranée Nord Occidentale) est un lieu d'étude intéressant pour les expérimentations de terrain car elle comprend deux parties distinctes et représentatives de nombreuses situations que l'on peut rencontrer en Méditerranée. En effet, elle est divisée en deux écosystèmes adjacents, la Petite Rade et la Grande Rade qui sont voisines et donc soumises aux mêmes conditions climatiques et météorologiques (voir figure 3).

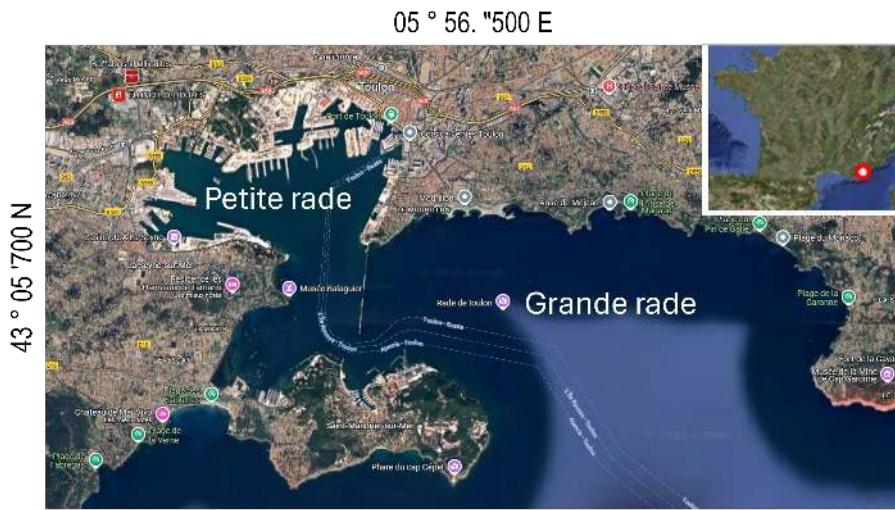


FIGURE 3 – Sites de prélèvement

Les deux rades diffèrent par leurs formes et par la pression anthropique qu'elles subissent. La Petite Rade est un système semi-fermé, affecté par des activités humaines incluant le trafic de la marine militaire, transports de voyageurs, bateaux de plaisance et une activité industrielle très développée (Richard et Jamet, 2001 ; Tessier et al., 2011). A l'inverse, la Grande Rade est ouverte sur le large et moins affectée par les impacts anthropiques. La petite Rade est donc plus polluée que la grande.

Cette différence de pollution est aussi due à l'hydrodynamique dans la petite rade qui conduit à un temps de résidence des eaux assez long, ce qui favorise le risque de contamination sédimentaire, alors que la grande rade est ouverte à la mer. La cartographie des contaminants pour les sédiments de surface a révélé des valeurs très élevées, en particulier pour les parties les plus confinées de la petite rade (Démoulin, 2014).

4 Méthodes de prélèvement

L'échantillonnage se fait grâce à de grands filets coniques de 2,5 m de long, avec une entrée de 50 cm de diamètre et des mailles de 30 µm (voir figure 4).



FIGURE 4 – Filet

L'échantillonnage peut se faire soit horizontalement, c'est-à-dire à une profondeur constante en tirant le filet derrière le bateau soit verticalement en remontant le filet depuis une profondeur définie.

Un collecteur est connecté à l'extrémité du filet et permet de récupérer un mélange d'eau de mer concentré en plancton (voir figure 5).



FIGURE 5 – Collecteur

Ensuite, cet échantillon est amené à l'université pour être analysé en laboratoire. La méthode traditionnelle consiste à observer l'eau de mer au microscope ou à la loupe binoculaire afin de compter et classer le zooplancton manuellement.

Cependant, aujourd'hui des appareils tels que le ZooScan ou le PlanktoScope ont été mis au point afin de faciliter le traitement des échantillons.

Quatrième partie

Appareils d'imagerie

Pendant mon projet personnel de recherche j'ai eu l'occasion de travailler en première année sur le ZooScan puis sur le PlanktoScope en deuxième année.

Nous allons donc d'abord nous pencher sur le fonctionnement général du ZooScan puis nous entrerons plus en détail dans l'utilisation du PlanktoScope.

5 Le ZooScan : généralités

Le ZooScan (voir figure 6) est un système d'imagerie développé par HYDROPTIC Inc. Il est conçu pour la mesure et la classification d'organismes et de particules de taille comprise entre 150 µm et 5 cm présents dans un échantillon liquide de volume compris entre 0.2 et 1 litre. Le ZooScan est donc un appareil permettant exclusivement l'étude du zooplancton (Gorsky et al., 2010).



FIGURE 6 – ZooScan

Le fonctionnement optique du ZooScan repose sur un système de numérisation haute résolution qui permet d'obtenir des images de bonne qualité. En effet, l'appareil est équipé d'un éclairage LED spécifique qui permet d'obtenir des images nettes et contrastées (voir figure 7). Il est donc plus facile de distinguer les différents types de zooplancton. Chaque image capturée a une taille de 14 150 x 22 640 pixels et une résolution de 2200 dpi (Hydroptic, s.d.).



FIGURE 7 – Exemple d'image obtenue avec le ZooScan

Cette méthode permet de traiter des échantillons plus conséquents et plus rapidement que la méthode traditionnelle au microscope.

6 Le PlanktoScope

Le PlanktoScope est une plateforme matérielle et logicielle modulaire et open-source conçu par FairScope qui permet l'imagerie quantitative d'échantillons de plancton en biologie aquatique et en écologie. Sa petite taille, sa facilité d'utilisation et son faible coût lui permettent d'être déployé dans toute une série d'applications, y compris la surveillance des cultures de laboratoire ou des communautés naturelles de microplancton. Il peut être contrôlé à partir de n'importe quel appareil compatible Wi-Fi, et sa polyvalence permet une reconfiguration rapide pour répondre aux besoins évolutifs de l'utilisateur (PlanktoScope, 2024).

6.1 Caractéristiques techniques

Le module informatique est composé du dernier Raspberry Pi 4 (4GB de SDRAM LPDDR4) couplé à sa caméra Pi (v2.1 - 8 mégapixels). L'optique est simplifiée et utilise deux lentilles M12 inversées, la lentille du tube est fixe alors que la lentille de l'objectif peut être échangée offrant une variété de configuration optique. Une platine motorisée (30 µm/pas) permet une calibration fine de la platine interchangeable sur laquelle il est possible de monter une µ-Slide I Luer (cellule d'écoulement) ou une lame de verre traditionnelle selon le mode d'observation (fluidique ou statique). Une pompe péristaltique entraînée par un moteur pas à pas d'un ordre de précision ~0.1ml/min est utilisée pour entraîner le fluide dans la cellule d'écoulement si nécessaire (PlanktoScope, 2024). Le Raspberry Pi est capable de générer un Wi-Fi autonome permettant l'accès à une interface web à partir d'une variété d'appareils (smartphone, tablette et ordinateur portable). L'interface web est alimentée par node-RED qui offre un accès frontal et dorsal. (PlanktoScope, 2024). Le PlanktoScope permet d'obtenir des images sur des organismes faisant entre 25 et 300µm.

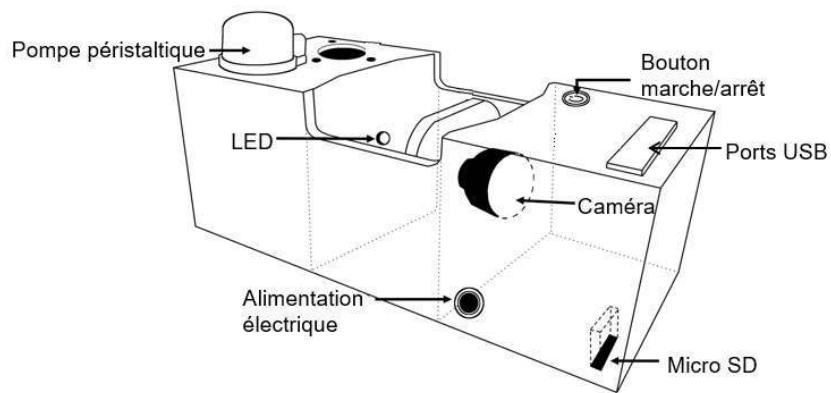


FIGURE 8 – Le PlanktoScope

6.2 Fonctionnement et utilisation

Le PlanktoScope est livré sous forme de kit, il faut donc l'assembler avant utilisation (voir figure 9).

Le kit PlanktoScope comprend un PlanktoScope (A) avec le boîtier principal avec la pompe (A1), le couvercle USB (A2), la caméra pi (A3) et les vis (A4), le support de tube (B), le barboteur (bubbler) (C), le

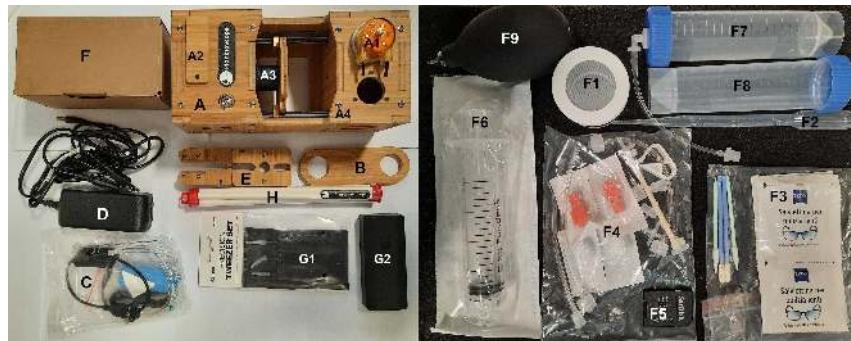


FIGURE 9 – Le kit PlanktoScope

câble d'alimentation (D), le support de cellule d'écoulement (E), la boîte de matériaux supplémentaires (F), le kit iFixit (G) et enfin les cellules d'écoulement (Flow Cell) (H). Dans la boîte (F) on retrouve (F1) un tamis de 200 µm, (F2) le compte-gouttes en plastique, (F3) un kit de nettoyage, (F4) le système fluidique, (F5) l'adaptateur de carte SD, (F6) une seringue, (F7) un tube à déchets, (F8) le tube d'échantillonnage et (F9) le ventilateur de nettoyage.

Une fois monté le PlanktoScope se présente comme sur la figure 10.

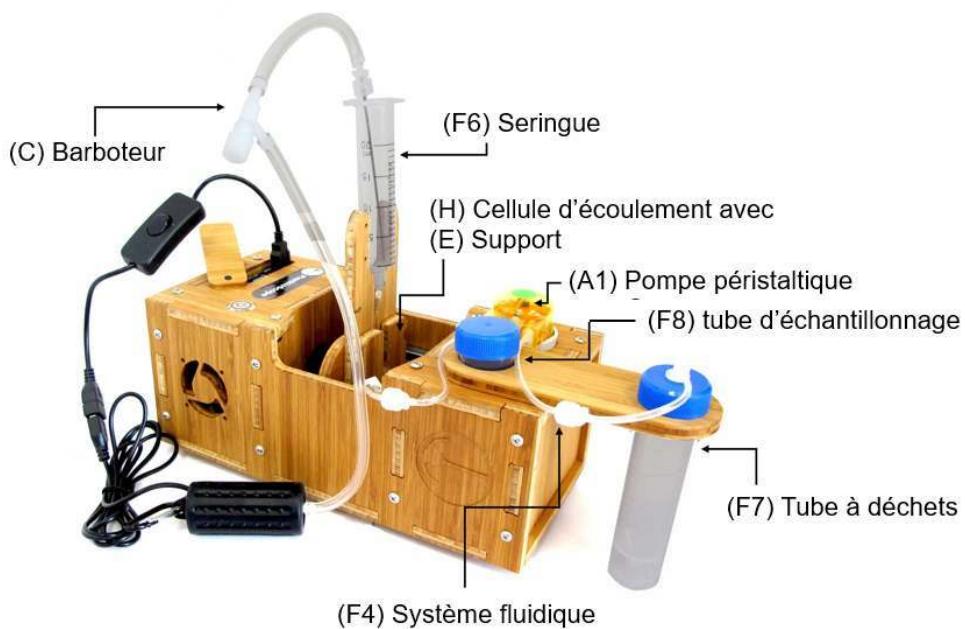


FIGURE 10 – Le PlanktoScope

Après avoir été filtré (filtre de 200 µm), l'échantillon est placé dans la seringue dans laquelle se trouve le barbiteur. Ce dernier est nécessaire pour éviter la sédimentation, car le PlanktoScope prend des images du fluide s'écoulant à basse vitesse. Ne pas agiter l'échantillon permettra au plancton de sédimerter et pourrait même bloquer le système fluidique (voir figure 11). Plus important encore, la concentration des organismes sera inhomogène et les mesures ne refléteront pas les concentrations réelles.

L'écoulement du liquide dans la cellule d'écoulement se fait grâce à la pompe péristaltique. Le débit peut être modifié, généralement il est réglé à 2mL/min.

Il est possible de connecter un ordinateur au PlanktoScope, pour cela il suffit de se connecter au Wi-Fi de l'appareil. Cela donne accès à l'interface utilisateur du PlanktoScope qui comprend de nombreux onglets

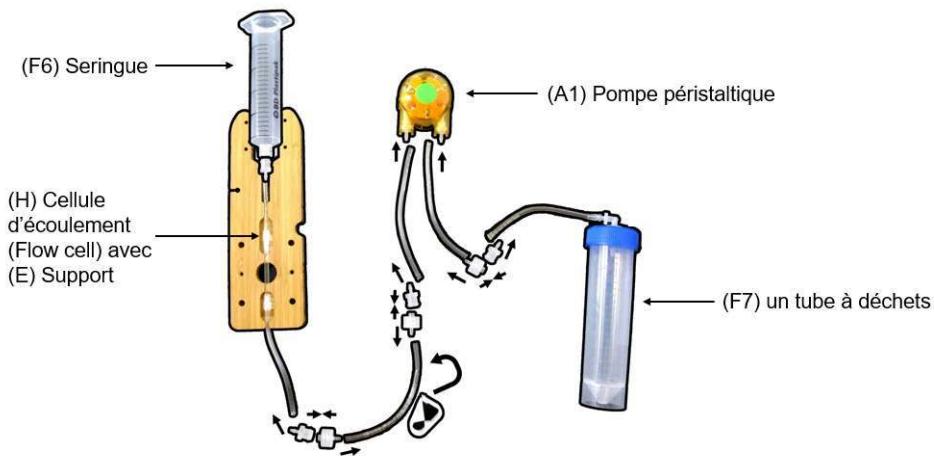


FIGURE 11 – Assemblage du système fluidique

permettant d'ajuster les paramètres, d'exécuter des échantillons et de prendre des images (Perruchon, Zaccomer et Lombard, 2025).

Voici la liste des onglets disponibles sur le PlanktoScope :

- « Sample » pour renseigner toutes les métadonnées de l'échantillon
- « Optic Configuration » pour contrôler les différentes fonctionnalités de PlanktoScope (focus, LED et pompe)
- « Fluidic acquisition » pour lancer une acquisition et modifier ses paramètres
- « Segmentation » pour lancer la segmentation des images prises lors de l'acquisition
- « Gallery » avec les fichiers comprenant les exports pour EcoTaxa, les images originales et les images extraites
- « System Monitoring » pour vérifier le bon fonctionnement de l'appareil (non utilisé en utilisation standard)
- « WIFI » pour les caractéristiques du wifi généré par le PlanktoScope
- « Hardware Settings » (non nécessaire pour le traitement des échantillons et fortement conseillé de ne rien changer, sauf lors de l'étalonnage)

6.3 Analyse de l'échantillon

Avant de passer l'échantillon dans le PlanktoScope il faut renseigner les métadonnées dans l'onglet « Sample ». Les noms du projet, du bateau et de l'opérateur sont demandés ainsi que l'ID de la station. Les tailles minimales et maximales des organismes, la profondeur, la localisation et la date de l'échantillonnage doivent être notées. Il faut aussi indiquer le volume d'eau filtré et le volume d'échantillon concentré récupéré. On peut connaître le volume d'eau filtré grâce à un compteur placé à l'entrée du filet. Si il y a une dilution il faut renseigner le facteur de dilution. Le calcul du facteur de dilution est simple, il suffit de faire un rapport entre le volume d'eau concentrée et le volume d'eau final. Si on note le facteur de dilution f , le volume concentré V_c et le volume ajouté V_a alors : $f = V_c / (V_c + V_a)$.

L'onglet « Optic Configuration » permet d'allumer ou éteindre la lumière du PlanktoScope et de régler la mise au point.

L'acquisition des images se fait dans l'onglet « Fluidic acquisition ». Il est possible de régler le volume pompé entre chaque image et le nombre d'image à acquérir.

Une fois tous les réglages effectués, l'acquisition peut être lancée.

Dans les onglets « Fluidic acquisition » et « Optic Configuration » nous pouvons suivre en direct

l'écoulement de l'échantillon dans la flow cell.

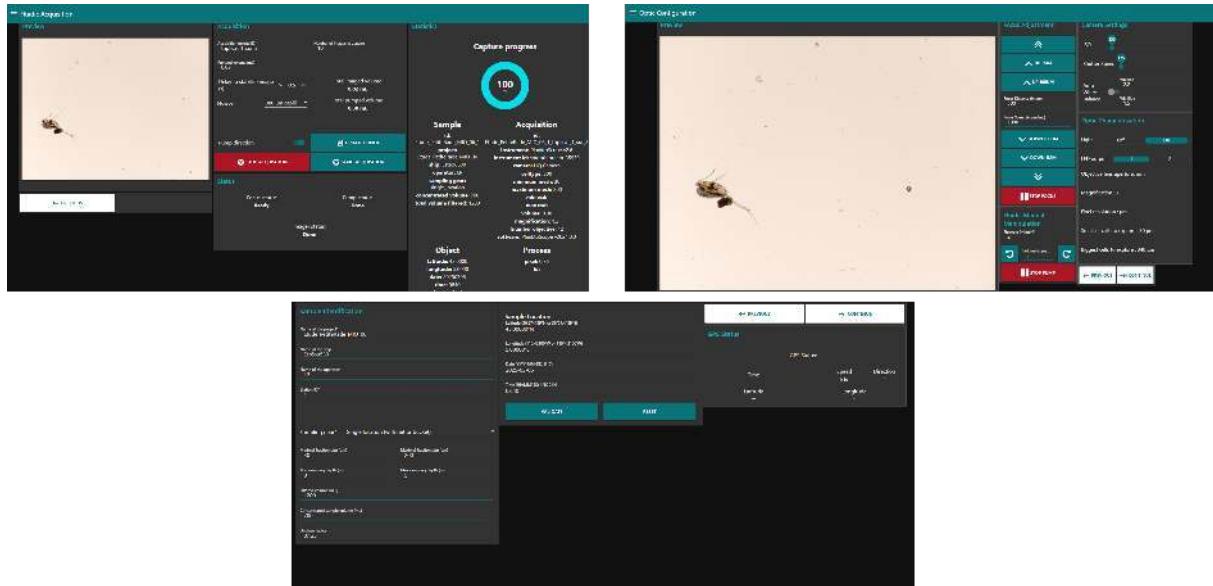


FIGURE 12 – Les onglets principaux du PlanktoScope : « Fluidic acquisition » (à gauche), « Optic Configuration » (à droite) et « Sample » (en bas)

Cinquième partie

Traitements des données

7 Préparation des images

Que ce soit avec le ZooScan ou le PlanktoScope, les images obtenues contiennent un grand nombre d'organismes (ou de détritus) et ne peuvent être traitées telle quelle. Il faut d'abord passer par un pré-traitement des images durant lequel chaque objet visible va être isolé dans une vignette individuelle (voir figure 13). Pour chaque vignette, un certain nombre de paramètres morphométriques vont être mesurés comme la surface de l'objet, la couleur, le diamètre de Féret minimal et maximal, la longueur du contour...

Pour le PlanktoScope c'est MorphoCut qui est utilisé lors de cette étape. C'est une librairie Python spécialisée dans le traitement d'images en "pipeline". Elle est conçue pour découper les vignettes, nettoyer les images (filtrage, réduction du bruit, etc.) et pour extraire les caractéristiques morphométriques.

Ces vignettes ainsi que toutes ces mesures et les données telles que la date, le lieu, la profondeur d'échantillonnage vont pouvoir être importées dans le logiciel ÉcoTaxa.

8 ÉcoTaxa

8.1 Présentation du logiciel

ÉcoTaxa est une application web dédiée à l'exploration visuelle et à l'identification taxonomique d'images de plancton. ÉcoTaxa a été développée au Laboratoire d'Océanographie de Villefranche (LOV) pour

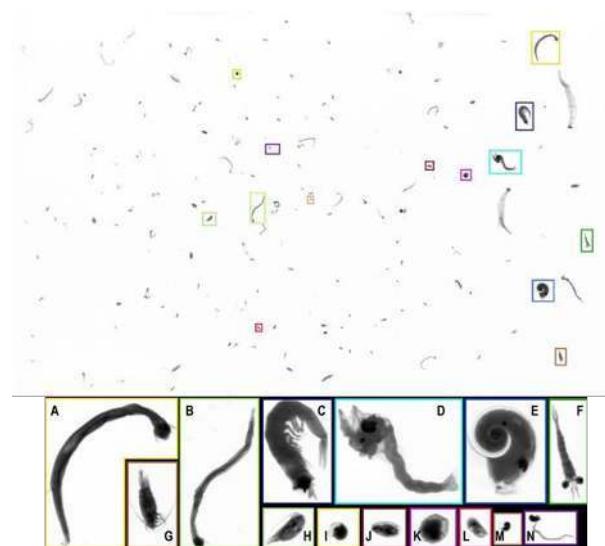


FIGURE 13 – Extraction des vignettes

permettre l'imagerie quantitative à haut débit du plancton servant notamment dans le projet Oceanomics qui a exploité les données collectées lors de la croisière Tara Oceans (Bork, Bowler, de Vargas, Gorsky, Karsenti et Wincker, 2015). L'objectif d'EcoTaxa est de centraliser les images du plancton, de permettre leur classification collaborative le long d'une taxonomie universelle et d'accélérer ce processus grâce à l'apprentissage automatique. Il produit des données écologiques à un point donné en latitude, longitude, profondeur et temps.

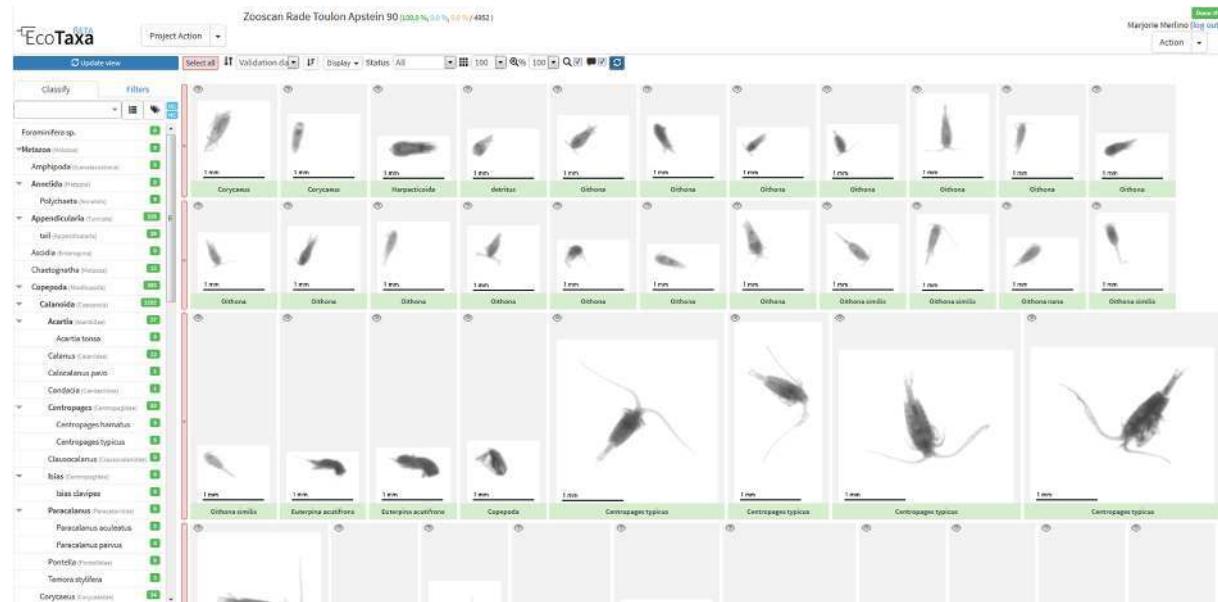


FIGURE 14 – L'interface ÉcoTaxa

Actuellement, EcoTaxa contient environ 150 millions d'images provenant de 350 organisations dans le monde, dont environ 63 millions ont été annotées dans plus de 2000 ensembles de données. Parmi celles-ci, environ 30 millions d'images concernent des organismes vivants. Le taux de croissance est d'environ 4 millions de nouvelles images par mois (Blue-Cloud, s.d.).

Ce qui au départ était un projet technique associé à un projet de recherche est maintenant devenu une plateforme de dimension internationale au succès croissant.

8.2 Fonctionnement et utilisation

ÉcoTaxa présente une interface utilisateur optimisée pour la visualisation, le tri et l'annotation d'images biologiques, et embarque des outils de Deep Learning et de Machine-Learning classique principalement basés sur des réseaux de neurones convolutifs (CNN) comprenant un extracteur de fonctionnalités et un classificateur (un RandomForest). Cela permet d'accélérer et de faciliter le traitement et la structuration des données. L'extracteur de fonctionnalités et le classificateur sont entraînés, en dehors d'ÉcoTaxa, sur des images déjà annotées par des experts. Le premier est entraîné à extraire les caractéristiques profondes de l'image qui permettront, en plus des paramètres morphométriques, de classer les images. Le second, est entraîné à prédire à quelle classe appartient chaque objet (ÉcoTaxa, GitHub). Les utilisateurs peuvent donc entraîner des modèles basés sur les identifications précédentes dans la base de données afin de suggérer des étiquettes pour les images nouvellement téléchargées (Ifremer, S.d.).

ÉcoTaxa attribue une étiquette taxonomique (ex. : copépode, dinoflagellé, diatomée) à chaque vignette avec une probabilité associée. Bien que ces prédictions soient fiables, il peut y avoir des erreurs. Les utilisateurs peuvent donc choisir de valider ou de corriger ces prédictions, renforçant la qualité des données. Cela permet d'améliorer les modèles pour rendre les futures identifications plus précises. Toutes les actions sont enregistrées afin de permettre un contrôle qualité.

Les projets peuvent être publics ou privés, facilitant la mutualisation des données et la collaboration internationale entre laboratoires.

Il est possible d'exporter un fichier .tsv depuis ÉcoTaxa et contenant l'ensemble des métadonnées, des mesures et des identifications afin de représenter ces données sous forme de graphiques ou de courbes.

Sixième partie

Résultats et Discussion

Voici quelques images obtenues avec le PlanktoScope dans la rade de Toulon (voir figure 15). En 1 nous pouvons voir un *Chaetoceros curvisetus* qui est une espèce de diatomées de la famille des *Chaetoceraceae*. Sur l'image 2 nous pouvons voir un crustacé au stade *nauplius*. Ce stade de développement est le premier des stades larvaires pélagiques des crustacés. Ici c'est une larve de copépode. L'image 3 représente un *Neoceratium furca* qui est un dinoflagellé. Les dinoflagellés sont des microorganismes eucaryotes³ unicellulaires qui vivent dans des environnements aquatiques. Ils se déplacent à l'aide de flagelles et peuvent être autotrophes ou hétérotrophes. Ensuite nous pouvons observer une *steenstrupiella* sur l'image 4 et un *protoperidinium* sur l'image 5. Ce dernier est aussi un dinoflagellé.

Toutes les données et identifications obtenues grâce à ÉcoTaxa servent principalement à calculer deux paramètres : le biovolume et l'abondance.

Les graphiques utilisés dans cette partie résultat se trouvent tous en annexe.

3. Être qui possède des cellules à noyau structuré. (Oxford Languages)

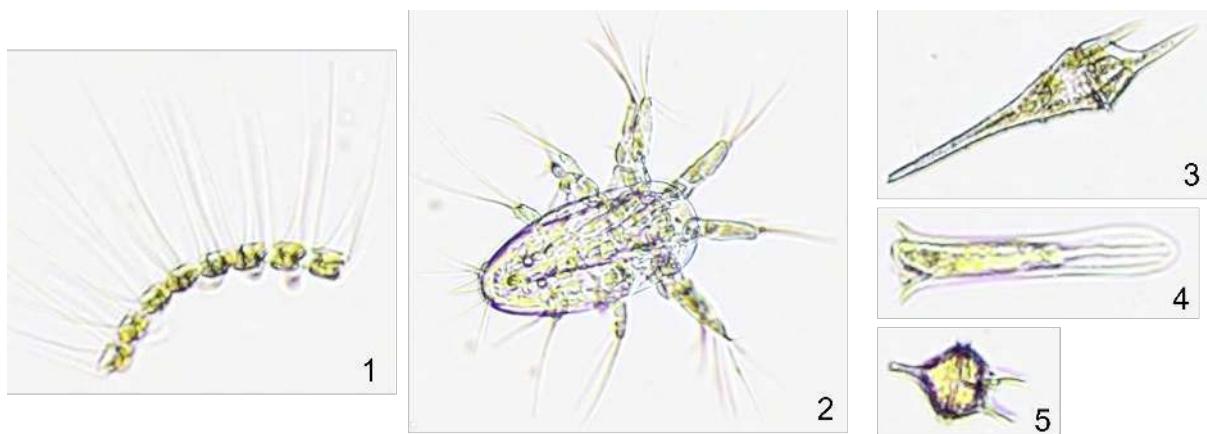


FIGURE 15 – Exemple d’images obtenues

9 Définition

9.1 Définition du biovolume

Le terme “biovolume” désigne le volume occupé par une cellule vivante, un ensemble de cellules ou un détritus dans un milieu et s’exprime généralement en $\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Il est particulièrement utilisé dans les domaines de la biologie, de l’écologie et des sciences des biomatériaux. Le biovolume est une mesure importante lors de l’évaluation de la biomasse dans différentes études biologiques, car il permet d’estimer la quantité de matière vivante présente dans un échantillon. (Goong)

9.2 Définition de l’abondance

En biologie, l’abondance d’un organisme est le nombre total d’organismes par unité d’espace, elle s’exprime en nombre d’individus par m^3 . En connaissant l’abondance d’un organisme dans un milieu on peut en déduire si ce milieu favorable ou non au développement de cet organisme. L’abondance est liée à la capacité de survivre et de reproduction des organismes et de nombreux facteurs peuvent influencer sur celle-ci. (Wikipédia, Abondance (écologie))

10 Résultats dans la Petite Rade

10.1 Le biovolume

Nous pouvons voir sur la figure 17 que le biovolume total dans la petite rade est d’environ 106000 millimètres cube par mètre cube. Plus de 91% de ce biovolume est en réalité du non-vivant comme des détritus. On pouvait s’attendre à ce genre de résultats car, comme nous l’avons vu dans la partie 3 sur les sites de prélèvement, la petite rade est sujette à la pollution.

Dans la partie vivante du biovolume (voir figure 18) nous retrouvons en majorité des diatomées (46%) et des copépodes (36%). Les diatomées sont des algues unicellulaires et sont un constituant majeur du phytoplancton (voir figure 1). Les copépodes (voir figure 16), quant à eux, appartiennent au zooplancton ; ce sont de petits crustacés qui occupent une place clé dans la chaîne alimentaire en se nourrissant notamment de phytoplancton et en servant de proie pour les organismes plus gros.



FIGURE 16 – Un copépode : *Oithona similis*

10.2 L'abondance

L'abondance dans la petite rade est de $9.22 * 10^7$ individus par mètre cube (voir figure 19). Comme pour le biovolume le non-vivant compose la majorité de l'abondance. En effet, seulement 20% des individus sont des êtres vivants, le reste étant des détritus.

La partie vivante de l'abondance est composée en majorité de diatomée comme pour le biovolume (voir figure 20).

11 Résultats dans la Grande Rade

11.1 Le biovolume

Dans la grande rade le biovolume est beaucoup plus faible que dans la petite rade. Cela paraît logique, car il y a une plus grande accumulation d'individus dans la petite rade due à un temps de résidence des eaux plus long. Environ un tiers du biovolume est vivant (voir figure 21).

Les diatomées occupent une partie du biovolume plus petite que dans la petite rade. Cependant nous retrouvons toujours une grande proportion de copépodes (voir figure 22).

11.2 L'abondance

Comme pour le biovolume, l'abondance est plus faible dans la grande rade par rapport à la petite rade avec une majorité de non-vivants. Les diatomées occupent la majorité de l'abondance dans la grande rade (voir figure 23 et 24).

Septième partie

Conclusion

Ce projet personnel de recherche m'a permis de me pencher sur les différentes étapes nécessaires à l'étude des communautés planctoniques, de l'échantillonnage sur le terrain à l'analyse des données en laboratoire. Grâce à l'utilisation d'outils modernes comme le ZooScan et le PlanktoScope, couplés au logiciel ÉcoTaxa, il est désormais possible de traiter un grand volume d'échantillons avec une précision et une rapidité accrue par rapport aux méthodes traditionnelles.

Aussi, l'utilisation combinée du ZooScan et du PlanktoScope offre de nombreux avantages. Ces deux appareils sont complémentaires, en effet, la taille des individus étudiés dépend de l'appareil, ce qui permet d'observer une large palette d'organismes. De plus, contrairement au ZooScan qui reste au laboratoire, le PlanktoScope peut être amené sur le lieu d'échantillonnage (comme le bateau) afin d'analyser les échantillons directement sur le terrain.

Nous avons aussi pu voir que l'intelligence artificielle, qui est au cœur du débat de nos jours, a un enjeu majeur dans le milieu scientifique et notamment ici avec EcoTaxa. Bien que l'intelligence artificielle ne remplace pas l'expertise humaine et fait parfois des erreurs, elle permet de traiter de grandes quantités de données facilitant la surveillance des écosystèmes.

L'étude du plancton dans deux écosystèmes couplés (la petite et la grande rade de Toulon) a permis de mettre en évidence des différences importantes de biovolume et d'abondance, directement liées à des facteurs environnementaux et anthropiques. Ces résultats illustrent l'importance de protéger les écosystèmes marins très sensibles aux impacts de l'activité humaine.

Dans un contexte de changement climatique global, le développement de méthodes automatisées, fiables et efficaces pour le suivi du plancton apparaît comme un enjeu crucial pour la gestion durable des mers et des océans.

Huitième partie

Annexes : graphiques

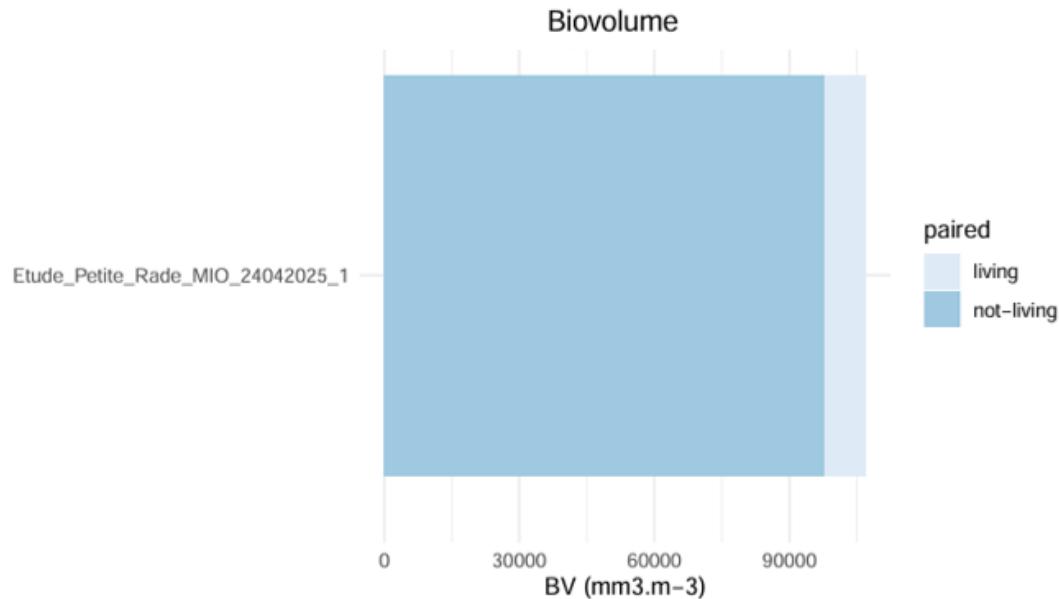


FIGURE 17 – Biovolume dans la petite rade

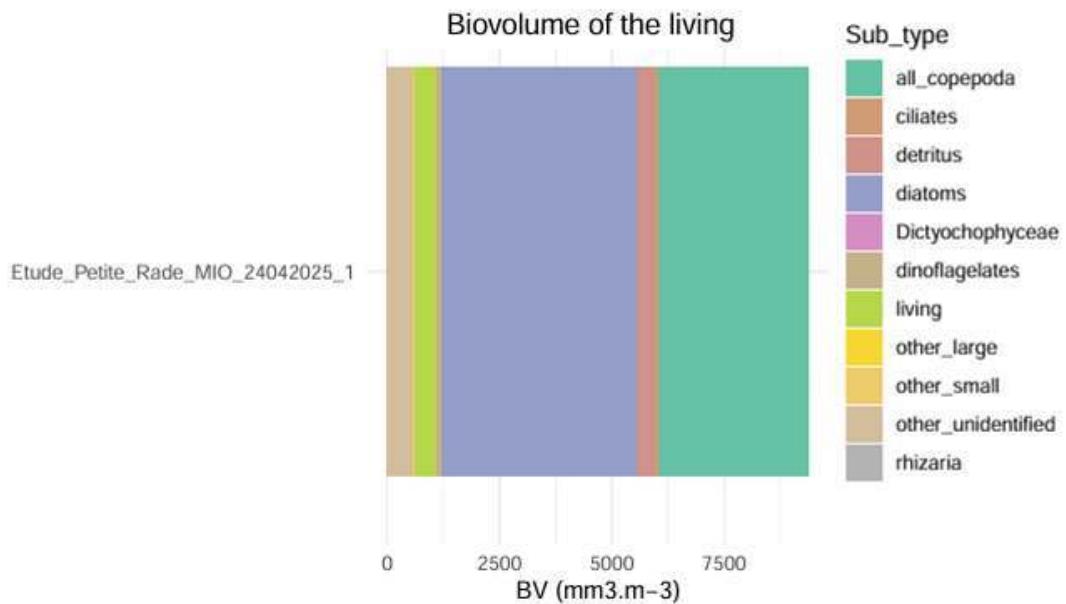


FIGURE 18 – Biovolume du vivant dans la petite rade

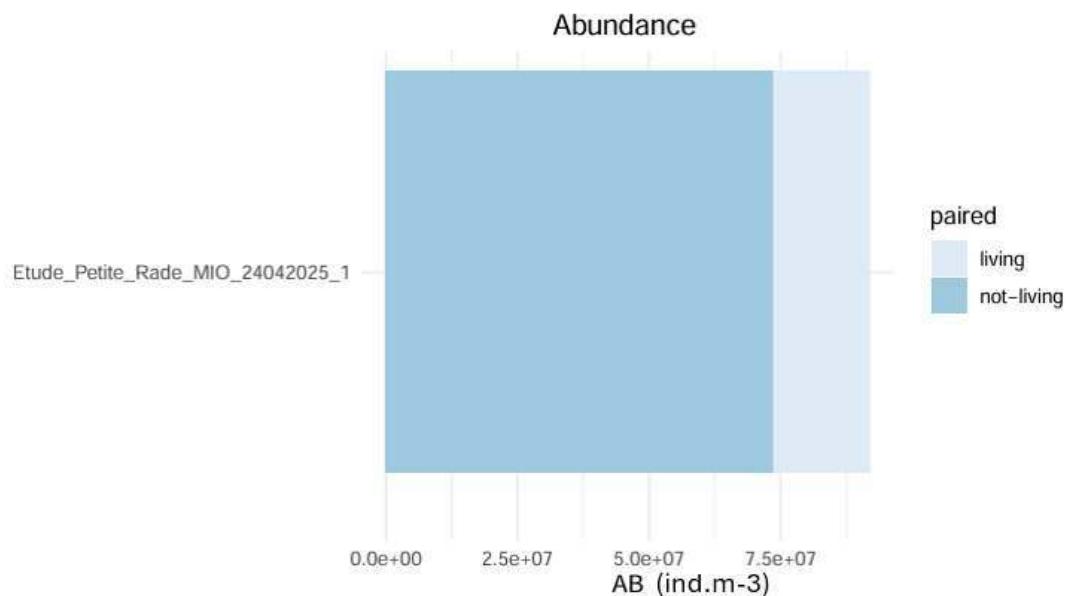


FIGURE 19 – Abondance dans la petite rade

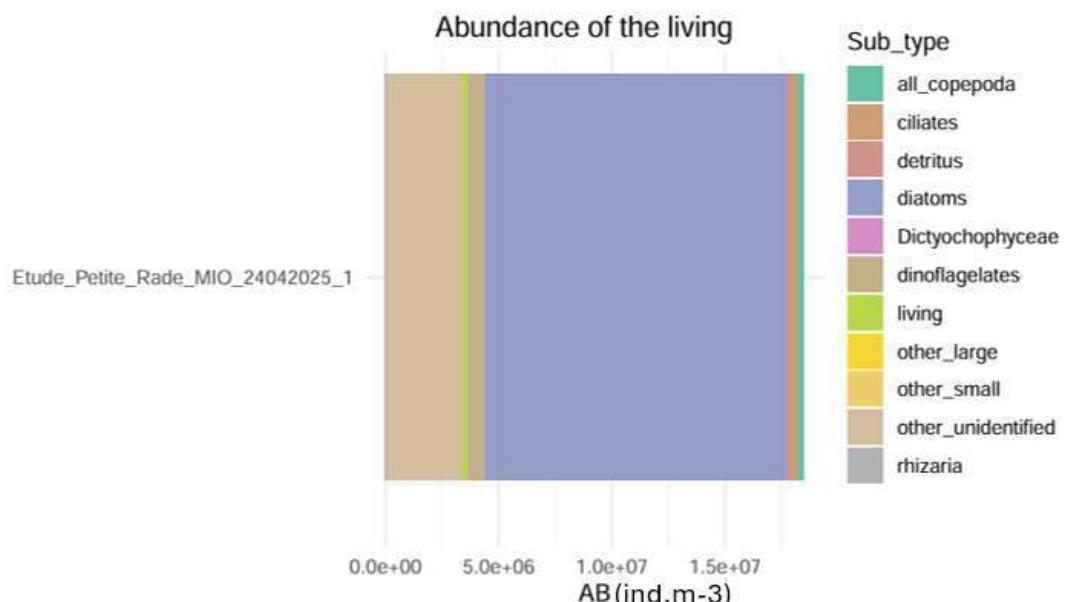


FIGURE 20 – Abondance du vivant dans la petite rade

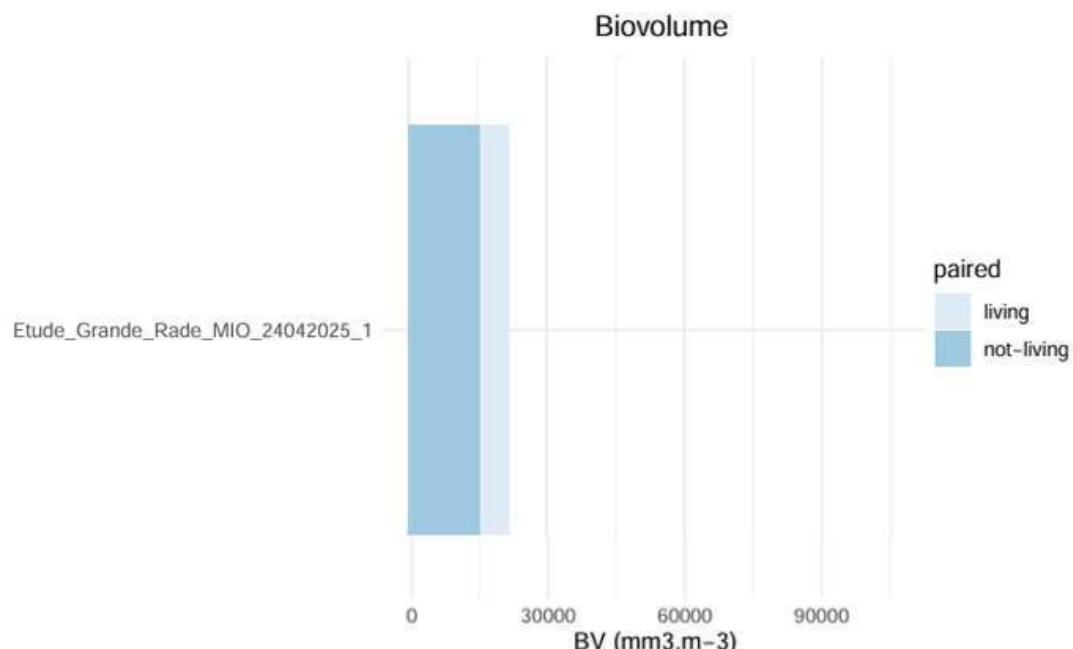


FIGURE 21 – Biovolume dans la grande rade

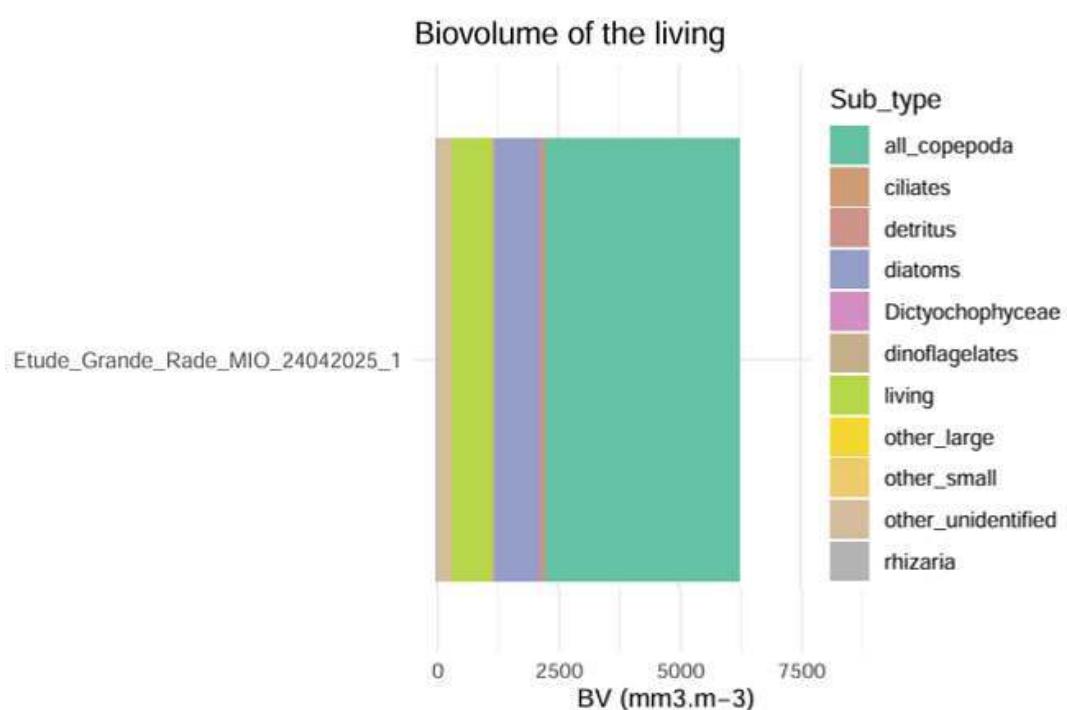


FIGURE 22 – Biovolume du vivant dans la grande rade

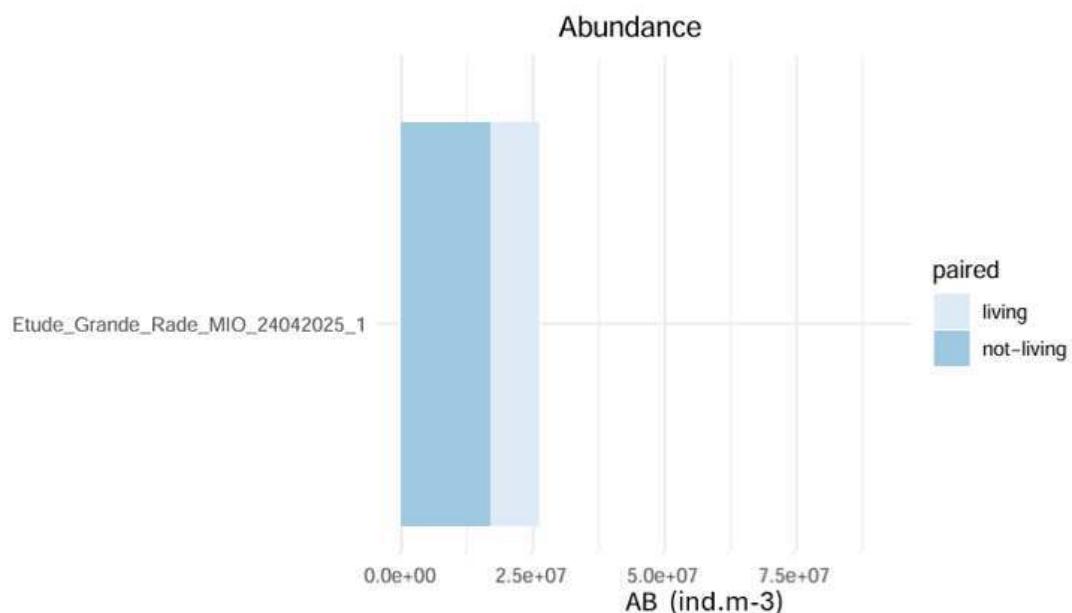


FIGURE 23 – Abondance dans la grande rade

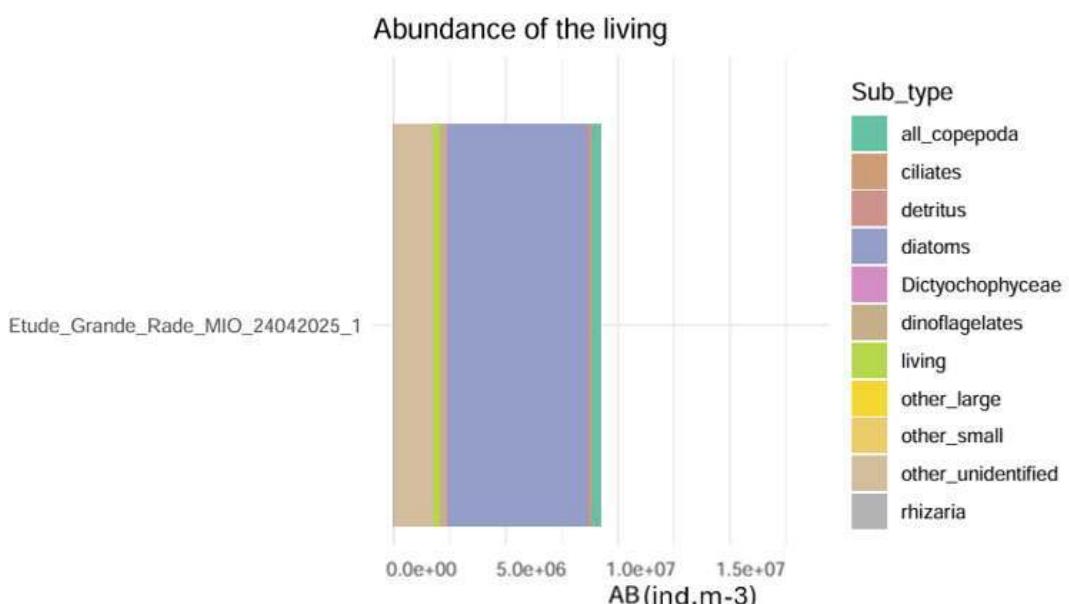


FIGURE 24 – Abondance du vivant dans la grande rade

Références

- [1] Bandeira B. (2013). *Ecologie des communautés zooplanctoniques au sein de deux écosystèmes littoraux méditerranéens : traitement des séries temporelles*. Sciences de la Terre. Université de Toulon.
- [2] Bernard C., Duperron S. (2022). *La Terre, le vivant, les humains* (Coédition MNHN / La Découverte)
- [3] Blue-Cloud. (S.d.) *EcoTaxa*. <https://blue-cloud.org/data-infrastructures/ecotaxa>
- [4] Bork, P., Bowler, C., de Vargas, C., Gorsky, G., Karsenti, E., et Wincker, P. (2015). *Tara Oceans studies plankton at planetary scale*. *Science*, 348(6237), 873. <https://doi.org/10.1126/science.aac5605>
- [5] Bougis P. (1974a). « *Ecologie du Plancton Marin. I – Le Phytoplancton* » Masson et Cie, Paris, 196 pp.
- [6] Bougis P. (1974b). « *Ecologie du Plancton Marin. II – Le Zooplancton* » Masson et Cie, Paris, 200 pp.
- [7] Chami, R., Cosimano, T., Fullenkamp, C., et Oztosun, S. (2019). *Nature's Solution to Climate Change. Finance and Development*, 56(4), 34–38.
- [8] Deluzarche, C. (2021, 13 février). *Phytoplancton : qu'est ce que c'est ?* Futura Sciences. <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/phytoplancton-phytoplancton-3833/>
- [9] Démoulin L. (2014) *Cartographie de la contamination chimique des sédiments de la Rade de Toulon*
- [10] Drouet F. (2024) *Organisation trophique et fonctionnement écologique des Types Fonctionnels du Plancton : application aux transferts de THg dans le continuum planctonique de deux écosystèmes côtiers couplés, différemment impactés par les activités anthropiques (Baie de Toulon, Méditerranée Nord-Ouest, France)*, Thèse de doctorante PhD, UTLN, spécialité océanographie, 195 pp.
- [11] EcoTaxa. (s.d.). *Functional example of the ML pipeline in EcoTaxa*. GitHub. https://github.com/ecotaxa/ecotaxa_ML_template
- [12] FairScope. (s.d.). PlanktoScope *PlanktoScope* <https://www.planktoscope.org/>
- [13] Goong. (s.d.). *Biovolume : que veut dire en français ?* <https://goong.com/fr/word/biovolume-que-veut-dire--en-fran%C3%A7ais/>
- [14] Hydroptic. (s.d.). ZooScan. *ZooScan. Scanner haute résolution pour l'imagerie du zooplankton*. https://www.hydroptic.com/index.php/public/Page/product_item/ZOOSCAN
- [15] Ifremer. (s.d.). *EcoTaxa*. <https://data.ifremer.fr/Centre-de-donnees/Projets/En-cours/EcoTaxa>
- [16] Jamet J-L, Bogé G., Richard S., Geneys C., Jamet D. (2001). « *The zooplankton community in bays of Toulon area (northwest Mediterranean Sea, France)* » *Hydrobiologia* 457, n° 1 : 155–165.
- [17] La langue française. (s.d.). *Définition de "autotrophe"*. <https://www.lalanguefrancaise.com/dictionnaire/definition/autotrophe>
- [18] Perruchon, A., Zaccomer, H., et Lombard, F. (2025). *PlanktoScope protocol for plankton imaging (Version 4)*. protocols.io. <https://dx.doi.org/10.17504/protocols.io.bp216bq3zgqe/v4>
- [19] Photo figure 1 Project : Flowcam Tara Microbiomes WP2 20µm - Leg11 - Subset 100% >=501pix
- [20] Polar POD. (s.d.). *Le plancton arctique*. Encyclopédie Polaire. <https://www.polarpod.fr/fr/encyclopedie/arctique/4-ocean-et-vie-marine/3-le-plancton-arctique>
- [21] Tessier E., Garnier, C., Mullot, J.-U., Lenoble, V., Arnaud, M., Raynaud, M., Mounier, S., (2011). « *Study of the spatial and historical distribution of sediment inorganic contamination in the Toulon Bay (France)* » *Mar. Poll. Bull.* 62, 2075 - 2086.
- [22] Wikipédia. (s.d.). *Abondance (écologie)*. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Abondance_\(%C3%A9cologie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Abondance_(%C3%A9cologie))

Neuvième partie

Résumé

Dans ce rapport, nous avons pu suivre les différentes étapes de l'étude des communautés planctoniques dans la rade de Toulon en utilisant différents appareils d'imagerie. Après avoir effectué un prélèvement d'échantillon en mer à l'aide de filets spécifiques, les équipes du MIO analysent le plancton grâce au ZooScan ou au PlanktoScope. De part leur complémentarité, ces deux appareils permettent d'étudier une large gamme d'organisme planctonique, aussi bien du phytoplancton que du zooplancton. Après un pré-traitement, les données recueillies lors de l'imagerie peuvent être analysées par le logiciel ÉcoTaxa qui permet une classification rapide et fiable des organismes. Ce logiciel fonctionne avec des outils de Deep Learning et de Machine-Learning permettant la reconnaissance des images et leur regroupement dans les différents groupes taxonomiques. Ces résultats sont utilisés pour calculer l'abondance et le biovolume dans la grande et la petite rade de Toulon. On a pu voir que la petite rade, plus polluée et avec un temps de résidence des eaux plus long que la grande rade, contient plus d'organismes mais aussi de nombreux détritus. Ces résultats ont également permis d'identifier les groupes d'organismes vivants majoritaires à chacun des sites de prélèvement. Etudier les écosystèmes marins est nécessaire à la compréhension des mers et des océans et à la protection de ces milieux fragiles.

In this report, we have been able to follow the various stages in the study of plankton communities in the Toulon roadstead using different imaging devices. After taking samples at sea using special nets, the MIO teams analyse the plankton using the ZooScan or PlanktoScope. The complementary nature of these two instruments means that they can be used to study a wide range of planktonic organisms, including phytoplankton and zooplankton. After pre-processing, the data collected during imaging can be analysed using EcoTaxa software, which enables organisms to be classified quickly and reliably. This software uses Deep Learning and Machine Learning tools to recognise images and group them into different taxonomic groups. These results are used to calculate abundance and biovolume in Toulon's outer and inner harbours. We were able to see that the small harbour, which is more polluted and has a longer water residence time than the large harbour, contains more organisms but also a lot of detritus. These results also enabled us to identify the groups of living organisms that were in the majority at each of the sampling sites. Studying marine ecosystems is essential to understanding the seas and oceans and protecting these fragile environments.