

Rapport de sortie en mer – 2024/2025



UE : Measures in Biological Oceanography

Sorties en mer : 15, 16 et 23 septembre 2025

Année universitaire 2025-2026

Master 1 Sciences de la Mer

Juliette Garnier - Titouan Gauthier - Dorian Lapeyre

Professeure : Delphine Thibault

Résumé

Nous avons réalisé six sorties en mer dans le but d'analyser les paramètres environnementaux et leur relation avec les communautés planctoniques au sein de la station SOMLIT du Frioul. Dans un premier temps, nous avons caractérisé la température et la salinité des masses d'eau à l'aide d'une sonde CTD afin de mettre en évidence les zones de stratification et de mélange vertical. Nous avons par la suite tracé les profils d'oxygène dissous dans le but d'évaluer l'influence du système océan-atmosphère ainsi que les processus de respiration et de bioturbation. Nous nous sommes également intéressés aux profils de matière en suspension, étroitement liés à la turbidité des premiers mètres de la colonne d'eau, afin de mettre en évidence les facteurs agissant dessus. Parallèlement, nous avons étudié la composition phytoplanctonique par l'utilisation des indicateurs en chlorophylle a et de rayonnement photosynthétique actif (PAR). Enfin, nous avons réalisé l'échantillonnage des communautés zooplanctoniques sur l'ensemble de la colonne d'eau, dans le but d'établir la prédominance des classes de taille en fonction de la profondeur.

Nos résultats montrent la présence d'une stratification estivale, accompagnée d'un gradient thermique important dans les premiers mètres de la colonne d'eau et d'une augmentation de la densité en profondeur. Les concentrations en oxygène dissous ainsi qu'en matière en suspension varient grandement dans les deux dimensions de la colonne d'eau sous l'influence de l'hydrodynamisme, des mécanismes de remise en suspension ainsi qu'aux apports terrigènes. La mesure de chlorophylle a a démontré une importante production primaire en subsurface, ce qui caractérise les environnements oligotrophes. Enfin, l'analyse des biomasses zooplanctoniques révèle une forte hétérogénéité inter-stations. En recoupant les résultats obtenus avec les séries de longue durée SOMLIT, nous avons mis en évidence le lien intrinsèque qu'il existe entre les communautés zooplanctoniques et l'ensemble des paramètres physico-chimiques, abiotiques et photosynthétiques du milieu. Ce travail souligne l'importance des paramètres abiotiques pour l'organisation des écosystèmes de la rade Nord de Marseille et leur action réciproque sur les cycles biogéochimiques sous-jacents.

Mots clés : Mélange vertical, Paramètres hydrologiques, Corrélations biotique-abiotique, Rayonnement photosynthétique actif (PAR), Turbidité, Chlorophylle a, Biomasse phytoplanctonique, Communautés zooplanctoniques, Stratification de la colonne d'eau.

Abstract

We conducted six scientific campaigns to analyze environmental parameters and their link to planktonic communities at the SOMLIT station of the Frioul. Initially, we aimed to characterize the temperature and salinity of the water masses using a CTD probe to identify areas of stratification and vertical mixing. We then plotted dissolved oxygen profiles to assess the influence of the ocean-atmosphere system, as well as respiration and bioturbation processes. We also investigated suspended matter profiles, which are closely linked to turbidity in the first few meters of the water column, to identify the factors influencing them. In parallel, we studied phytoplankton composition using chlorophyll a and photosynthetic active radiation (PAR) indicators. Finally, we sampled zooplankton communities throughout the water column to determine the predominance of size classes at different depths.

Our results show the presence of summer stratification, followed by a significant thermal gradient in the first few meters of the water column and an increase in density with depth. Dissolved oxygen and suspended matter concentrations vary greatly in both dimensions of the water column under the influence of hydrodynamics, resuspension mechanisms, and terrigenous inputs. Chlorophyll a measurement demonstrated significant primary production in the subsurface, which characterizes oligotrophic environments. Finally, the analysis of zooplankton biomass revealed significant inter-station heterogeneity. By cross-referencing the results obtained with the long-term SOMLIT series, we highlighted the intrinsic link between zooplankton communities and all the physicochemical, abiotic, and photosynthetic parameters of the environment. This work underscores the importance of abiotic parameters for the organization of ecosystems in the northern bay of Marseille and their reciprocal influence on the underlying biogeochemical cycles.

Keywords: Vertical mixing, Hydrological parameters, Biotic–abiotic correlations, Photosynthetically Active Radiation (PAR), Turbidity, Chlorophyll a, Phytoplankton biomass, Zooplankton communities, Water-column stratification.

Table des matières

Résumé	2
Abstract.....	3
Table des figures	6
Table des tableaux	8
1. Introduction	9
2. Matériels et méthodes	13
2.1. Paramètres environnementaux.....	13
2.1.1. Mesure des paramètres physico-chimiques	13
2.1.2. Extraction des données CTD.....	13
2.2. Chlorophylle a.....	14
2.2.1. Site d'échantillonnage et prélèvements	14
2.2.2. Préparation et filtration des échantillons.....	14
2.2.3. Extraction des pigments photosynthétiques	15
2.2.4. Analyse par fluorimétrie	15
2.3. Matière en suspension.....	16
2.3.1. Échantillonnage :.....	16
2.3.2. Filtration :	16
2.3.3. Pesée des filtres :	17
2.4. Zooplancton.....	17
2.4.1. Sortie en mer.....	17
2.4.2. Mesure du Biovolume :.....	18
2.4.3. Mesure de la biomasse dessiquée :	19
3. Résultats	22
3.1. Conditions météorologiques et carte	22
3.2. Relevé SOMLIT long terme.....	24
3.2.1. Température, Salinité et Densité.....	24
3.2.2. Chlorophylle a et matière en suspension.....	25
3.3. Paramètres environnementaux.....	26
3.3.1. Température, Salinité, diagramme T-S et Densité.....	26
3.3.2. Oxygène dissous, PAR et Turbidité	27
3.4. Chlorophylle a.....	29

3.5.	Matière en suspension.....	30
3.6.	Zooplancton.....	31
4.	Discussion.....	32
4.1.	Paramètres environnementaux.....	34
4.1.1.	Température	34
4.1.2.	Salinité et Densité	36
4.1.3.	Oxygène dissous	37
4.2.	Chlorophylle a.....	39
4.3.	Matière en suspension.....	41
4.4.	Zooplancton.....	42
4.5.	Lien entre biomasse planctonique et paramètres environnementaux.....	44
4.5.1.	Température	45
4.5.2.	Salinité	48
4.5.3.	Densité.....	51
4.5.4.	Synthèse.....	54
5.	Conclusion	55
6.	Bibliographie.....	58

Table des figures

FIGURE 1. PHOTOGRAPHIE DE LA BOUTEILLE NISKIN.....	11
FIGURE 2. PHOTOGRAPHIE DE LA SONDE CTD.....	11
FIGURE 3. PHOTOGRAPHIE DU TREUIL DE L'ANTÉDON II PERMETTANT LE DÉPLOIEMENT DE CAPTEURS OCÉANOGRAPHIQUES.	11
FIGURE 4. PHOTOGRAPHIE DU NAVIRE DE RECHERCHE OCÉANOGRAPHIQUE CÔTIER : ANTÉDON II.....	11
FIGURE 5. PHOTOGRAPHIE DU FILET MANTA	12
FIGURE 6. PHOTOGRAPHIES DES MESURES DE CHLOROPHYLLE A PAR FLUORIMÉTRIE AVANT ET APRÈS AJOUT D'ACIDE CHLORHYDRIQUE À 0,1 M.....	16
FIGURE 7. PHOTOGRAPHIES DE L'UTILISATION DU FILET À ZOOPLANKTON WP2 (A) ET DE LA COLLECTE DES ÉCHANTILLONS DE ZOOPLANKTON DANS DES BOUTEILLES DE 2L (B)	17
FIGURE 8. PHOTOGRAPHIES DU BIOVOLUME MESURÉ À LA STATION 4 EN SURFACE PAR LE FILET MANTA (A), SUR L'ENSEMBLE DE LA COLONNE D'EAU PAR LE FILET RÉGENT (B) ET PAR LE FILET WP2 (C).	19
FIGURE 9. PHOTOGRAPHIES DU DÉPÔT DES CLASSES DE ZOOPLANKTON >1000 µM SUR LES FILTRES GF/C À L'AIDE D'UNE PINCE BRUCELLES (A) ET DE LA PESÉE DE LA BIOMASSE DESSÉQUÉE (PESÉE DU FILTRE GF/C APRÈS PASSAGE À L'ÉTUVE SUR UNE BALANCE DE PRÉCISION AU MILLIGRAMME) (B).	21
FIGURE 10. PHOTOGRAPHIE DES BIOMASSE DESSÉQUÉES OBTENUES TRIÉES PAR CLASSE DE TAILLE (2000, 1000, 500, 200 ET 80 µM) SELON LES FILETS UTILISÉS.	21
FIGURE 11. CONDITIONS MÉTÉO DU 09 AU 24 SEPTEMBRE 2025. WINDGURU – STATION DE LA POINTE-ROUGE ET LE GLISSANT.	22
FIGURE 12. CARTE REPRÉSENTANT LES SIX STATIONS UTILISÉES POUR LES PRÉLÈVEMENTS.	22
FIGURE 13. ÉVOLUTION DE LA SALINITÉ DANS LA COLONNE D'EAU DE LA RADE DE MARSEILLE (1994–2025). DISTRIBUTION TEMPORELLE ET VERTICALE DE LA SALINITÉ. L'ÉCHELLE RESSERRÉE PERMET DE DISTINGUER LES VARIATIONS FINES DES MASSES D'EAU, LIÉES AUX APPORTS CONTINENTAUX, AUX ÉPISODES DE MÉLANGE VERTICAL ET À LA CIRCULATION RÉGIONALE.	24
FIGURE 14. ÉVOLUTION ANNUELLE DE LA CHLOROPHYLLE A ET DE LA MATIÈRE EN SUSPENSION (MES) DANS LA RADE DE MARSEILLE, REPRÉSENTÉES POUR TROIS PROFONDEURS (SURFACE, INTERMÉDIAIRE ET PROFONDE). LES BARRES MONTRENT LES MOYENNES ANNUELLES ET LES TRAITS INDIQUENT LES ÉCARTS-TYPES. CES SÉRIES RÉVÈLENT UNE FORTE VARIABILITÉ AU DÉBUT DES ANNÉES 2000 SUIVIE D'UNE BAISSSE ET D'UNE STABILISATION DES CONCENTRATIONS AU COURS DE LA DERNIÈRE DÉCENNIE.	25
FIGURE 15. PROFILS VERTICAUX DE SALINITÉ.	26
FIGURE 18. DIAGRAMME T-S.	26
FIGURE 16. PROFILS VERTICAUX DE DENSITÉ.	26
FIGURE 17. PROFILS VERTICAUX DE TEMPÉRATURE.....	26
FIGURE 19. PROFILS VERTICAUX DE PAR.	27
FIGURE 20. PROFILS VERTICAUX D'OXYGÈNE DISSOUS.	27
FIGURE 21. PROFILS VERTICAUX DE TURBIDITÉ.	28
FIGURE 22. BOXPLOTS DE LA DISTRIBUTION DE CHLOROPHYLLE A EN FONCTION DES 3 PROFONDEURS (SURFACE, MILIEU ET FOND).	29
FIGURE 23. BARCHART DE LA DISTRIBUTION EN MES EN FONCTION DES 3 PROFONDEURS (SURFACE, MILIEU ET FOND).	30
FIGURE 24. BARPLOTS DE LA BIOMASSE SÈCHE ISSUE DU FILET MANTA EN CINQ CLASSES DE TAILLES.....	31
FIGURE 25. BARPLOTS DE LA BIOMASSE SÈCHE ISSUE DU FILET RÉGENT EN CINQ CLASSES DE TAILLES.	31
FIGURE 26. BARPLOTS DE LA BIOMASSE SÈCHE ISSUE DU FILET WP2 EN CINQ CLASSES DE TAILLES.	31
FIGURE 27. TEMPÉRATURES DES STATIONS.	34
FIGURE 28. PROFIL GLOBAL DE TEMPÉRATURE (MOYENNE ± ÉCART-TYPE).	34
FIGURE 29. PROFIL GLOBAL DE SALINITÉ (MOYENNE ± ÉCART-TYPE).	36
FIGURE 30. PROFIL GLOBAL DE DENSITÉ (MOYENNE ± ÉCART-TYPE).	36
FIGURE 31. PROFIL GLOBAL D'OXYGÈNE DISSOUS (MOYENNE ± ÉCART-TYPE).	37

FIGURE 32. PROFIL VERTICAL GLOBAL DE LA CHLOROPHYLLE A (MOYENNE $\pm$ ÉCART-TYPE) DANS LA COLONNE D'EAU. LES POINTS REPRÉSENTENT LES CONCENTRATIONS MOYENNES À DIFFÉRENTES PROFONDEURS ET LES BARRES HORIZONTALES ILLUSTRONT LA VARIABILITÉ ASSOCIÉE.	39
FIGURE 33. DISTRIBUTION DE LA CHLOROPHYLLE A ACTIVE (%) AUX TROIS PROFONDEURS (SURFACE, INTERMÉDIAIRE, PROFONDE) POUR LES SIX STATIONS. LES BOXPLOTS ILLUSTRONT LA VARIABILITÉ VERTICALE ET SPATIALE DE L'ACTIVITÉ CHLOROPHYLLIENNE DANS LA COLONNE D'EAU.	39
FIGURE 34. PROFIL VERTICAL DES MATIÈRES EN SUSPENSION (MES) MOYENNES $\pm$ ÉCART-TYPE DANS LES TROIS COUCHES D'EAU (SURFACE, MILIEU, FOND). LES POINTS INDIQUENT LES CONCENTRATIONS MOYENNES ET LES BARRES HORIZONTALES ILLUSTRONT LA VARIABILITÉ ASSOCIÉE.	41
FIGURE 35. BOÎTES À MOUSTACHE DE LA CONCENTRATION EN MATIÈRE EN SUSPENSION PAR PROFONDEUR ÉCHANTILLONNÉE (SURFACE, MI-PROFONDEUR ET FOND). LA MOYENNE EST MARQUÉE EN ROUGE ET LA MÉDIANE EST REPRÉSENTÉE PAR LA BARRE ORANGE	41
FIGURE 36. BIOMASSE ZOOPLANCTONIQUE ($\text{MG} \cdot \text{M}^{-3}$) PAR FILET ET PAR CLASSE DE TAILLE EN CONDITION SEC. LES BOXPLOTS REGROUPENT L'ENSEMBLE DES STATIONS ET ILLUSTRONT LA VARIABILITÉ DE LA BIOMASSE CAPTURÉE PAR LES TROIS TYPES DE FILETS (MANTA, REGENT ET WP2) SELON CHAQUE MAILLE.	42
FIGURE 37. RELATIONS ENTRE LA BIOMASSE ZOOPLANCTONIQUE ET LA SALINITÉ POUR LES TROIS TYPES DE FILETS (WP2, MANTA ET REGENT). POUR CHAQUE FILET, LA BIOMASSE ZOOPLANCTONIQUE EST REPRÉSENTÉE POUR CINQ CLASSES DE TAILLES (2000, 1000, 500, 200 ET 80 μM). CHAQUE SOUS-GRAPHE MONTRE LES VALEURS MESURÉES AINSI QUE LA RÉGRESSION LINÉAIRE CORRESPONDANTE LORSQU'AU MOINS TROIS POINTS ÉTAIENT DISPONIBLES. LES COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE SPEARMAN (P) ET LES VALEURS DE P ASSOCIÉES SONT INDIQUÉS EN EN-TÊTE DE CHAQUE PANNEAU AFIN D'ÉVALUER LA FORCE ET LA SIGNIFICATIVITÉ DE LA RELATION ENTRE LA TEMPÉRATURE ET LA BIOMASSE. CES VISUALISATIONS PERMETTENT DE COMPARER LA SENSIBILITÉ APPARENTE DES DIFFÉRENTES CLASSES DE TAILLE ET DES DIFFÉRENTS FILETS AUX VARIATIONS DE TEMPÉRATURE.....	45
FIGURE 38. RELATION ENTRE LA CHLOROPHYLLE A ET LA TEMPÉRATURE, OBTENUE À PARTIR DES RÉPLICATS DE TOUTES LES STATIONS ET PROFONDEURS. LA COURBE REPRÉSENTE L'AJUSTEMENT GAM (SPLINE SUR LA TEMPÉRATURE) ET L'ENVELOPPE CORRESPOND À L'INTERVALLE DE CONFIANCE À 95 %. LES POINTS INDIVIDUELS MONTRENT LA VARIABILITÉ DES CONCENTRATIONS MESURÉES.	46
FIGURE 39. RELATIONS ENTRE LA BIOMASSE ZOOPLANCTONIQUE ET LA SALINITÉ POUR LES TROIS TYPES DE FILETS (WP2, MANTA ET REGENT). POUR CHAQUE FILET, LA BIOMASSE ZOOPLANCTONIQUE EST REPRÉSENTÉE POUR CINQ CLASSES DE TAILLES (2000, 1000, 500, 200 ET 80 μM). CHAQUE SOUS-GRAPHE MONTRE LES VALEURS MESURÉES AINSI QUE LA RÉGRESSION LINÉAIRE CORRESPONDANTE LORSQU'AU MOINS TROIS POINTS ÉTAIENT DISPONIBLES. LES COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE SPEARMAN (P) ET LES VALEURS DE P ASSOCIÉES SONT INDIQUÉS EN EN-TÊTE DE CHAQUE PANNEAU AFIN D'ÉVALUER LA FORCE ET LA SIGNIFICATIVITÉ DE LA RELATION ENTRE LA SALINITÉ ET LA BIOMASSE. CES VISUALISATIONS PERMETTENT DE COMPARER LA SENSIBILITÉ APPARENTE DES DIFFÉRENTES CLASSES DE TAILLE ET DES DIFFÉRENTS FILETS AUX VARIATIONS DE SALINITÉ.	48
FIGURE 40. RELATION ENTRE LA CHLOROPHYLLE A ET LA SALINITÉ, OBTENUE À PARTIR DES RÉPLICATS DE TOUTES LES STATIONS ET PROFONDEURS. LA COURBE REPRÉSENTE L'AJUSTEMENT GAM (SPLINE SUR LA TEMPÉRATURE) ET L'ENVELOPPE CORRESPOND À L'INTERVALLE DE CONFIANCE À 95 %. LES POINTS INDIVIDUELS MONTRENT LA VARIABILITÉ DES CONCENTRATIONS MESURÉES.	49
FIGURE 41. RELATIONS ENTRE LA BIOMASSE ZOOPLANCTONIQUE ET LA SALINITÉ POUR LES TROIS TYPES DE FILETS (WP2, MANTA ET REGENT). POUR CHAQUE FILET, LA BIOMASSE ZOOPLANCTONIQUE EST REPRÉSENTÉE POUR CINQ CLASSES DE TAILLES (2000, 1000, 500, 200 ET 80 μM). CHAQUE SOUS-GRAPHE MONTRE LES VALEURS MESURÉES AINSI QUE LA RÉGRESSION LINÉAIRE CORRESPONDANTE LORSQU'AU MOINS TROIS POINTS ÉTAIENT DISPONIBLES. LES COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DE SPEARMAN (P) ET LES VALEURS DE P ASSOCIÉES SONT INDIQUÉS EN EN-TÊTE DE CHAQUE PANNEAU AFIN D'ÉVALUER LA FORCE ET LA SIGNIFICATIVITÉ DE LA RELATION ENTRE LA DENSITÉ ET LA BIOMASSE. CES VISUALISATIONS PERMETTENT DE COMPARER LA SENSIBILITÉ APPARENTE DES DIFFÉRENTES CLASSES DE TAILLE ET DES DIFFÉRENTS FILETS AUX VARIATIONS DE DENSITÉ.	51
FIGURE 42. RELATION ENTRE LA CHLOROPHYLLE A ET LA DENSITÉ, OBTENUE À PARTIR DES RÉPLICATS DE TOUTES LES STATIONS ET PROFONDEURS. LA COURBE REPRÉSENTE L'AJUSTEMENT GAM (SPLINE SUR LA TEMPÉRATURE) ET	

L'ENVELOPPE CORRESPOND À L'INTERVALLE DE CONFIANCE À 95 %. LES POINTS INDIVIDUELS MONTRENT LA
VARIABILITÉ DES CONCENTRATIONS MESURÉES.52

Table des tableaux

TABLEAU 1. CARACTÉRISTIQUES DES PRÉLÈVEMENTS RÉALISÉS AVEC LES TROIS TYPES DE FILETS (MANTA, RÉGENT ET WP2), INCLUANT LA PROFONDEUR D'ÉCHANTILLONNAGE, L'ANGLE D'INCLINAISON, LA DISTANCE PARCOURUE ET LE VOLUME D'EAU FILTRÉ.	18
TABLEAU 2. DÉTERMINATION DES ZONES EUPHOTIQUES OÙ IL NE RESTE QUE 1% DE LA LUMIÈRE INCIDENTE DE SURFACE...28	
TABLEAU 3 . CLASSIFICATION DES RÉGIONS SELON LEUR CONCENTRATION EN NUTRIMENTS. Cf COURS MAGISTRAL D'INTRODUCTION À L'OCÉANOGRAPHIE, 2025.	32

1. Introduction

La dynamique des écosystèmes côtiers du Golfe du Lion représente un enjeu majeur dans un contexte de changement climatique actuel. En effet, situé dans la partie septentrionale du bassin algéro-provençal, le Golfe du Lion occupe une superficie de 15 000 kilomètres carré et se caractérise notamment par un large plateau continental atteignant une centaine de kilomètres dans la rade Nord de Marseille (**BATTISTI, K., 2012**). D'autre part, le forçage dû aux vents dominants orientés Nord-Ouest tels que le Mistral originaire de la vallée du Rhône et la Tramontagne se formant au sein du couloir entre les Pyrénées et le Massif central, (**DOGLIOLI, A., 2013**), influencent grandement l'hydrodynamisme de surface. De plus, les apports du delta du Rhône en Camargue ainsi que de l'Huveaune au Nord de la plage du Prado à Marseille confèrent à cette zone géographique des conditions de salinité, de température et une concentration en éléments terrigènes spécifiques (**Pinazo, C. et al., 2013**). Enfin, par la présence d'un système de marée très faible (de l'ordre de 0,5 m en moyenne à Marseille), la circulation du Golfe du Lion est principalement influencée par le courant Nord-Méditerranéen (**Gatti, J. et al., 2012**).

L'ensemble de ces caractéristiques bathymétriques et hydrologiques offrent des conditions de vie particulières aux micro et macroorganismes peuplant l'écosystème littoral méditerranéen ; caractérisé par une production primaire élevée en condition globalement oligotrophe (**Conan, P., 1996**). En effet, la littérature indique une prédominance de pélagophytes, branchiopodes, chaetognathes et d'appendiculaires en été lorsque la colonne d'eau est très stratifiée. Tandis que ce sont les diatomées, les prasinophytes et les copépodes qui se développent davantage en hiver ou en automne et au printemps, lorsque les éléments nutritifs sont présents dans des concentrations plus importantes (**Jacob, E. et al., 2023**). C'est pourquoi il est important de réaliser des suivis spatiotemporels à long terme de ces zones géographiques présentant une richesse écosystémique élevée.

De ce fait, dans le cadre de l'Unité d'Enseignement de "Mesures en Océanographie Biologique", les étudiants de première année de master Sciences de la Mer ont été amené à effectuer 6 sorties en mer au sud de l'île Ratonneau composant l'Archipel du Frioul afin de réaliser des mesures des différents paramètres physico-chimiques et biologiques de la rade Nord de Marseille. Ces mesures en mer réalisées les 15, 16 et 23 septembre 2025 ont permis d'élaborer un suivi temporel d'une zone géographique donnée aux conditions physico-chimiques et biologiques représentatives du littoral méditerranéen occidental. D'autre part, cette campagne en mer s'inscrit dans un programme de suivi national de longue durée dénommé SOMLIT (Service d'Observation du Milieu Littoral) réparti sur 21 stations au sein du littoral français dont 4 stations en mer Méditerranée (**SOMLIT, 2025**). Cette plateforme d'observation collecte des données deux fois par mois au point de coordonnées (43.2417°N; 5.29167°E). Ces données permettent notamment de réaliser un suivi incluant une variabilité saisonnière, ce qui n'a

pas pu être effectué lors des sorties de terrain cette année dû au faible écart entre les différents jours de sortie. Cependant, aucune donnée décrivant la composition des populations de zooplancton n'a été archivée par SOMLIT. Nous nous sommes donc appuyés sur la littérature pour mener à bien leur description ainsi que leur recoupement à des échelles de temps et de saisonnalité plus importantes.

Ainsi, au cours de ce rapport, nous allons chercher à comprendre dans quelle mesure les variations physico-chimiques au sein de la colonne d'eau entre les stations au large de l'Archipel du Frioul conditionnent la productivité phytoplanctonique et la composition en biomasse zooplanctonique.



Figure 4. Photographie du navire de recherche océanographique côtier : Antédon II.



Figure 3. Photographie du treuil de l'Antédon II permettant le déploiement de capteurs océanographiques.



Figure 2. Photographie de la sonde CTD.



Figure 1. Photographie de la bouteille Niskin



Figure 5. Photographie du Filet Manta

2. Matériels et méthodes

Pour effectuer nos collectes de données et d'échantillons, nous sommes partis en mer avec une équipe SOMLIT à bord de l'Antédon II (Figure 1) provenant de la flotte océanographique française opérée par l'Ifremer. Ce dernier est un bateau de recherche équipé d'un treuil hydraulique (figure 2) permettant la mise en mer de divers outils d'analyses marins tels que des sondes CTD, bouteilles de prélèvement de type "Niskin", filets etc. De plus, ce bateau est équipé de plusieurs instruments de mesures pour établir les différents paramètres de profondeur, vitesse, position, etc.

2.1. Paramètres environnementaux

2.1.1. Mesure des paramètres physico-chimiques

Dans un premier temps, les déploiements de la sonde CTD (figure 3.a), possédant des capteurs de température, de salinité et de pression, ont permis la récolte de données réalisées à bord du navire Antedon II, sur la station côtière SOMLIT-Frioul (rade de Marseille, Méditerranée nord-occidentale) pour les 2 premiers groupes et les 4 autres proches de L'île de Mahmoud (Figure 12). Cette station, représentative des conditions globales oligotrophes de la mer Méditerranée fait partie du réseau national SOMLIT (Service d'Observation du Milieu Littoral).

La sonde CTD a été placée à un mètre du fond (mesure de sécurité pour éviter d'abimer la sonde et/ou le fond marin suivant où la mesure est effectué) et remontée progressivement jusqu'à la surface afin d'obtenir à toutes les profondeurs une mesure de salinité, température et de PAR (*Photosynthetically Active Radiation*). Cette dernière mesure permet d'obtenir la part de fraction de la lumière utilisée par les organismes photosynthétiques.

2.1.2. Extraction des données CTD

À l'aide aux données collectées par la sonde CTD, il a été possible de représenter graphiquement les profils verticaux de la subsurface (1m) jusqu'à un mètre avant la profondeur maximale des stations échantillonnées. En effet, l'observation des paramètres environnementaux permet de caractériser les variables abiotiques du milieu considéré, ce qui nous permet de comprendre l'influence de la dynamique du système océan-atmosphère et hydrologique sur l'évolution des communautés planctoniques (occupant la place de producteurs primaires et secondaire dans la chaîne trophique). Ainsi, l'extraction des données a été réalisée à l'aide des logiciels Excel, Python et ODV (Ocean Data View). Les profils obtenus ont eu pour but de retracer les conditions environnementales de la station SOMLIT du Frioul durant la campagne en mer de

septembre 2025 et également sur une chronologie plus importante (du 24 Mars 1994 au 23 septembre 2025) afin de s'assurer du suivi de la tendance générale des données.

2.2. Chlorophylle a

2.2.1. Site d'échantillonnage et prélèvements

Les prélèvements ont également été réalisés à bord du navire Antedon II, sur la station côtière SOMLIT-Frioul (rade de Marseille, Méditerranée nord-occidentale).

Trois profondeurs ont été ciblées afin de caractériser la variabilité verticale de la biomasse phytoplanctonique : surface (5 m), milieu de la colonne d'eau, et profondeur proche du fond. Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'une bouteille de prélèvement type « Niskin », immédiatement après stabilisation du navire.

Pour chaque profondeur, trois répliques de 660 mL ont été collectés, soit un total de neuf échantillons par station. L'eau de mer a ensuite été transvasée dans des bidons opaques de 2 L, conservés à l'abri de la lumière dans des caisses. Le retour au laboratoire a été effectué le jour même afin de limiter la dégradation pigmentaire.

2.2.2. Préparation et filtration des échantillons

L'extraction de la *chlorophylle a* a nécessité une étape préalable de concentration du matériel particulaire par filtration sous vide.

Le dispositif de filtration comportait une pompe à vide raccordée à trois unités de filtration parallèles chacune composée : d'un entonnoir ("tulipe"), d'un support de filtration en verre et d'un filtre en fibre de verre GF/F (Whatman, diamètre 47 mm, porosité 0,7 μ m). Ce type de filtre est couramment utilisé pour la rétention du phytoplancton dans les mesures de pigments photosynthétiques (cf. protocole SOMLIT, 2025).

Chaque réplique (660 mL) a été filtré de manière progressive afin d'éviter le colmatage (précaution d'usage car ici les concentrations en élément particulaire sont trop faible pour colmater ce genre de filtre) et la lyse des cellules. L'eau était versée par fractions successives (3 $\times$ 200 mL, puis 60 mL) en veillant à maintenir en permanence un film d'eau au-dessus du filtre pour éviter les effets de dépression excessive. Les tulipes ont été recouvertes d'un écran en aluminium pour minimiser l'exposition à la lumière induisant une photodégradation des pigments.

Les filtrations ont été effectuées en trois séries successives correspondant aux trois profondeurs étudiées, chacune comprenant les trois répliques filtrés simultanément. Une fois la filtration terminée, les filtres ont été délicatement transférés à l'aide d'une pince stérile dans des flacons hermétiques en verre borosilicaté, enveloppés d'aluminium, puis immédiatement congelés à -18°C jusqu'à l'étape d'extraction.

2.2.3. Extraction des pigments photosynthétiques

L'extraction des pigments a été réalisée selon la méthode standard décrite par Yentsch & Menzel (1963), adaptée par Holm-Hansen et al. (1965) et utilisée par le réseau SOMLIT. Vingt-quatre heures avant la mesure, 5 mL d'acétone à 90 % (v/v) ont été ajoutés à chaque flacon contenant le filtre congelé. Les échantillons ont ensuite été conservés au froid et à l'obscurité (4 °C) afin d'assurer une dissolution complète de la chlorophylle et de ses dérivés.

2.2.4. Analyse par fluorimétrie

Les concentrations de *chlorophylle a* (Chl a) et de phéopigments (Phéo a) ont été déterminées par fluorimétrie différentielle à l'aide d'un fluorimètre calibré (citer appareil).

Chaque série d'analyses a été précédée d'un blanc d'acétone (90 %) et d'un étalonnage à partir d'une solution standard de *chlorophylle a* pure (Sigma-Aldrich).

Pour chaque échantillon, deux mesures de fluorescence ont été réalisées :

- Avant acidification (F_o),
- Après acidification à l'aide de quelques gouttes d'HCl 0,1 N (F_a), permettant la conversion de la *chlorophylle a* en *phéophytine a*.

La concentration en *chlorophylle a* et en *phéopigments a* ensuite été calculée selon les formules suivantes issue de la méthode fluorimétrique de Lorenzen (1966, 1967):

$$[\text{Chl } a] = F_d \times \frac{\tau}{\tau - 1} \times [(F_o - B_{lo}) - (F_a - B_{la})] \times \frac{v}{V}$$
$$[\text{Phéo } a] = F_d \times \frac{\tau}{\tau - 1} \times [\tau(F_a - B_{la}) - (F_o - B_{lo})] \times \frac{v}{V}$$

où :

- F_d = constante d'étalonnage du fluorimètre,
- τ = rapport moyen de fluorescence avant/après acidification,
- v = volume d'acétone ajouté (5 mL),
- V = volume d'eau filtré (0,66 L),
- B_{lo} et B_{la} = valeurs de fluorescence du blanc avant et après acidification.

Ces valeurs ont ensuite été normalisées au volume d'eau filtré et exprimées en $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Les phéopigments représentent la fraction dégradée de la *chlorophylle a* et sont utilisés pour évaluer l'état physiologique du phytoplancton ainsi que le degré de décomposition du matériel organique.



Figure 6. Photographies des mesures de chlorophylle *a* par fluorimétrie avant et après ajout d'acide chlorhydrique à 0,1 M

2.3. Matière en suspension

2.3.1. Échantillonnage :

Le prélèvement des échantillons a été effectué en même temps que les prélèvements pour la *chlorophylle a* et suivant les mêmes profondeurs : surface, milieu et fond. 1 seul réplica par profondeur a été effectué d'un volume moyen de 2, 109 litres sur l'ensemble des stations.

2.3.2. Filtration :

Pour la filtration, 3 filtres 0,7 μm Whatman GF/F de 25 mm ont été pesé au préalable pour avoir le poids de chaque filtre avant filtration. Chaque filtre sert à extraire la matière en suspension d'une seule profondeur.

Le système de filtration est identique à celui utilisé pour la filtration de la *chlorophylle a*. Le volume de filtration n'est pas défini en avance, cela a été déterminé en fonction du colmatage des filtres. C'est à dire, jusqu'à ce que le filtre ne laisse plus passer de liquide donnant ~2 litres prélevés par échantillons.

À la suite de la filtration, les filtres ont été mis dans des boîtes de pétri pour être séché à une température de 60°C pendant 3 jours.

2.3.3. Pesée des filtres :

Après le séchage, les filtres ont été repesés sur balance de précision pour obtenir le poids sec de la matière en suspension par profondeur et par localisation.

Sur ce point, il peut y avoir de l'incertitude sur le pesage. En effet, certains filtres se sont collés à la boîte de pétri durant le séchage rendant le prélèvement compliqué car il faut essayer de décoller le filtre en perdant le moins possible de matière quitte à venir gratter la boîte pour essayer de perdre le moins de matière possible.

Pour obtenir le poids réel de matière en suspension en $\mu\text{g/L}$, il a fallu soustraire le poids du filtre initial à notre poids de filtre sec après filtration et diviser par le volume filtré.

2.4. Zooplancton

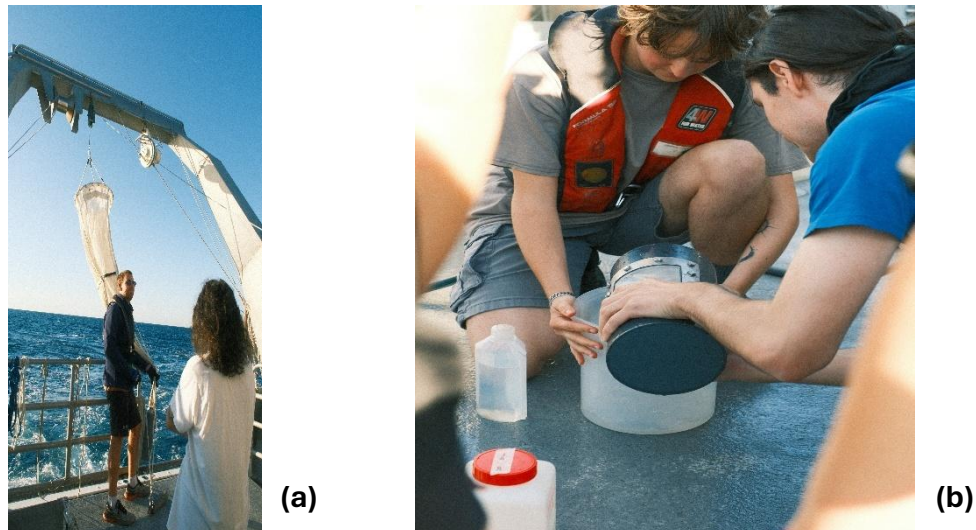


Figure 7. Photographies de l'utilisation du filet à zooplancton WP2 (a) et de la collecte des échantillons de zooplancton dans des bouteilles de 2L (b)

2.4.1. Sortie en mer

Lors des six sorties en mer de septembre 2025, les communautés zooplanctoniques ont été échantillonnées à l'aide de 3 filets distincts : le filet Manta de $330\ \mu\text{m}$ agissant horizontalement, le Régent de $700\ \mu\text{m}$ et le filet WP2 de $200\ \mu\text{m}$ collectant verticalement les échantillons.

Principales caractéristiques des filets à zooplancton utilisés moyennées sur les six stations :

Tableau 1. Caractéristiques des prélèvements réalisés avec les trois types de filets (Manta, Régent et WP2), incluant la profondeur d'échantillonnage, l'angle d'inclinaison, la distance parcourue et le volume d'eau filtré.

	Profondeur	Angle d'inclinaison	Distance parcourue	Volume filtré
Filet Manta	1 m	n.a	694,108 m/ 11,05 min	52,058 m ³
Filet Régent	39,85 m	32,5 °	48 m (profondeur de colonne d'eau)	19,725 m ³
Filet WP2	40,91 m	29 °	48 m (profondeur de colonne d'eau)	11,702 m ³

Mise en bouteilles (Figure 7, b) des individus collectés.

2.4.2. Mesure du Biovolume :

En Laboratoire :

Le matériel utilisé pour la préparation et la fixation des échantillons zooplanctoniques comprend :

- Un tamis de **80 µm**,
- Des béchers,
- Des bouteilles d'eau de mer contenant les échantillons de zooplancton (ZooP),
- Des éprouvettes graduées de **25 mL**, **50 mL** et **100 mL**,
- Du formol (volume à ajouter : **1,2 %** du volume total, soit **150 mL**) et du formaldéhyde à **37 %** (solution concentrée).

Procédure de récupération du zooplancton

Le contenu de chaque bouteille est filtré à l'aide d'un tamis de 80 µm. Ce choix est motivé par le fait qu'il s'agit de la maille la plus fine disponible (l'autre filet étant de 200 µm) et qu'elle permet ainsi de garantir la récupération de l'ensemble des organismes tout en ciblant spécifiquement les organismes dont le diamètre sphérique équivalent (ESD) est supérieur à 80 µm.

L'eau de mer filtrée est conservée pour un usage ultérieur.

Le zooplancton retenu sur le tamis est ensuite réintroduit dans la bouteille initiale préalablement vidée. Pour cela, le tamis est incliné au-dessus du goulot et le transfert est réalisé à l'aide d'une pipette. Le jet est appliqué directement sur la maille, et non par l'arrière du tamis, afin d'améliorer le décollement et la récupération des organismes. Le volume d'eau additionné est maintenu aussi faible que possible, de manière à permettre par la suite l'utilisation d'éprouvettes de petit volume, ce qui augmente la précision de la mesure du biovolume sédimenté.

Transfert, fixation et réduction du volume

Les échantillons provenant des bouteilles de **500 mL** sont transférés dans des flacons de plus petit volume :

- **200 mL** pour les échantillons issus du **filet Manta**,
- **150 mL** pour les échantillons issus des filets **WP2** et **Regent**.

À chaque flacon sont ajoutés 5 mL de formaldéhyde à 37 %. Après environ 2 minutes, la fixation des échantillons est assurée par la mort totale et homogène des organismes.

Le volume d'eau est ensuite réduit en filtrant de nouveau chaque échantillon sur un tamis de 80 μm afin d'obtenir un volume final compris entre 25 mL et 100 mL, selon le type de filet utilisé.

Conditionnement final

Les volumes finaux sont conditionnés dans des éprouvettes adaptées :

- **100 mL** pour l'échantillon du **filet Manta**,
- **50 mL** pour celui du **filet Regent**,
- **25 mL** pour celui du **filet WP2**.

Ces éprouvettes sont ensuite destinées à la phase de sédimentation et de mesure du biovolume.

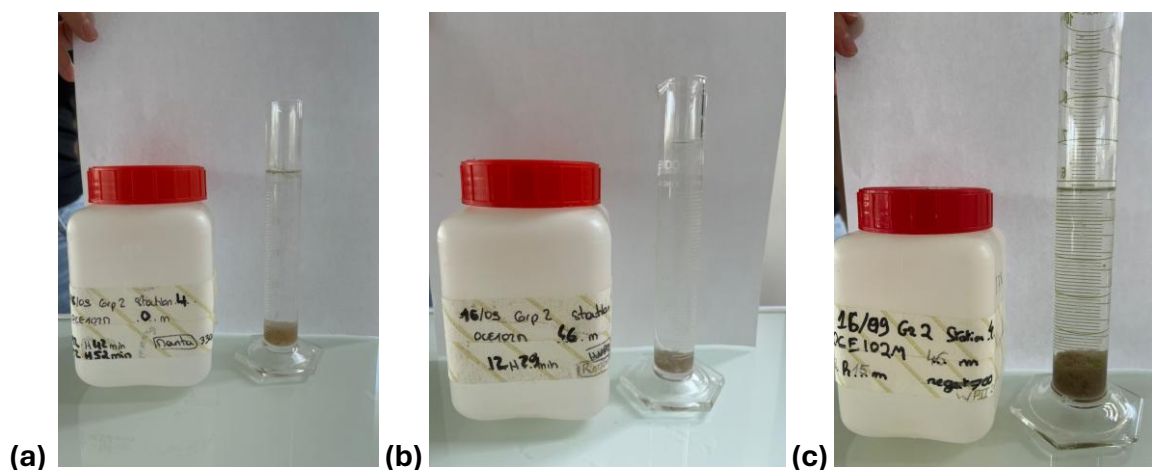


Figure 8. Photographies du biovolume mesuré à la station 4 en surface par le filet Manta (a), sur l'ensemble de la colonne d'eau par le filet Régent (b) et par le filet WP2 (c).

2.4.3. Mesure de la biomasse dessiquée :

Matériel

Le matériel utilisé pour l'analyse granulométrique du zooplancton et la détermination des masses humides et sèches comprend :

- Une colonne de tamis composée de mailles **2000 μm , 1000 μm , 500 μm , 200 μm et 80 μm ,**
- 15 filtres GF/C (1 μm),
- Un système de filtration constitué de trois porte-filtres équipés de tulipes, montés sur une rampe de filtration reliée à une pompe à vide et à un réceptacle collectant l'eau filtrée,
- Une balance de précision (erreur associée : 1 mg),
- Pincettes Brucelles.

Protocole

Avant toute manipulation, les filtres GF/C sont pesés individuellement afin d'obtenir leur masse initiale (masse à vide), nécessaire au calcul ultérieur des masses humides puis sèches. La colonne de tamis est assemblée en plaçant la maille la plus fine (80 μm) en bas jusqu'à la maille la plus large (2000 μm) en haut. Chaque échantillon est ensuite traité séparément afin :

- D'améliorer la précision de la description des communautés zooplanctoniques,
- D'éviter les biais liés à l'accumulation d'organismes trop petits par rapport à la maille du filet utilisé.

Pour chaque filet, le contenu de l'éprouvette correspondante est versé dans la colonne de tamis. L'éprouvette puis chaque niveau de la colonne sont rincés abondamment pour assurer la bonne rétention des organismes sur la maille appropriée.

Tamis 80, 200 et 500 μm

Le zooplancton retenu est concentré sur le bord du tamis à l'aide d'une pissette d'eau distillée, puis le contenu est déposé sur un filtre préalablement pesé, placé au centre de la tulipe du système de filtration. Le tamis est soigneusement rincé sans excès d'eau, puis la pompe à vide est mise en marche pour éliminer le surplus d'eau. La filtration est stoppée lorsqu'il ne reste plus qu'une fine pellicule d'eau, afin d'éviter la dessiccation complète qui pourrait provoquer le fractionnement des organismes.

Tamis 1000 et 2000 μm

Les organismes de grande taille sont prélevés un par un à l'aide d'une pince Brucelles, puis déposés directement sur le filtre associé. Après le dépôt de l'ensemble des organismes retenus par un tamis donné, le filtre est pesé de nouveau afin d'obtenir la masse humide pour chaque classe de taille et pour chaque filet.

Séchage et pesée finale

Les filtres sont placés dans des boîtes de Pétri puis transférés à l'étuve à 60 °C pendant 6 heures. À la sortie de l'étuve, ils sont laissés à refroidir quelques minutes avant la pesée finale, permettant de déterminer la masse sèche du zooplancton par classe de taille.



Figure 9. Photographies du dépôt des classes de zooplancton $>1000 \mu\text{m}$ sur les filtres GF/C à l'aide d'une pince Brucelles (a) et de la pesée de la biomasse dessiquée (pesée du filtre GF/C après passage à l'étuve sur une balance de précision au milligramme) (b).

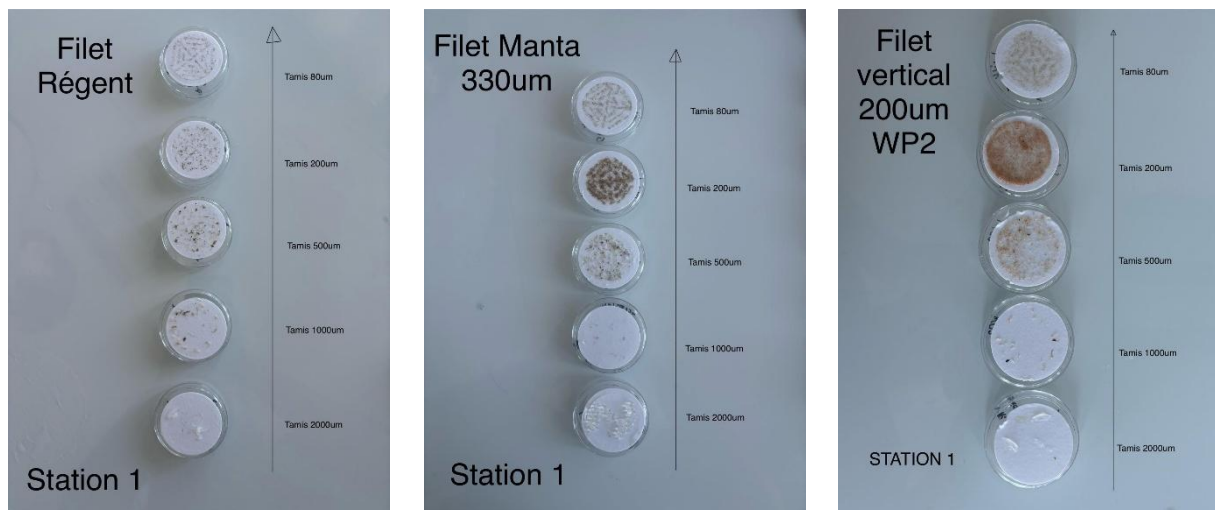


Figure 10. Photographie des biomasse dessiquées obtenues triées par classe de taille (2000, 1000, 500, 200 et $80 \mu\text{m}$) selon les filets utilisés.

3. Résultats

3.1. Conditions météorologiques et carte

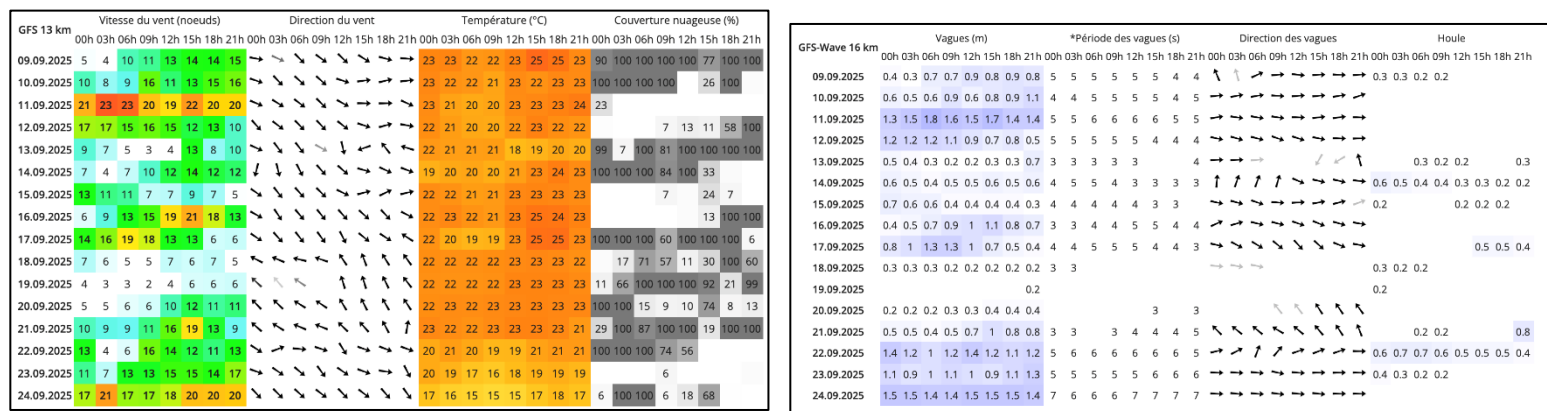


Figure 11. Conditions météo du 09 au 24 septembre 2025. Windguru – Station de la Pointe-Rouge et Le Glissant.



Figure 12. Carte représentant les six stations utilisées pour les prélèvements.

Afin de replacer l'ensemble des mesures océanographiques dans leur contexte environnemental, les conditions météorologiques précédant et suivant les sorties en mer ont été systématiquement examinées. Pour cela, les données de vent et d'état de la mer issues des stations Windguru de la Pointe-Rouge et du Glissant (Figure 11) ont été consultées pour la période du 9 au 24 septembre 2025, couvrant l'ensemble des dates

d'échantillonnage. Ces informations ont permis d'identifier les épisodes de vents forts susceptibles d'influencer le brassage de la couche de surface, la profondeur de la couche de mélange ainsi que la turbidité de la colonne d'eau lors des campagnes.

Parallèlement, la localisation précise des sites d'échantillonnage a été établie à partir d'une cartographie (Figure 12). Les six stations retenues, réparties autour de l'île de Ratonneau et de la station SOMLIT du Frioul, ont été positionnées en fonction de leur représentativité des conditions hydrologiques de la rade Nord de Marseille et de leur accessibilité en fonction des conditions en mer.

L'ensemble de ces éléments constitue le cadre physique dans lequel les observations ont été interprétées. Les données de vent, en particulier, ont été mobilisées pour expliquer les différences observées entre les groupes d'échantillonnage, notamment en matière de stratification thermique, de turbidité et d'oxygénation. La combinaison de l'information météorologique et cartographique constitue ainsi une précaution essentielle pour comprendre les dynamiques influençant les paramètres abiotiques et biologiques mesurés lors de la campagne.

3.2. Relevé SOMLIT long terme

3.2.1. Température, Salinité et Densité

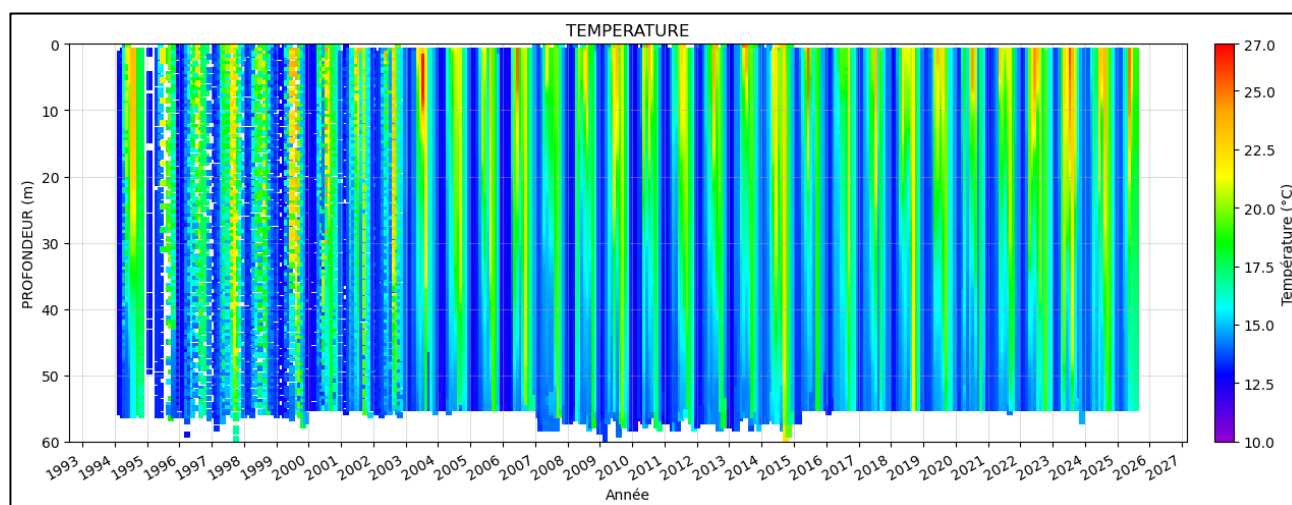


Figure 13. Évolution de la température dans la colonne d'eau de la rade de Marseille (1994–2025). Représentation de la température mesurée à différentes profondeurs au cours du temps. Les variations saisonnières et interannuelles sont visibles, avec un réchauffement marqué des couches de surface et une structure verticale mettant en évidence la stratification estivale.

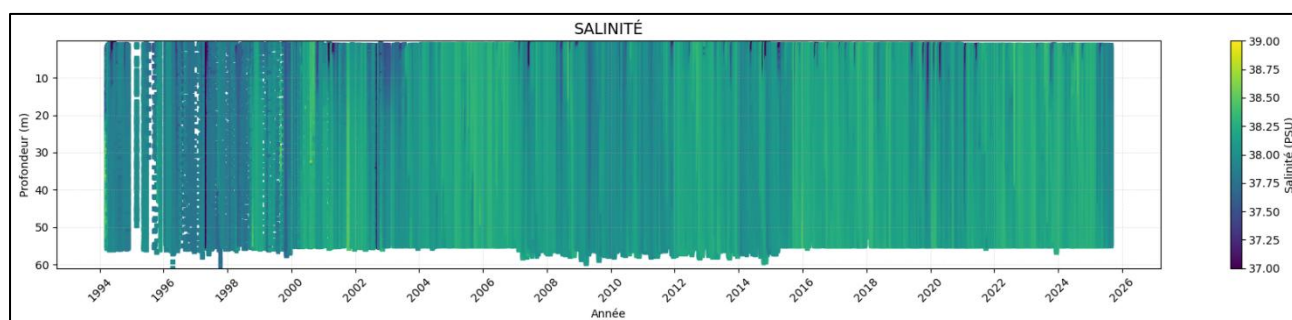


Figure 13. Évolution de la salinité dans la colonne d'eau de la rade de Marseille (1994–2025). Distribution temporelle et verticale de la salinité. L'échelle resserrée permet de distinguer les variations fines des masses d'eau, liées aux apports continentaux, aux épisodes de mélange vertical et à la circulation régionale.

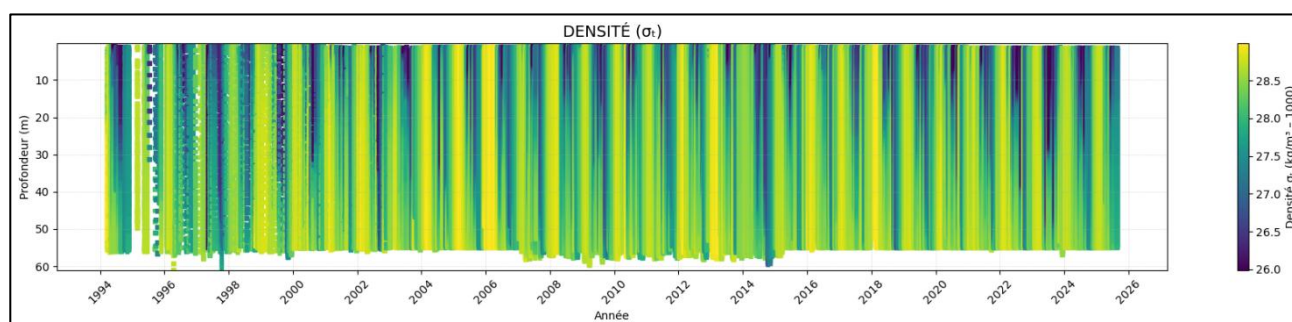


Figure 15. Évolution de la densité (σ_t) dans la colonne d'eau de la rade de Marseille (1994–2025). La densité est calculée à partir de la température et de la salinité (formule UNESCO 1983). La structure verticale révèle les couches stables, la position de la thermocline et les périodes de mélange où la colonne d'eau devient plus homogène

L'analyse des paramètres hydrologiques de long terme a été effectuée à partir des séries temporelles issues du suivi SOMLIT couvrant la période 1994–2025. Les données de température, salinité et densité ont été compilées puis représentées sous forme de

profils verticaux compilés (Figures 13, 14 et 15). Ces représentations permettent de caractériser la variabilité saisonnière et interannuelle des masses d'eau, ainsi que les structures physiques marquant l'évolution de la colonne d'eau.

Les mesures proviennent de capteurs CTD calibrés, intégrés au protocole de suivi, et la densité (σ_t) a été calculée à partir de la température et de la salinité selon la formulation standardisée de l'UNESCO (1983). Les profils ainsi obtenus permettent d'identifier la récurrence des phénomènes de stratification estivale, la position typique de la thermocline, ainsi que les périodes de mélange vertical influencées par les forçages atmosphériques.

L'intégration de ces données constitue une étape indispensable pour contextualiser les observations effectuées lors de la campagne de septembre 2025. La comparaison entre les profils récents et les tendances de long terme permet notamment de détecter d'éventuelles erreurs, de vérifier la représentativité des conditions d'échantillonnage et de lier l'interprétation des paramètres biologiques avec un suivi hydrologique fiable.

3.2.2. Chlorophylle a et matière en suspension

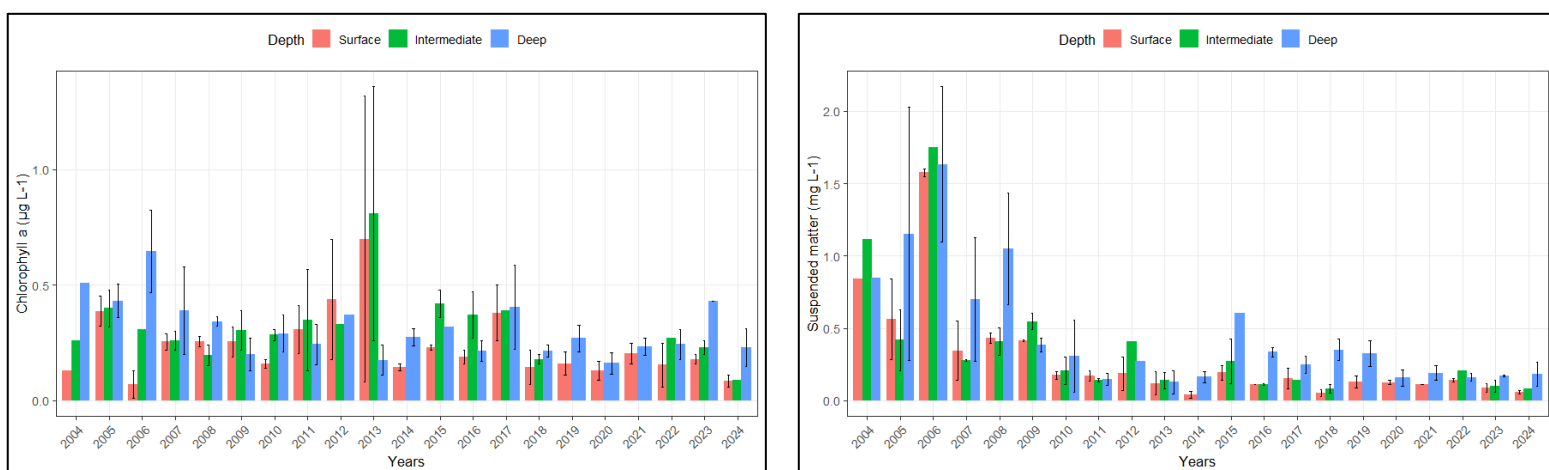


Figure 14. Évolution annuelle de la chlorophylle a et de la matière en suspension (MES) dans la rade de Marseille, représentées pour trois profondeurs (surface, intermédiaire et profonde). Les barres montrent les moyennes annuelles et les traits indiquent les écarts-types. Ces séries révèlent une forte variabilité au début des années 2000 suivie d'une baisse et d'une stabilisation des concentrations au cours de la dernière décennie.

L'étude de l'évolution à long terme de la *chlorophylle a* et de la matière en suspension (MES) a été réalisée à partir de la série hydrologique SOMLIT couvrant plusieurs décennies. Les données, agrégées par année et par profondeur (surface, intermédiaire et profonde), ont été représentées sous forme de moyennes annuelles accompagnées de leurs écarts-types (Figure 16). Cette approche permet de caractériser les tendances temporelles des principales variables liées à la productivité primaire et au contenu particulier de la colonne d'eau.

Les concentrations en *chlorophylle a* proviennent de mesures fluorimétriques normalisées au sein du réseau SOMLIT, tandis que les MES sont issues de protocoles de filtration et de pesée gravimétrique. L'ensemble des valeurs a été contrôlé pour assurer la cohérence méthodologique, puis regroupé afin d'identifier les phases de variabilité interannuelle marquée, ainsi que les périodes de stabilisation observées plus récemment.

L'objectif de cette étape méthodologique est de disposer d'un cadre de référence pour situer les concentrations mesurées durant la campagne de septembre 2025. La comparaison entre les observations ponctuelles et les tendances à long terme permet en effet d'évaluer si les niveaux de *chlorophylle a* et de matières en suspension observés relèvent d'un fonctionnement saisonnier classique ou s'écartent du régime historique du site.

3.3. Paramètres environnementaux

3.3.1. Température, Salinité, diagramme T-S et Densité

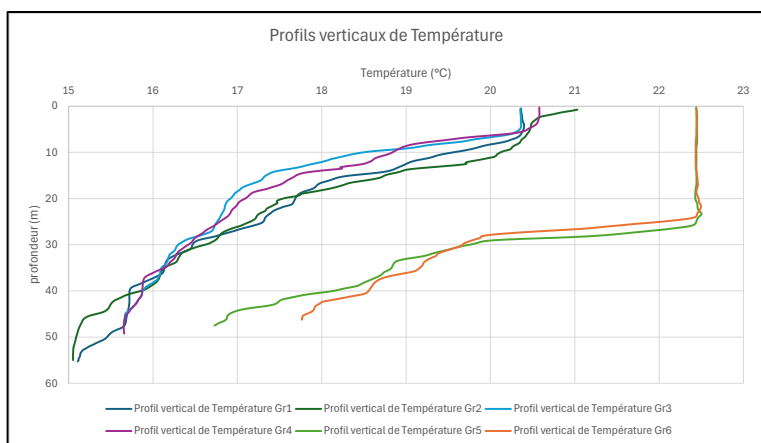


Figure 18. Profils verticaux de température.

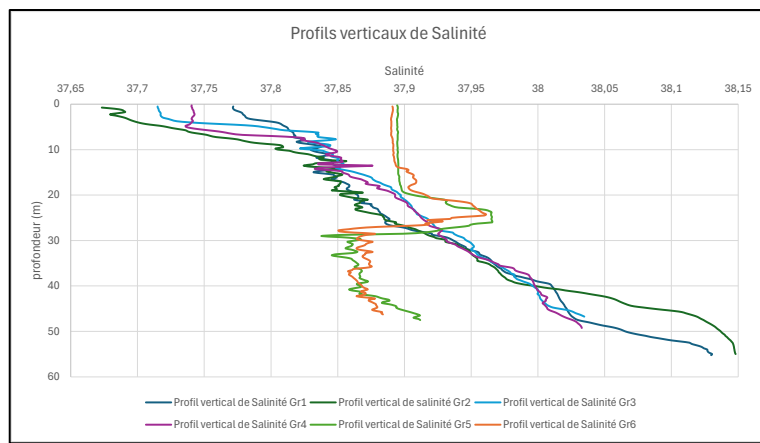


Figure 15. Profils verticaux de salinité.

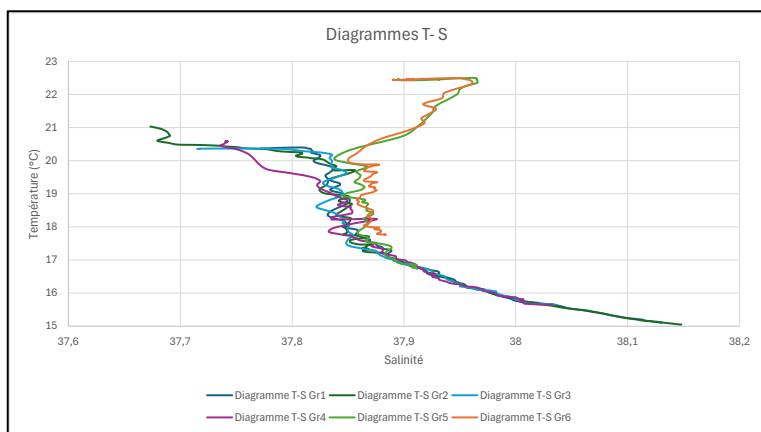


Figure 16. Diagramme T-S.

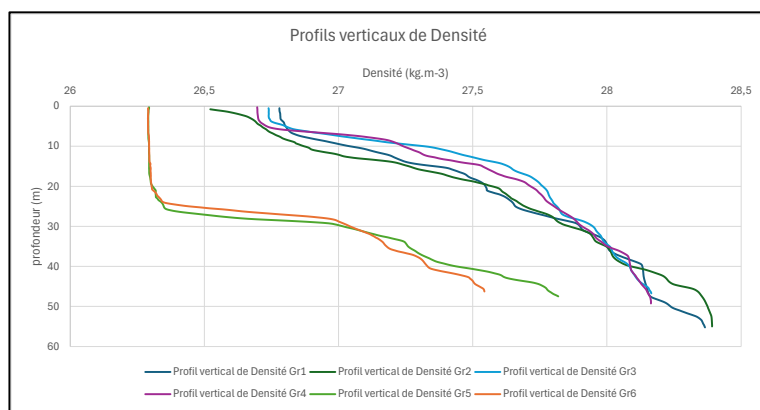


Figure 17. Profils verticaux de densité.

Les profils CTD réalisés sur les six stations montrent des variations verticales marquées pour la température, la salinité et la densité (Figures 17 à 20). Les profils de température des groupes 1 à 4 présentent une distribution similaire, avec une augmentation progressive vers la surface et un refroidissement régulier en profondeur. Les profils des groupes 5 et 6 se distinguent par des températures de surface plus élevées et une zone intermédiaire (entre 20 et 35 m) où les valeurs restent plus homogènes, avant de diminuer en profondeur.

Les profils de salinité indiquent une forte variabilité dans les 20 premiers mètres pour les groupes 1 à 4, avec des fluctuations visibles entre les stations. En dessous de cette zone, la salinité augmente de manière plus régulière. Les groupes 5 et 6 présentent au contraire des profils plus lisses, caractérisés par une salinité de surface plus élevée et une transition verticale continue vers les valeurs profondes.

Les profils de densité reflètent ces différences. Les groupes 1 à 4 montrent un gradient continu depuis la surface vers les profondeurs, tandis que les groupes 5 et 6 présentent des densités plus faibles dans les 30 premiers mètres, suivies d'une augmentation progressive en profondeur.

Les diagrammes T-S confirment l'existence de deux ensembles distincts. Les groupes 1 à 4 occupent un même domaine de températures et de salinités, avec un regroupement serré des points. Les groupes 5 et 6 montrent une signature différente, marquée par des températures de surface plus élevées et des salinités légèrement supérieures dans la couche supérieure.

3.3.2. Oxygène dissous, PAR et Turbidité

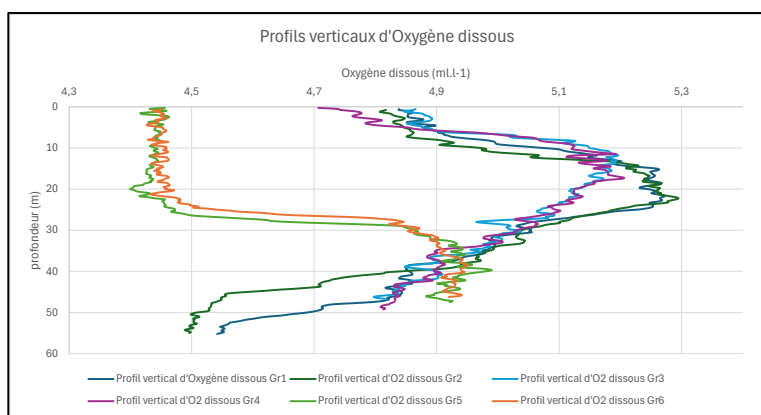


Figure 20. Profils verticaux d'oxygène dissous.

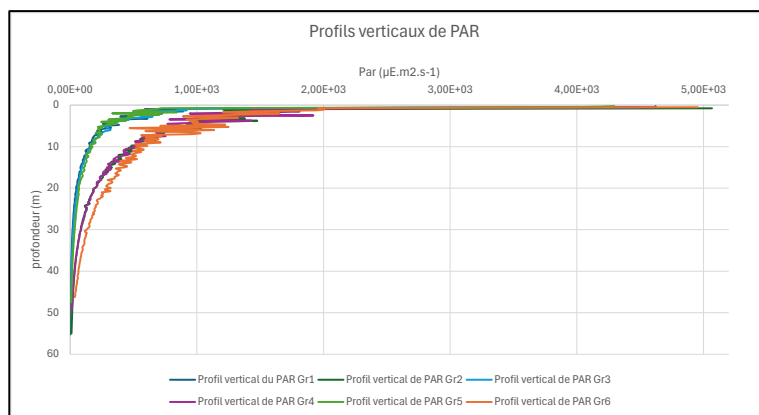


Figure 19. Profils verticaux de PAR.

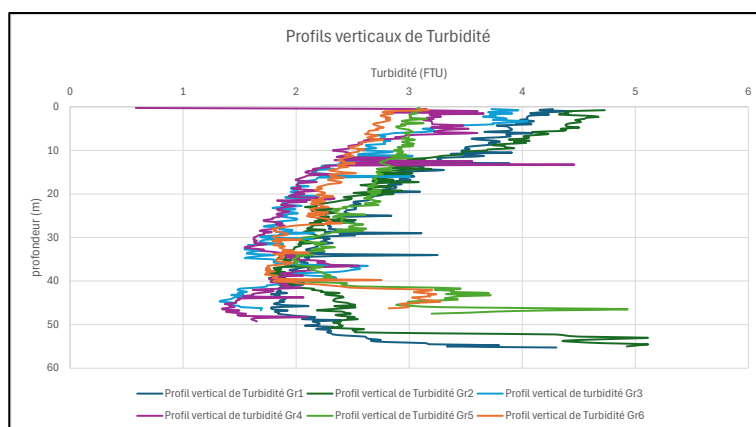


Figure 21. Profils verticaux de turbidité.

Tableau 2. Détermination des zones euphotiques où il ne reste que 1% de la lumière incidente de surface.

	Gr 1	Gr2	Gr3	Gr4	Gr5	Gr6
Profondeur zone euphotique (m)	22.25	35.75	23.25	36.75	27.5	43.25

Les profils verticaux d'oxygène dissous, de PAR et de turbidité présentent des variations marquées entre les différentes stations (Figures 21 à 23).

Les profils d'oxygène dissous montrent des concentrations globalement comprises entre 4,3 et 5,3 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$. Les groupes 1 à 4 présentent des valeurs plus élevées dans les 30 premiers mètres, avec un maximum situé dans la couche superficielle. Les groupes 5 et 6 affichent au contraire des valeurs plus faibles en surface, suivies d'une augmentation entre 20 et 30 m. Dans l'ensemble des stations, les concentrations diminuent progressivement en profondeur, avec une variabilité importante entre 40 et 60 m.

Les profils de PAR présentent une diminution rapide de l'intensité lumineuse dans les 10 premiers mètres. Au-delà, les valeurs chutent progressivement jusqu'à devenir très faibles en dessous de 40 m pour toutes les stations. Les profondeurs auxquelles la lumière devient quasi nulle varient entre les groupes : les groupes 1 à 4 montrent une atténuation plus rapide, tandis que les groupes 5 et 6 présentent une pénétration lumineuse légèrement plus importante, avec des valeurs mesurables au-delà de 30 m.

Les profils de turbidité indiquent une forte hétérogénéité entre les stations. Les couches superficielles présentent des valeurs variables, comprises entre environ 1 et 5 FTU selon les groupes. Entre 10 et 30 m, les groupes 1 à 4 montrent des fluctuations marquées, tandis que les groupes 5 et 6 présentent des profils plus irréguliers, avec plusieurs pics localisés. En profondeur, la turbidité tend globalement à diminuer, bien que certaines stations montrent des valeurs plus élevées entre 40 et 50 m.

3.4. Chlorophylle a

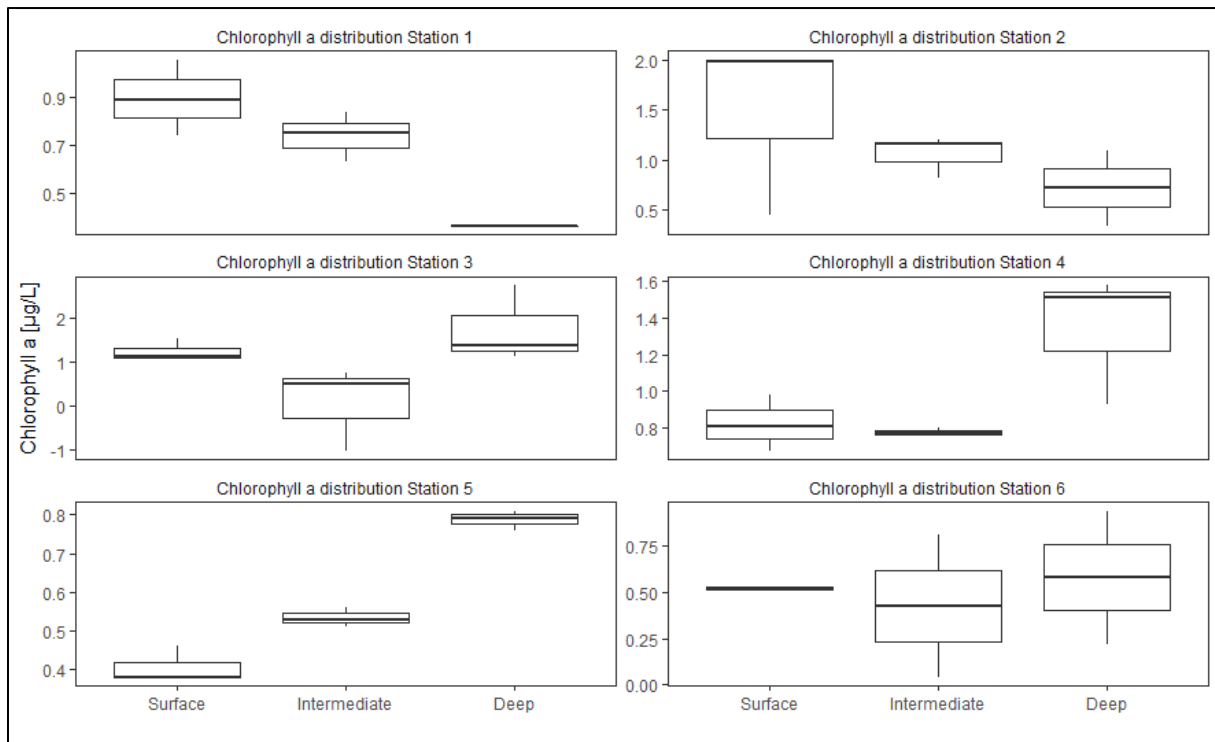


Figure 22. Boxplots de la distribution de chlorophylle a en fonction des 3 profondeurs (surface, milieu et fond).

Les concentrations de *chlorophylle a* mesurées dans les trois couches de la colonne d'eau (surface, intermédiaire et profonde) montrent des variations marquées entre les six stations (Figure 24).

À la station 1, les concentrations sont plus élevées en surface et à mi-profondeur, avec des valeurs comprises entre environ 0,7 et 1 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, tandis que la couche profonde présente des concentrations nettement plus faibles, proches de zéro. La station 2 montre une forte variabilité en surface, avec des concentrations pouvant atteindre environ 1,8 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, suivies de valeurs plus faibles et plus homogènes dans les couches intermédiaire et profonde.

Les stations 3 et 4 présentent un schéma similaire : des concentrations intermédiaires en surface, une diminution à mi-profondeur, puis une augmentation en profondeur. À la station 3, la couche profonde atteint les valeurs les plus élevées (environ 1,4–1,5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). À la station 4, les concentrations profondes sont également les plus importantes, avoisinant 1,5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Les stations 5 et 6 présentent des concentrations globalement plus faibles que les stations précédentes. À la station 5, les valeurs augmentent progressivement avec la profondeur, passant d'environ 0,4 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ en surface à près de 0,8 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ en profondeur. À la station 6, les concentrations sont comparables entre la surface et la couche intermédiaire, autour de 0,4 à 0,5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, et légèrement plus élevées en profondeur.

Dans l'ensemble, les profils montrent donc une variabilité verticale importante, certaines stations présentant un maximum en surface, tandis que d'autres affichent des valeurs maximales dans la couche profonde.

3.5. Matière en suspension

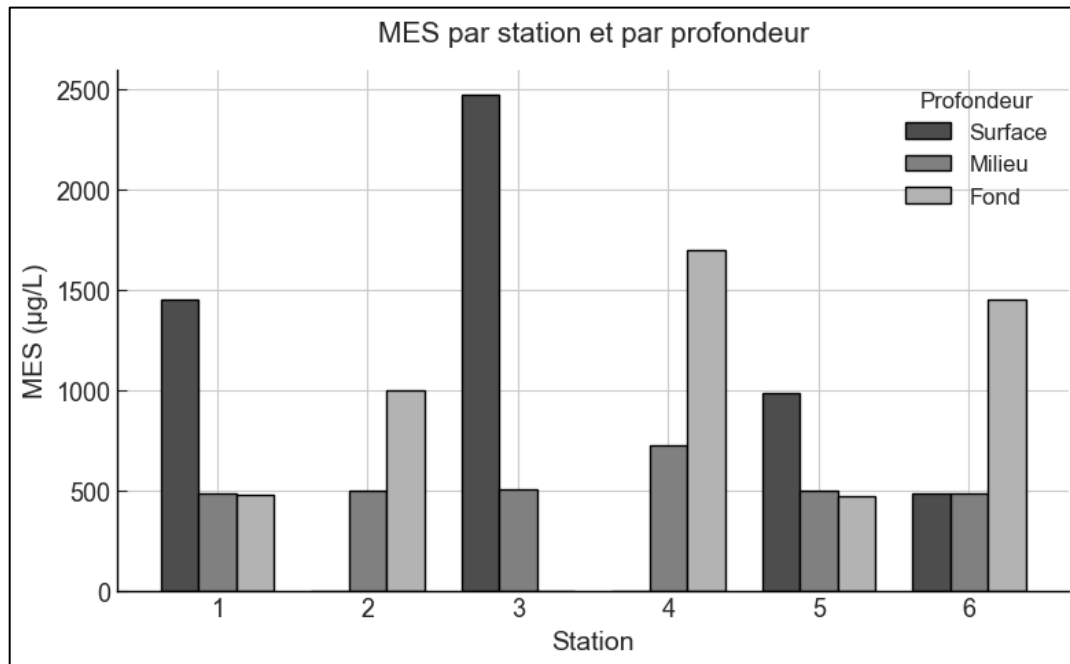


Figure 23. Barchart de la distribution en MES en fonction des 3 profondeurs (surface, milieu et fond).

Les concentrations de matière en suspension (MES) mesurées aux trois profondeurs (surface, milieu, fond) présentent une variabilité notable entre les stations (Figure 25).

À la station 1, les valeurs de MES sont plus élevées en surface, atteignant environ $1\,450\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, tandis que les couches intermédiaire et profonde présentent des concentrations proches de $500\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. La station 2 montre au contraire des valeurs plus modérées en surface (environ $500\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), avec une augmentation nette au fond, où les concentrations atteignent environ $1\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

La station 3 présente les concentrations de surface les plus élevées de l'ensemble des stations, avec une valeur avoisinant $2\,500\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Les couches intermédiaire et profonde y affichent des valeurs comparables, proches de $500\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. À la station 4, la répartition est différente : les valeurs sont plus élevées au fond (environ $1\,700\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), tandis que les valeurs de surface et de mi-profondeur sont plus faibles, autour de $700\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ et $500\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ respectivement.

Les stations 5 et 6 présentent des valeurs plus faibles et relativement homogènes dans la couche intermédiaire (environ $450\text{--}500\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). À la station 5, les valeurs de surface atteignent environ $1\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, tandis que la couche profonde est similaire à la couche

intermédiaire. À la station 6, les valeurs sont plus élevées au fond, avec un maximum d'environ $1\,450\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, alors que les valeurs de surface et de mi-profondeur restent proches de $500\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Ainsi, les profils mettent en évidence des variations verticales et horizontales marquées, avec certaines stations montrant des maxima en surface et d'autres des maxima en profondeur.

3.6. Zooplancton

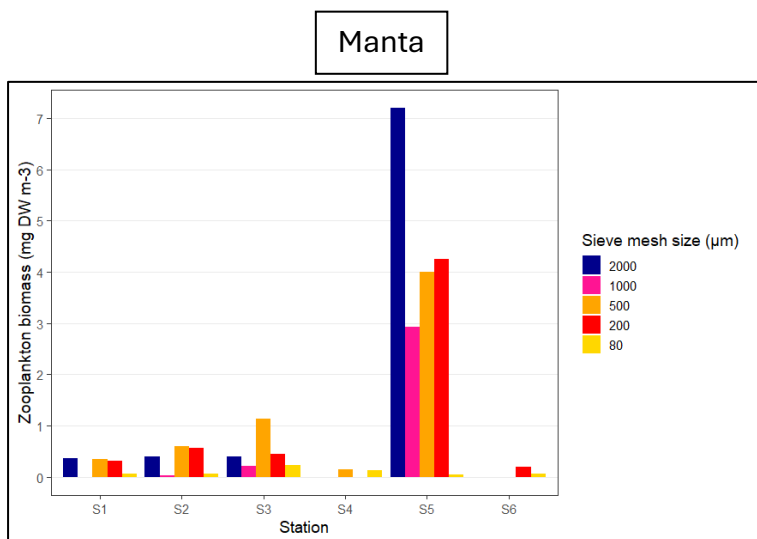


Figure 24. Barplots de la biomasse sèche issue du filet Manta en cinq classes de tailles.

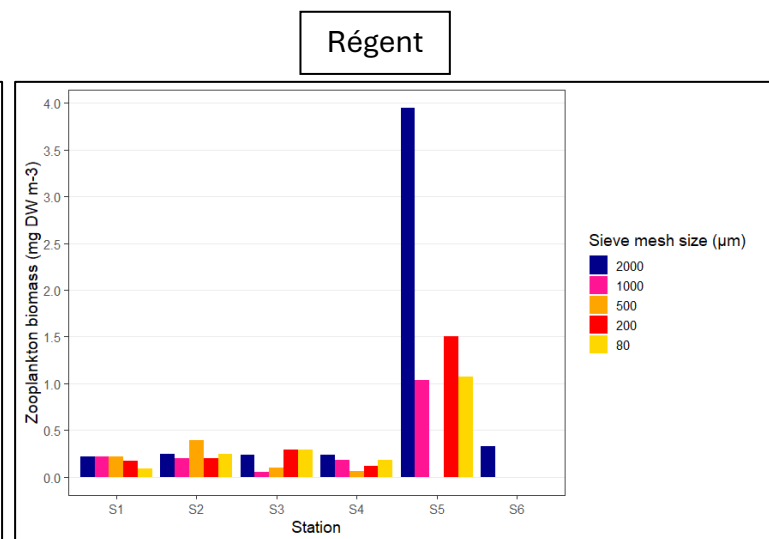


Figure 25. Barplots de la biomasse sèche issue du filet Régent en cinq classes de tailles.

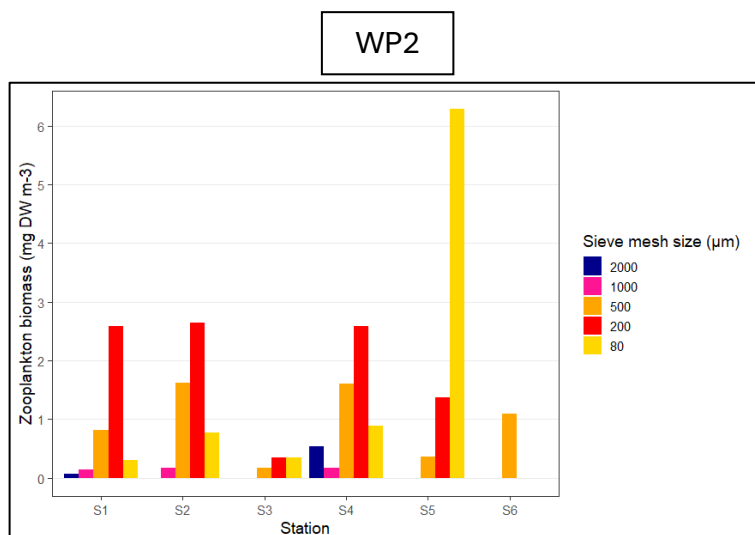


Figure 26. Barplots de la biomasse sèche issue du filet WP2 en cinq classes de tailles.

La biomasse zooplanctonique varie selon les stations et selon les tailles retenues par les différents maillages de tamis (Figures 26 à 28). Pour les tamis de grande maille (2000 et

1000 μm), les biomasses sont très faibles aux stations 1 à 4, avec des valeurs généralement inférieures à $1 \text{ mg DW}\cdot\text{m}^{-3}$. Une exception notable apparaît à la station 5, où la biomasse atteint environ $7 \text{ mg DW}\cdot\text{m}^{-3}$ pour le tamis 2000 μm et entre 3 et $4 \text{ mg DW}\cdot\text{m}^{-3}$ pour le tamis 1000 μm . À la station 6, les valeurs reviennent à des niveaux faibles, proches de $0,5 \text{ mg DW}\cdot\text{m}^{-3}$.

Pour les mailles intermédiaires (500 et 200 μm), les stations 1 à 4 présentent des biomasses modérées, généralement comprises entre 0,2 et $1 \text{ mg DW}\cdot\text{m}^{-3}$. Les valeurs augmentent à la station 5, atteignant environ $4 \text{ mg DW}\cdot\text{m}^{-3}$ pour le tamis 500 μm et près de $1,5 \text{ mg DW}\cdot\text{m}^{-3}$ pour le tamis 200 μm . À la station 6, les concentrations diminuent mais demeurent supérieures à celles des stations 1 à 4.

Pour le tamis le plus fin (80 μm), les biomasses sont plus élevées que dans les classes supérieures. Aux stations 1 à 4, elles varient entre environ 0,5 et $1,5 \text{ mg DW}\cdot\text{m}^{-3}$. À la station 5, les valeurs augmentent fortement, atteignant plus de $6 \text{ mg DW}\cdot\text{m}^{-3}$, constituant la biomasse la plus élevée mesurée sur l'ensemble des stations. La station 6 présente également des valeurs élevées, autour de $1 \text{ mg DW}\cdot\text{m}^{-3}$.

Dans l'ensemble, les résultats montrent une biomasse généralement faible aux stations 1 à 4, une augmentation marquée à la station 5 pour l'ensemble des maillages, et un niveau intermédiaire à la station 6.

4. Discussion

Conditions d'oligotrophie de la Rade Nord de Marseille :

Tableau 3 3. Classification des régions selon leur concentration en nutriments. Cf Cours Magistral d'Introduction à l'Océanographie, 2025.

Classification des régions	Concentration en nutriments ($\text{mg}/\text{m}^3_{\text{eau de mer}}$)
Oligotrophe	<0,05
Mésotrophe	<0,1
Eutrophe	0,1-1,0
Ultraeutrophe	1,0-10,0

La mer Méditerranée présente globalement des conditions oligotrophes. Cependant, la rade Nord de Marseille est soumise aux apports des fleuves côtiers de l'Huveaune et des Aygalades dans le Golfe du Lion, (**Pinazzo, C. et al., 2013**), ce qui confère un apport important en matière organique particulaire et dissoute et en nutriments tels que l'Azote et le Phosphore majoritairement présents sous forme de nitrates et de phosphates. Mais également grâce à un ensoleillement annuel important (2566 à 3115 heures d'ensoleillement annuelles à Marseille recensées en moyenne entre 1991 et 2025

(Météo France), induisant une forte entrée d'énergie solaire pour la réalisation de la photosynthèse dans les écosystèmes côtiers.

D'autre part, les caractéristiques topographiques du bassin du Golfe du Lion présentent un prolongement du plateau continental sur 3 km de long (**Collina-Girard, J. et al., 1995**). De plus, la rade Nord de Marseille est caractérisée par une profondeur moyenne de 52 m pour une superficie de 65 km² (**Somlit, 2018**). Cela permet l'élargissement du domaine phytal, lieu de production primaire (0-200 m) sur une zone importante.

De plus, d'après les 28 ans de données collectées par la plateforme SOMLIT, les principaux éléments nutritifs échantillonnés sont l'ammonium, les nitrates et les nitrites pour l'azote dissous ainsi que les phosphates et l'acide ortho silicique. Leur concentration moyennée sur l'ensemble de la colonne d'eau est de $0,0016 \pm 0,00006$ mg/m³_{eau de mer} annuel (prise en compte de la variation saisonnière de leur concentration). Avec un maximum de 0,0272 mg/m³_{eau de mer} et un minimum de 0,00004 mg/m³_{eau de mer} annuel. Cette valeur est inférieure à 0,005 mg/m³_{eau de mer}, d'après le Tableau 3, ce qui met en évidence la condition d'oligotrophie de la rade Nord de Marseille. Par ailleurs, la *chlorophylle a* mesurée sur cette même échelle de temps est de l'ordre de $0,43 \pm 0,02$ µg/L avec un maximum de 6,2 µg/L atteint le 28 Mars 2006 et un minimum de 0,01 µg/L observée le 10 Juin 1997.

Ainsi, les concentrations en nutriments issues des relevés SOMLIT (1997-2025) et les valeurs de *chlorophylle a* relevées lors de la campagne en mer de septembre 2025 corrélées aux données SOMLIT indiquent que la rade Nord de Marseille peut être caractérisée comme une zone oligotrophe.

4.1. Paramètres environnementaux

4.1.1. Température

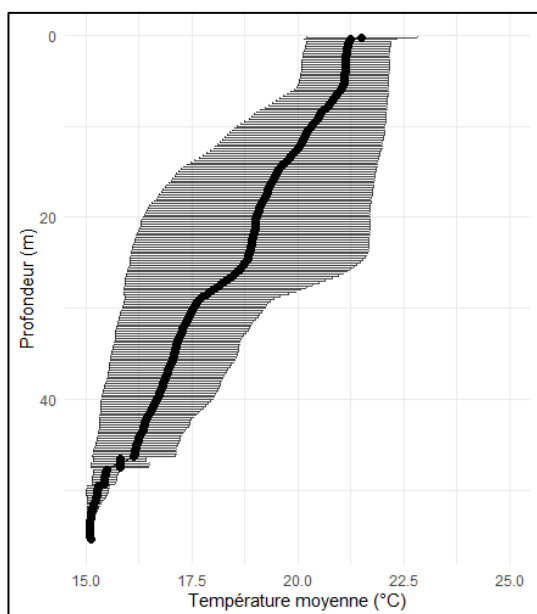


Figure 28. Profil global de température (moyenne $\pm$ écart-type).

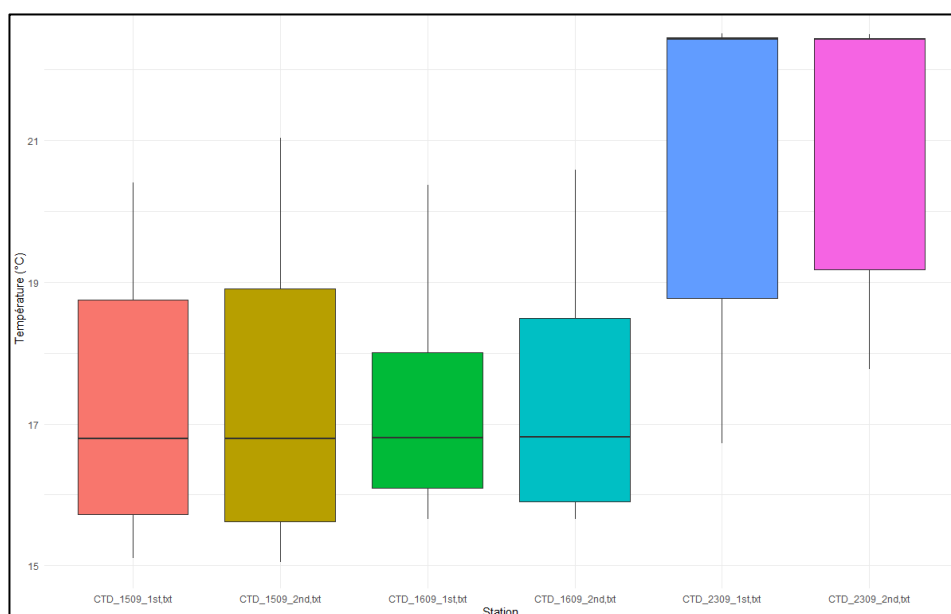


Figure 27. Températures des stations.

Les mesures de température réalisées sur six stations CTD, réparties en trois zones échantillonnées à différentes dates (15, 16 et 23 septembre), montrent que la colonne d'eau de la rade de Marseille présente des variations marquées selon la profondeur, la station et le moment du prélèvement.

Le graphique de gauche met en évidence la distribution verticale de la température moyenne, accompagnée de son écart-type. On observe une organisation typique des eaux méditerranéennes en fin d'été :

- **En surface (0–10 m) :** les eaux sont les plus chaudes grâce au réchauffement solaire.
- **En profondeur (>20 m) :** la température est plus basse et reste relativement stable, car ces eaux sont plus denses et moins influencées par les conditions météorologiques.

La différence de température entre la surface et le fond suggère l'existence d'un gradient thermique vertical, mais sans qu'une stratification marquée ne soit clairement identifiable. Le profil moyen montre en effet une diminution progressive de la température avec la profondeur, sans rupture nette ou zone de transition abrupte.

La zone où les écarts-types sont plus élevés ne correspond pas à une thermocline franche, mais plutôt à une transition diffuse, reflétant une variabilité modérée des masses d'eau selon les stations ou les répétitions d'échantillonnage. Ainsi, la colonne

d'eau présente un changement thermique progressif, typique d'une structure faiblement stratifiée, plutôt qu'une séparation nette entre eaux chaudes de surface et eaux plus froides en profondeur.

Les graphiques montrent également que les températures ne sont pas les mêmes selon les stations ni selon les dates. Par exemple, les profils des stations échantillonnées le 23 septembre (courbes roses et bleues) présentent des températures de surface d'environ 22 °C, plus élevées que celles des stations échantillonnées les 15 et 16 septembre. Cela peut s'expliquer par une date de prélèvement plus tardive, ou par une zone davantage exposée au réchauffement.

À l'inverse, les stations des 15 et 16 septembre (courbes vertes et jaunes) montrent des températures plus fraîches et plus homogènes, ce qui peut indiquer une zone soumise à un mélange vertical plus fort, possiblement dû au vent et à la circulation locale du aux conditions météorologiques qui ont précédés les prélèvements.

Dans l'ensemble, ces résultats illustrent clairement que la colonne d'eau varie fortement dans l'espace et dans le temps. Selon la zone ou le jour d'échantillonnage, la stratification peut être plus ou moins marquée.

Ces différences ne sont pas anodines. Elles influencent directement la productivité du phytoplancton et la composition du zooplancton.

4.1.2. Salinité et Densité

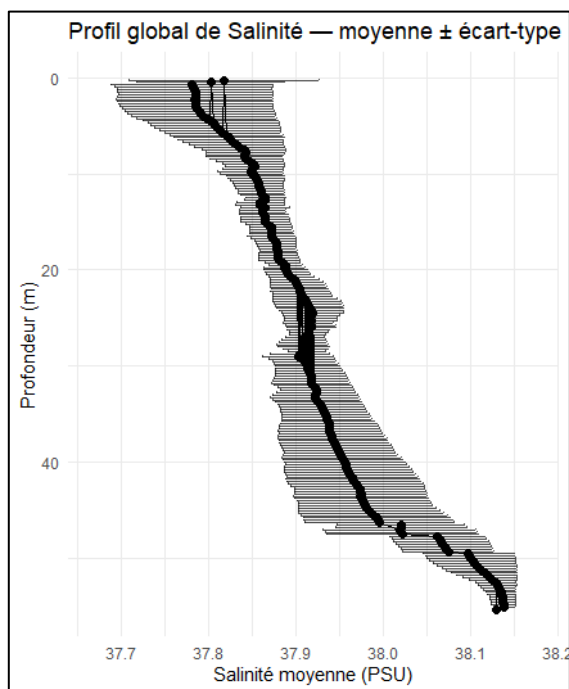


Figure 29. Profil global de salinité (moyenne $\pm$ écart-type).

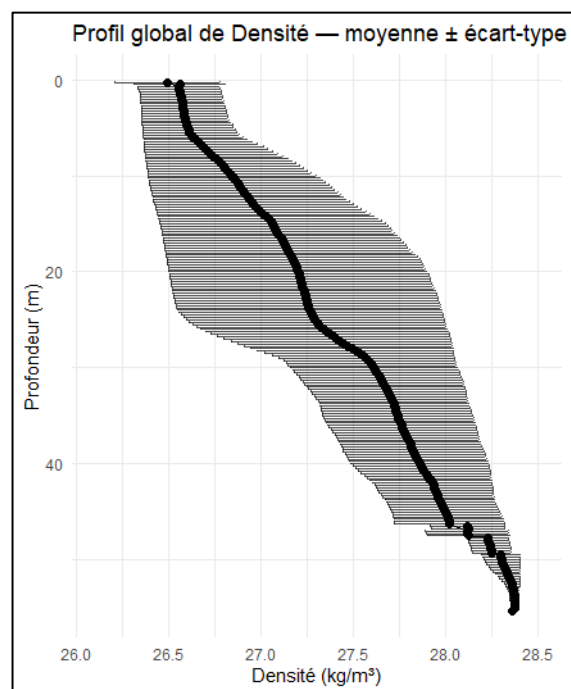


Figure 30. Profil global de densité (moyenne $\pm$ écart-type).

Les profils moyens de salinité et de densité, calculés sur l'ensemble des stations et des dates d'échantillonnage, mettent en évidence une structure verticale cohérente mais relativement peu contrastée. La salinité augmente progressivement avec la profondeur, traduisant un gradient halin typique des systèmes côtiers soumis à un mélange modéré. Toutefois, l'écart-type relativement important dans les 20 premiers mètres souligne une forte variabilité spatiale et temporelle de cette couche superficielle. Cette variabilité peut témoigner de l'influence conjointe des apports continentaux, de la variabilité météorologique sur la période d'échantillonnage et du brassage induit par les variations de vent documentées précédemment. L'absence de rupture nette dans le profil suggère néanmoins que cette variabilité ne s'organise pas en une stratification haline marquée, mais plutôt en fluctuations locales et transitoires.

Le profil moyen de densité suit une tendance similaire, avec une augmentation régulière de la surface vers le fond, mais sans zone de transition abrupte pouvant être assimilée à une pycnocline bien définie. L'élargissement des intervalles d'écart-type entre 10 et 40 m indique que cette portion de la colonne d'eau est la plus sensible aux variations entre stations et entre dates, ce qui reflète la diversité des conditions observées au cours des différentes sorties. Cette dispersion témoigne d'un système où la structure verticale est davantage contrôlée par une combinaison de processus turbulents et de forçages météorologiques que par une stratification stable et persistante.

Ainsi, l'ensemble des données de salinité et densité suggère que, durant la période d'échantillonnage, la colonne d'eau ne présentait pas une stratification haline ou pycnique bien installée. Le système apparaît plutôt dominé par des dynamiques de mélange variables, modulées par les conditions locales et les épisodes de vent, ce qui est cohérent avec les profils CTD individuels analysés en section 3.3.1.

4.1.3. Oxygène dissous

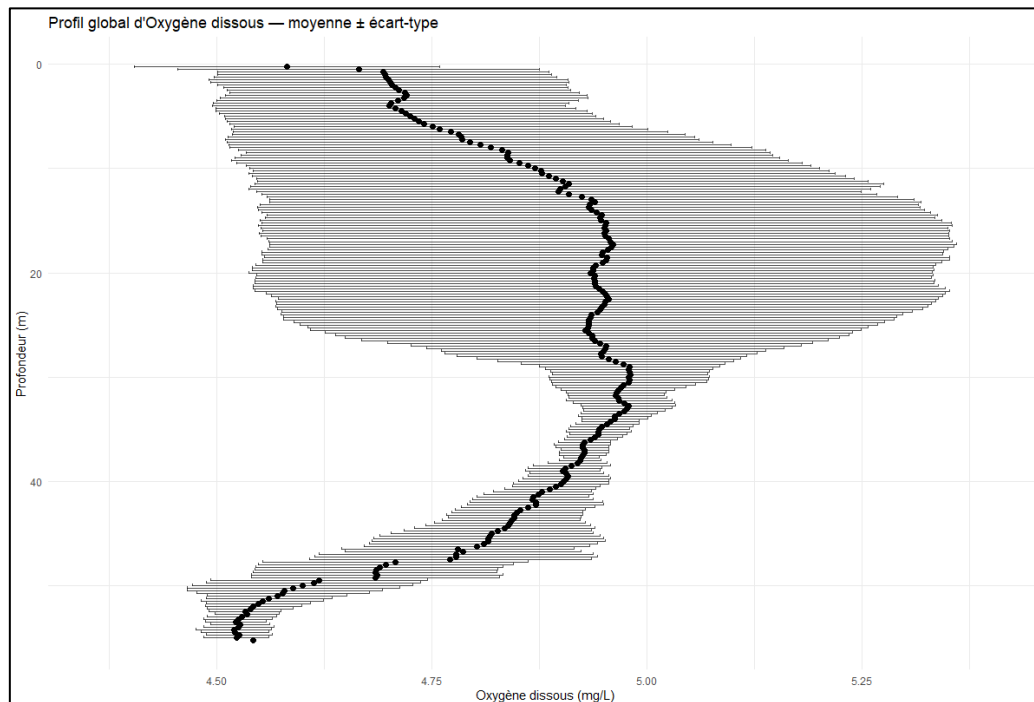


Figure 31. Profil global d'oxygène dissous (moyenne $\pm$ écart-type).

Le profil moyen d'oxygène dissous, obtenu à partir de l'ensemble des stations et des trois dates d'échantillonnage, met en évidence une structuration verticale caractéristique de la période d'étude. Les concentrations superficielles restent relativement homogènes, autour de 4,7 à 4,9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, avec une variabilité limitée dans les premiers mètres. Cette homogénéité en surface suggère que les conditions atmosphériques et le mélange induit par l'action du vent ont participé à maintenir un niveau d'oxygénation similaire parmi les stations.

Entre 10 et 30 m de profondeur, la moyenne indique une légère augmentation de la concentration en oxygène, tandis que l'écart-type s'élargit nettement. Cette zone correspond à un gradient vertical où les valeurs diffèrent davantage selon les stations, ce qui traduit des contrastes locaux dans les processus de production et de consommation d'oxygène, ou encore des différences dans la structure des masses d'eau. L'élargissement important de l'enveloppe moyenne $\pm$ écart-type à ces profondeurs

reflète donc une hétérogénéité spatiale significative plutôt qu'un phénomène strictement vertical.

En dessous de 30–35 m, les concentrations diminuent progressivement jusqu'à atteindre les valeurs les plus faibles à 55–60 m. La réduction de l'écart-type à ces profondeurs indique que les profils convergent, suggérant des conditions plus homogènes entre stations, probablement liées au caractère plus stable et isolé des eaux profondes à cette période. Cette baisse généralisée en profondeur est cohérente avec une diminution de la disponibilité en oxygène liée à la respiration et à la plus faible intensité du mélange vertical.

Ainsi, l'analyse du profil global montre une oxygénation globalement modérée, une variabilité intermédiaire marquée entre 10 et 30 m, et une diminution progressive vers le fond, traduisant l'influence conjointe du mélange physique, de la production biologique et des processus de consommation d'oxygène dans la colonne d'eau.

4.2. Chlorophylle a

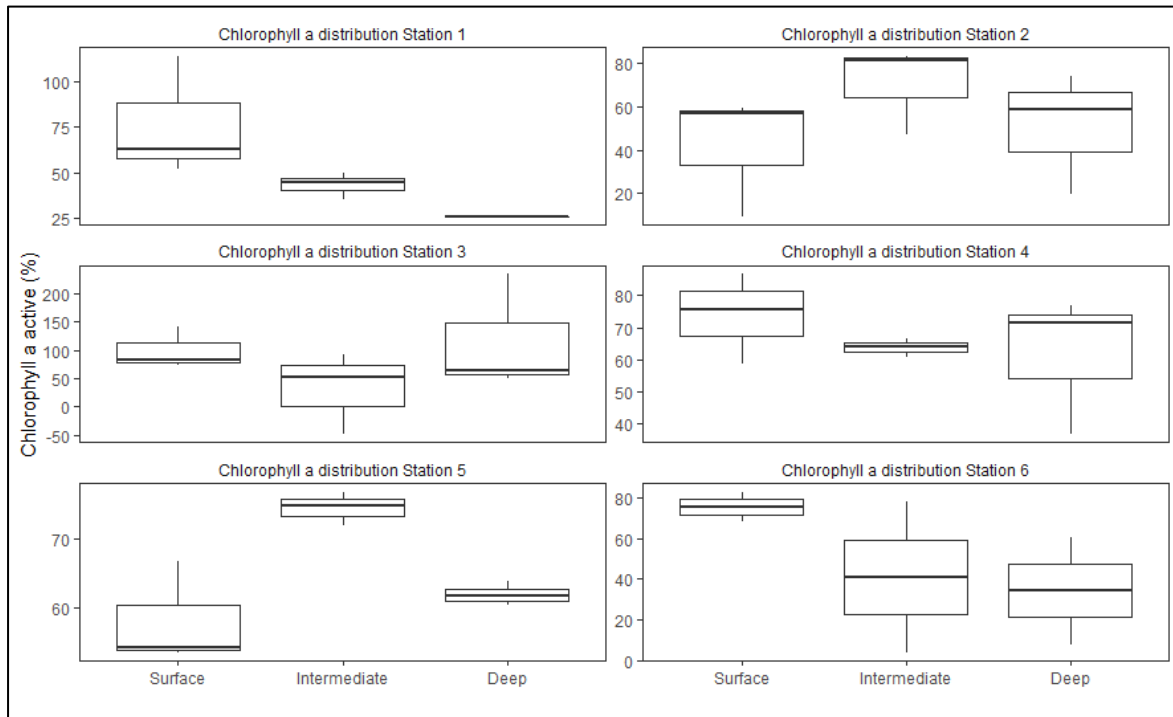


Figure 33. Distribution de la chlorophylle a active (%) aux trois profondeurs (surface, intermédiaire, profonde) pour les six stations. Les boxplots illustrent la variabilité verticale et spatiale de l'activité chlorophyllienne dans la colonne d'eau.

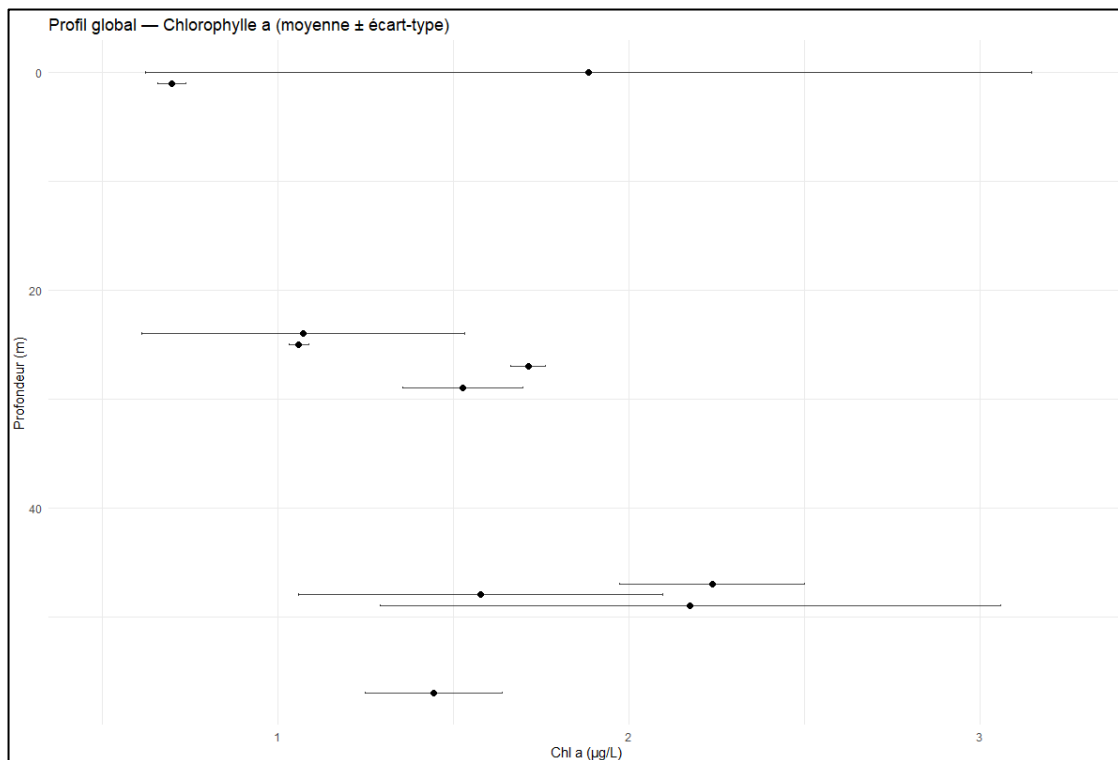


Figure 32. Profil vertical global de la chlorophylle a (moyenne $\pm$ écart-type) dans la colonne d'eau. Les points représentent les concentrations moyennes à différentes profondeurs et les barres horizontales illustrent la variabilité associée.

La distribution verticale de la chlorophylle a montre une variabilité importante entre stations, qui se traduit également dans le profil global moyenne $\pm$ écart-type. Dans l'ensemble, les valeurs observées indiquent une structure pigmentaire relativement hétérogène, reflétant des conditions locales contrastées en termes de lumière, de mélange et de productivité.

Les profils par station mettent en évidence plusieurs configurations. Certaines stations (notamment 1, 2 et 3) présentent des concentrations maximales en surface ou dans la couche intermédiaire, ce qui est cohérent avec une zone photique bien éclairée favorisant l'activité photosynthétique. En revanche, d'autres stations (4, 5 et 6) montrent des concentrations plus élevées en profondeur. Ce déplacement du maximum de chlorophylle vers le fond peut correspondre à un deep chlorophyll maximum (DCM) peu marqué, probablement lié à la combinaison d'une lumière encore suffisante et de conditions nutritives légèrement plus favorables qu'en surface.

Le profil global moyenne $\pm$ écart-type confirme cette hétérogénéité. Les concentrations restent modérées en surface, avec un écart-type relativement réduit, ce qui indique une faible variabilité entre stations dans la couche supérieure malgré leurs différences individuelles. En revanche, la variabilité augmente nettement entre 20 et 40 m, zone où plusieurs stations présentent un maximum profond. Cette dispersion des valeurs suggère que les processus contrôlant la distribution verticale (lumière, turbulences, structure thermique) diffèrent significativement d'une station à l'autre.

En profondeur, les concentrations diminuent légèrement mais l'écart-type reste élevé, signe que certaines stations conservent des valeurs notables tandis que d'autres affichent des teneurs très faibles. Cela traduit une colonne d'eau non uniforme, où certaines zones présentent encore une biomasse phytoplanctonique significative malgré un éclaircissement réduit.

Ainsi, l'ensemble des profils indique que la colonne d'eau ne suit pas un modèle simple avec un maximum strictement superficiel ou strictement profond. Au contraire, la distribution reflète un gradient spatial marqué et un fonctionnement localisé de la production primaire, possiblement influencé par des différences de brassage, d'apports côtiers ou de stabilité de la colonne d'eau. La variabilité inter-stations mise en évidence par les écarts-types souligne que la productivité n'est pas homogène à l'échelle du site d'étude, et que les processus physiques contrôlant la répartition du phytoplancton diffèrent selon les conditions locales.

4.3. Matière en suspension

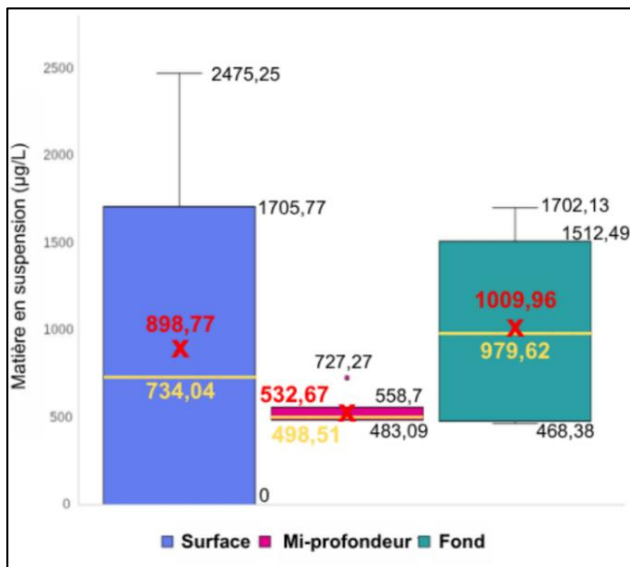


Figure 35. Boîtes à moustache de la concentration en matière en suspension par profondeur échantillonnée (surface, mi-profondeur et fond). La moyenne est marquée en rouge et la médiane est représentée par la barre orange

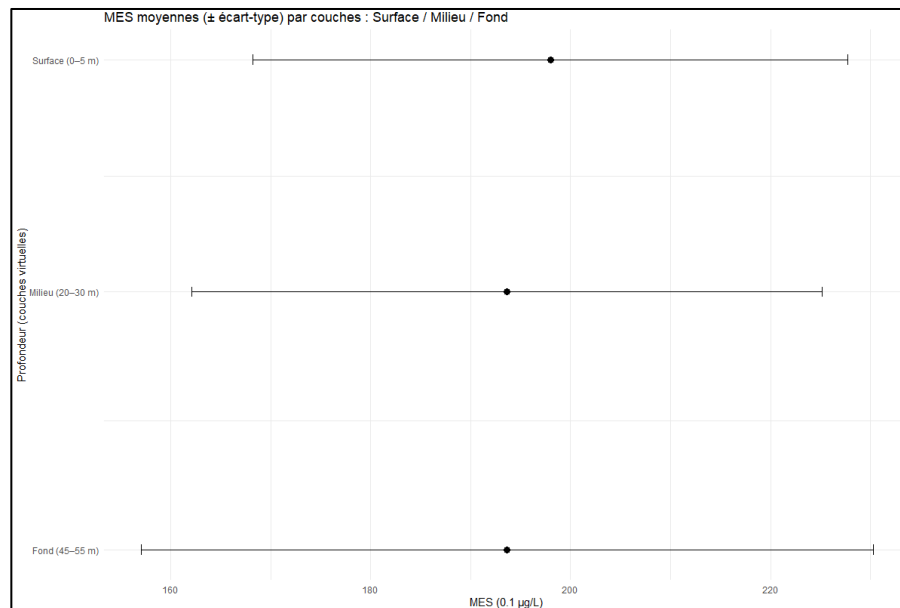


Figure 34. Profil vertical des matières en suspension (MES) moyennes $\pm$ écart-type dans les trois couches d'eau (surface, milieu, fond). Les points indiquent les concentrations moyennes et les barres horizontales illustrent la variabilité associée.

Les concentrations de MES montrent des différences nettes entre les couches de la colonne d'eau, avec des valeurs généralement plus élevées en profondeur que dans les couches superficielles. Le boxplot global révèle en effet que la couche profonde présente les moyennes les plus importantes, accompagnées d'une très large amplitude de valeurs. Cette variabilité suggère l'influence de processus localisés, tels que la remise en suspension de sédiments, plus fréquente près du fond, ou des apports particuliers provenant des zones côtières adjacentes.

À l'inverse, les couches de surface présentent des concentrations plus faibles et moins variables. Cette distribution est cohérente avec une zone superficielle dominée par des particules plus fines et plus dispersées, où le brassage dû au vent ou aux vagues contribue à maintenir une turbidité plus homogène. La couche intermédiaire montre quant à elle des valeurs intermédiaires et tend vers de faibles concentrations en MES. Ce qui reflète un compromis entre l'influence des apports particuliers de surface et les processus de sédimentation vers le fond.

L'analyse du profil global (moyenne $\pm$ écart-type) confirme ces observations. Bien que les valeurs moyennes restent relativement proches entre couches, les écarts-types importants en profondeur indiquent une forte hétérogénéité spatiale et temporelle. Ceci suggère que les conditions hydrodynamiques ne sont pas uniformes au sein de la rade : certaines stations peuvent être exposées à des phénomènes de remobilisation du

sédiment plus intenses que d'autres, créant des pics ponctuels de particules en suspension.

Dans l'ensemble, la distribution verticale de la MES met en évidence un système où la dynamique particulaire est largement contrôlée par les interactions entre hydrodynamisme, morphologie des fonds et proximité des sources littorales. La forte variabilité observée au fond souligne que les processus de remise en suspension jouent probablement un rôle majeur dans la structure verticale des particules en suspension au sein du site étudié.

4.4. Zooplancton

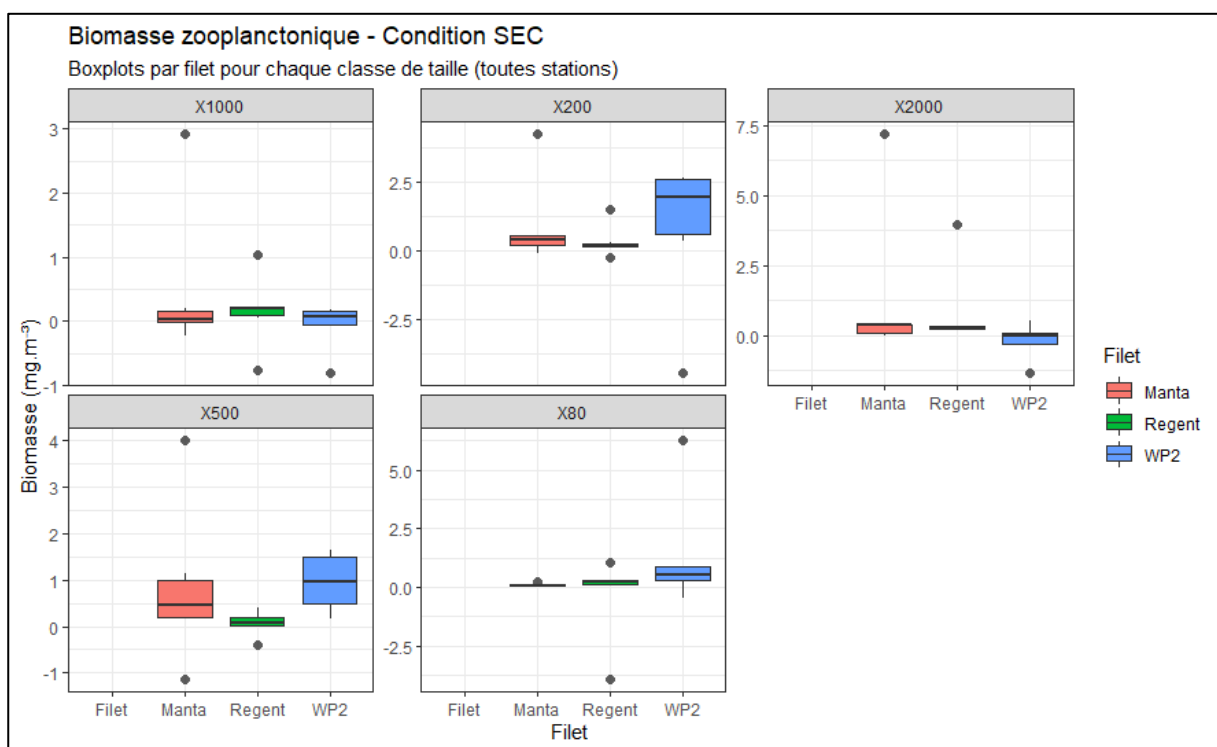


Figure 36. Biomasse zooplanctonique ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) par filet et par classe de taille en condition SEC. Les boxplots regroupent l'ensemble des stations et illustrent la variabilité de la biomasse capturée par les trois types de filets (Manta, Regent et WP2) selon chaque maille.

La biomasse zooplanctonique mesurée au moyen des trois filets (Manta, Regent et WP2) met en évidence une forte variabilité selon les classes de taille retenues (80 à 2000 μm) ainsi que des différences marquées entre les engins d'échantillonnage. Cette variabilité traduit avant tout la sélectivité propre à chaque filet, dont l'ouverture de maille conditionne l'efficacité de capture et la représentativité des organismes récoltés.

Pour les tailles intermédiaires (X200, X500 et X1000), les trois filets détectent globalement des biomasses faibles et relativement homogènes, bien que les valeurs récoltées par le filet WP2 soient régulièrement plus élevées. L'augmentation de biomasse obtenue avec WP2 dans ces classes s'explique par sa capacité à retenir un

large spectre d'organismes, y compris les plus petits, ce qui tend à accroître les valeurs mesurées dans les fractions les moins sélectives des deux autres filets.

Les différences deviennent plus nettes pour les classes extrêmes. Dans la fraction la plus fine (X80), les biomasses mesurées sont systématiquement plus élevées avec le filet WP2, confirmant son efficacité accrue pour capturer le microzooplancton et les particules biologiques de petite taille. À l'inverse, dans la fraction la plus grossière (X2000), seules quelques stations présentent des biomasses notables, et celles-ci sont majoritairement associées au filet Regent ou au WP2, tandis que le filet Manta montre des valeurs plus faibles. Cette distribution suggère que les organismes de grande taille (gélatineux, crustacés macroplanctoniques, larves avancées) ne sont que ponctuellement présents dans la colonne d'eau au moment de l'échantillonnage, ou bien qu'ils échappent en partie au filet Manta en raison de son mode de traction et de sa sélectivité.

La dominance ponctuelle de fortes biomasses sur certaines stations avec les classes X2000 et X500 témoigne probablement de la présence localisée d'agrégats zooplanctoniques ou de concentrations sporadiques d'organismes de grande taille, un phénomène cohérent avec la forte hétérogénéité spatiale couramment observée en milieu côtier. L'ensemble des résultats illustre donc à la fois la variabilité naturelle du zooplancton et l'importance des caractéristiques propres aux dispositifs d'échantillonnage dans l'interprétation des biomasses mesurées.

4.5. Lien entre biomasse planctonique et paramètres environnementaux

Pour déterminer l'existence de relations entre les variables biologiques et les paramètres environnementaux, deux types d'approches statistiques ont été utilisés. Pour la chlorophylle a, les relations avec la température, la salinité et la densité ont été examinées au moyen de modèles GAM (Generalized Additive Models). Un GAM est un outil permettant de décrire une relation même lorsqu'elle n'est pas linéaire. La courbe tracée représente ainsi la tendance moyenne reliant la chlorophylle a à un paramètre abiotique. L'ombre autour de la courbe correspond à l'intervalle de confiance à 95% : elle indique la zone où la tendance réelle a le plus de probabilité de se situer. Une zone d'ombre étroite reflète une relation stable, tandis qu'une zone large traduit davantage d'incertitude.

Pour les données de zooplancton, la variabilité et la nature hétérogène des prélèvements ne permettaient pas l'utilisation d'un GAM. Les relations entre la biomasse zooplanctonique et les paramètres abiotiques ont donc été évaluées à l'aide d'une régression linéaire simple ainsi que du test de corrélation de Spearman. La régression linéaire produit une droite qui résume la tendance générale : une pente positive indique que la biomasse augmente lorsque le paramètre étudié augmente, et inversement.

Le test de Spearman fournit deux indicateurs :

- **P** : compris entre -1 et +1, mesure l'intensité et le sens de la relation : +1 correspond à une relation positive parfaite, -1 à une relation négative parfaite, et 0 signifie absence d'association monotone.
- **La p-value** : comprise entre 0 et 1, indique si la relation observée peut être due au hasard. Une p-value faible (souvent $< 0,05$) suggère que la corrélation est statistiquement significative.

L'ensemble de ces outils permet ainsi d'évaluer si les variations biologiques observées suivent ou non les gradients environnementaux mesurés, qu'ils soient linéaires ou non linéaires.

4.5.1. Température

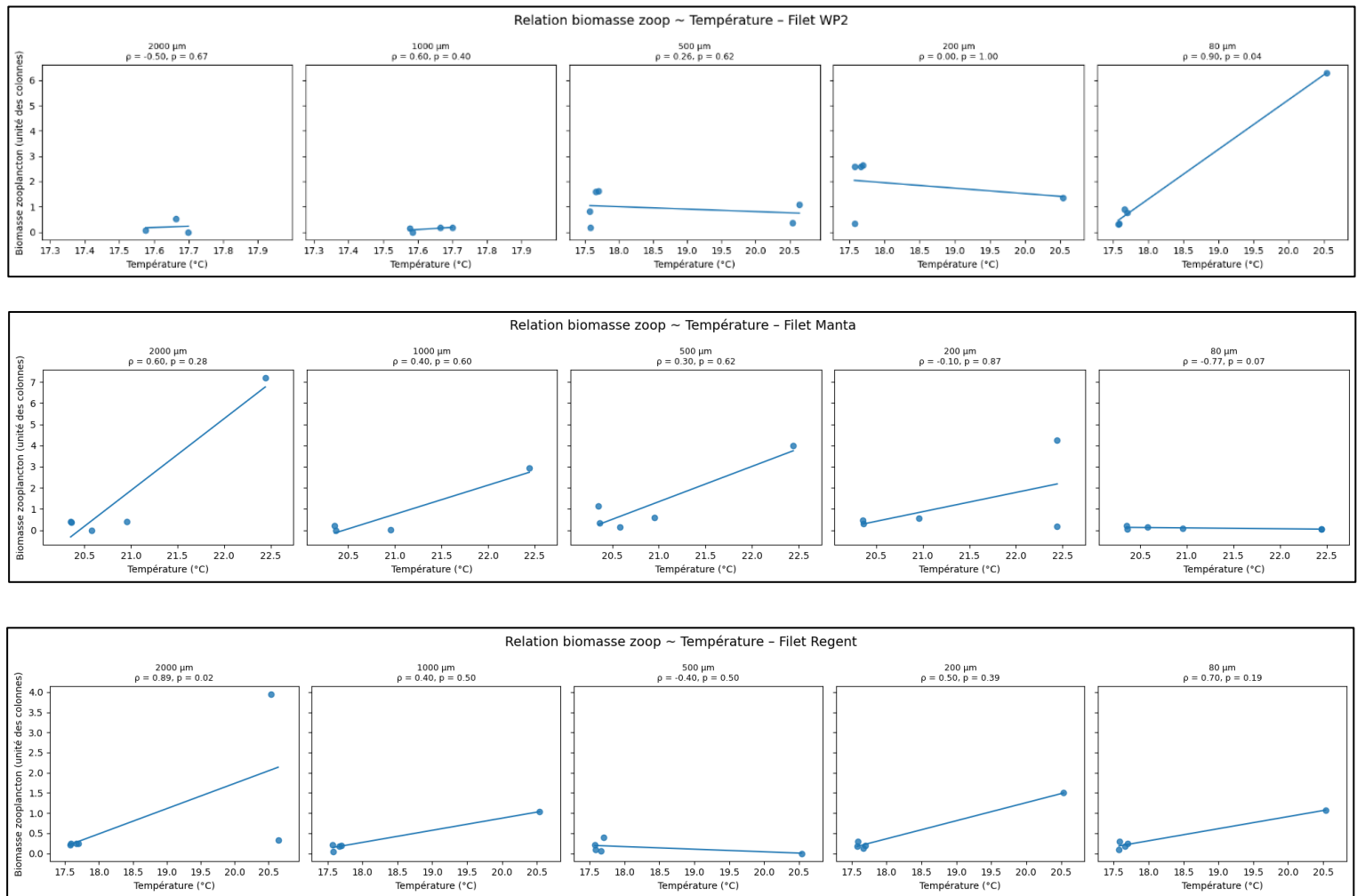


Figure 37. Relations entre la biomasse zooplanctonique et la salinité pour les trois types de filets (WP2, Manta et Regent). Pour chaque filet, la biomasse zooplanctonique est représentée pour cinq classes de tailles (2000, 1000, 500, 200 et 80 μm). Chaque sous-graphe montre les valeurs mesurées ainsi que la régression linéaire correspondante lorsqu'au moins trois points étaient disponibles. Les coefficients de corrélation de Spearman (ρ) et les valeurs de p associées sont indiqués en en-tête de chaque panneau afin d'évaluer la force et la significativité de la relation entre la température et la biomasse. Ces visualisations permettent de comparer la sensibilité apparente des différentes classes de taille et des différents filets aux variations de température.

Les relations entre la température et la biomasse zooplanctonique ont été explorées séparément pour les trois filets (WP2, Manta et Regent) et pour chacune des cinq classes de tailles. Globalement, les résultats indiquent l'absence de corrélations nettes et cohérentes entre ces deux variables pour la majorité des classes p et des filets.

Pour le filet WP2, aucune relation claire n'a été mise en évidence. Les coefficients de Spearman restent faibles ($|\rho| < 0.5$) et non significatifs ($p > 0.1$), quelle que soit la classe de taille, à l'exception de la maille 80 μm, qui montre un coefficient élevé ($\rho = 0.90$) mais difficile à interpréter car obtenu à partir d'un très faible nombre de points. Les droites de régression associées sont presque horizontales, confirmant l'absence de tendance visuelle forte.

Pour le filet Manta, quelques classes (notamment 2000 et 500 μm) montrent des tendances positives, avec une biomasse légèrement plus élevée à des températures plus chaudes. Cependant, ces relations restent modestes ($\rho = 0.60$ ou moins) et les p-values élevées ($p > 0.25$) indiquent qu'elles ne sont pas statistiquement significatives. L'ensemble des courbes suggère donc une variabilité importante entre stations plutôt qu'un effet thermique bien établi.

Pour le filet Regent, seules les plus grandes classes (2000 μm et 80 μm) présentent des coefficients élevés ($\rho = 0.89$ pour 2000 μm et $\rho = 0.70$ pour 80 μm), suggérant une corrélation positive entre température et biomasse. Toutefois, comme précédemment, ces résultats reposent sur un nombre très limité de mesures, ce qui limite leur fiabilité. Les autres classes (1000, 500, 200 μm) montrent des relations faibles ou incohérentes.

Dans l'ensemble, les analyses montrent une absence de corrélation robuste entre la température et la biomasse zooplanctonique, que ce soit par filet ou par classe de taille. Les quelques corrélations élevées observées restent isolées et ne s'accompagnent pas de valeurs statistiques significatives. Il est donc probable que la variabilité spatiale, le faible nombre d'échantillons par filet et la structure hétérogène des communautés expliquent davantage les différences observées que la température seule. Un échantillonnage plus conséquent serait nécessaire pour confirmer ou infirmer l'existence d'un effet thermique sur les différentes fractions du zooplancton.

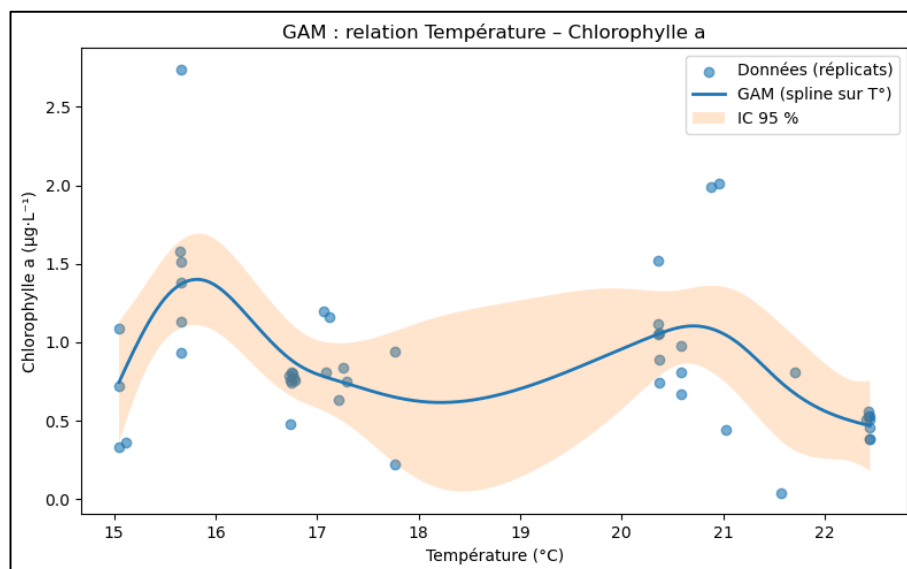


Figure 38. Relation entre la chlorophylle a et la température, obtenue à partir des répliqués de toutes les stations et profondeurs. La courbe représente l'ajustement GAM (spline sur la température) et l'enveloppe correspond à l'intervalle de confiance à 95 %. Les points individuels montrent la variabilité des concentrations mesurées.

Le modèle GAM (Generalized Additive Model) appliqué à l'ensemble des stations met en évidence une relation non linéaire entre la chlorophylle a et la température. La courbe

lissée suggère que la production phytoplanctonique ne varie pas de manière monotone avec la température, mais plutôt selon plusieurs zones de réponse distinctes.

Une première augmentation de la chlorophylle apparaît vers 15–16 °C, ce qui pourrait correspondre à des conditions thermiques favorables à la croissance de certaines populations phytoplanctoniques présentes dans la colonne d'eau. Au-delà de ce pic, la chlorophylle diminue progressivement lorsque la température atteint 17–18 °C, ce qui peut traduire soit une moindre disponibilité en nutriments (souvent associée à des eaux plus chaudes stabilisées), soit des pertes plus fortes (broutage, sédimentation).

Entre 19 et 21 °C, la courbe montre une tendance à la remontée, suggérant un éventuel second optimum thermique pour d'autres groupes phytoplanctoniques ou un relâchement temporaire de la contrainte trophique. Enfin, la chute observée au-delà de 22 °C pourrait refléter une diminution générale de l'activité photosynthétique ou une intensification de la stratification limitant les apports en nutriments.

L'intervalle de confiance (IC 95 %), représenté en beige, montre une incertitude variable le long du gradient thermique : l'élargissement de la zone d'incertitude entre 17 et 19 °C indique une plus forte variabilité des réponses, alors que des IC plus resserrés marquent des tendances plus cohérentes entre stations et profondeurs.

Dans l'ensemble, le GAM met donc en évidence une relation complexe et potentiellement multimodale entre la température et la chlorophylle a, révélatrice de l'influence simultanée de plusieurs facteurs (structure de la colonne d'eau, disponibilité en nutriments, composition spécifique du phytoplancton). Aucune tendance simple (linéaire ou monotone) ne peut être retenue, ce qui justifie pleinement l'emploi d'un modèle flexible comme le GAM pour ce type de données environnementales.

4.5.2. Salinité

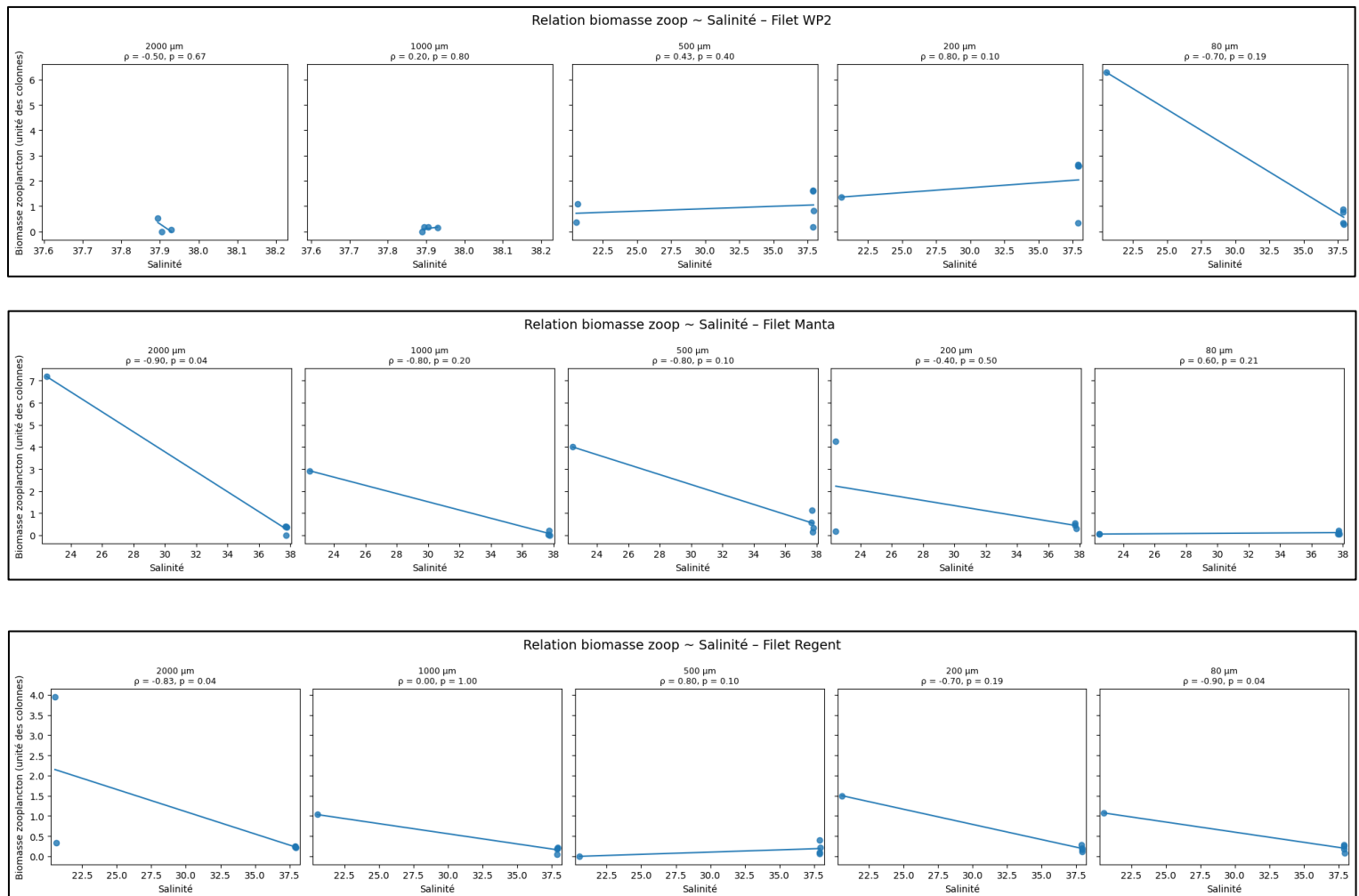


Figure 39. Relations entre la biomasse zooplanctonique et la salinité pour les trois types de filets (WP2, Manta et Regent). Pour chaque filet, la biomasse zooplanctonique est représentée pour cinq classes de tailles (2000, 1000, 500, 200 et 80 μm). Chaque sous-graphe montre les valeurs mesurées ainsi que la régression linéaire correspondante lorsqu'au moins trois points étaient disponibles. Les coefficients de corrélation de Spearman (ρ) et les valeurs de p associées sont indiqués en en-tête de chaque panneau afin d'évaluer la force et la significativité de la relation entre la salinité et la biomasse. Ces visualisations permettent de comparer la sensibilité apparente des différentes classes de taille et des différents filets aux variations de salinité.

Les résultats obtenus pour la relation entre la salinité et la biomasse zooplanctonique montrent, de manière générale, l'absence de corrélation nette, quelle que soit la classe de taille ou le type de filet utilisé. Les coefficients de corrélation de Spearman (ρ), calculés séparément pour chaque filet et chaque classe de maille, sont majoritairement proches de zéro et ne présentent pas de signification statistique ($p > 0,05$). Autrement dit, la variation de la salinité observée entre les stations ne semble pas structurer la biomasse zooplanctonique.

Quelques tendances apparaissent toutefois localement. Dans le filet Manta, la plus grande classe (2000 μm) présente un coefficient de corrélation fortement négatif ($\rho \approx -$

0,90) et significatif ($p \approx 0,04$), indiquant une diminution de la biomasse des grands organismes lorsque la salinité augmente. Une tendance comparable est visible pour les classes 2000 μm et 80 μm dans le filet Regent, également avec $p \approx -0,83$ à $-0,90$ et $p \approx 0,04$. Ces cas isolés doivent néanmoins être interprétés avec prudence, car ils reposent sur un nombre très limité de points ($n = 3$), ce qui augmente fortement la sensibilité aux valeurs extrêmes et réduit la robustesse statistique.

Pour les autres classes de tailles, ainsi que pour l'ensemble des mailles du filet WP2, aucune relation monotone n'apparaît. Les valeurs de p varient entre $-0,4$ et $+0,8$ selon les combinaisons filet-classe de taille, sans dépasser le seuil de significativité. Cette absence de tendance cohérente entre filets et mailles suggère que la salinité, dans la gamme observée, n'est probablement pas un facteur limitant ou structurant pour les organismes zooplanctoniques présents lors de l'échantillonnage.

D'un point de vue écologique, cela est cohérent avec un milieu côtier méditerranéen relativement homogène en salinité, où les fluctuations restent faibles ($\approx 37,7$ à $38,2$ PSU pour la majorité des stations). Ces variations restreintes ne sont pas de nature à induire des réponses physiologiques ou comportementales majeures chez le zooplancton, contrairement à d'autres environnements présentant des gradients plus marqués (estuaires, panaches fluviaux).

En résumé, aucune corrélation robuste n'a été mise en évidence entre salinité et biomasse zooplanctonique. Les rares corrélations négatives observées dans certaines classes de tailles semblent relever davantage de la variabilité locale ou d'un effet lié au faible nombre de données, plutôt que d'un mécanisme écologique généralisable.

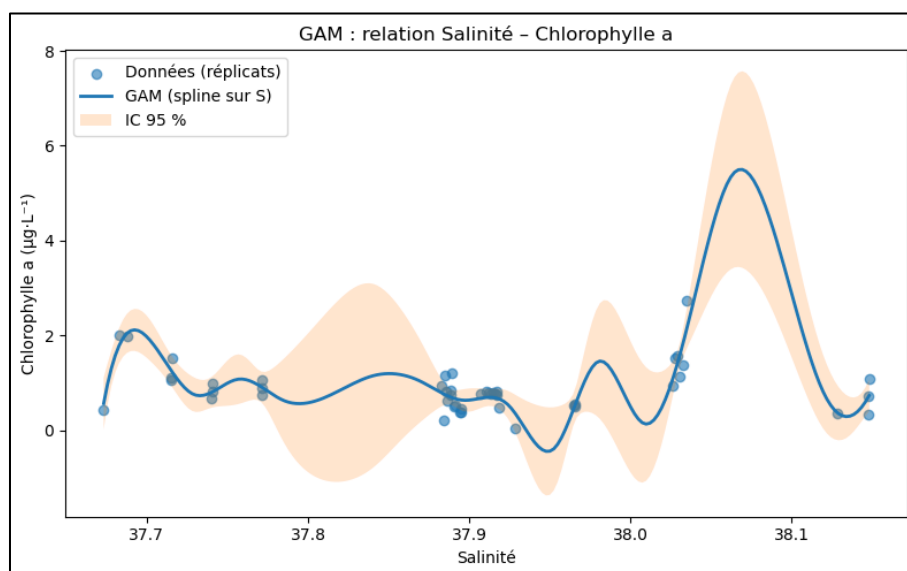


Figure 40. Relation entre la chlorophylle a et la salinité, obtenue à partir des répliqués de toutes les stations et profondeurs. La courbe représente l'ajustement GAM (spline sur la température) et l'enveloppe correspond à l'intervalle de confiance à 95 %. Les points individuels montrent la variabilité des concentrations mesurées.

Le modèle GAM montre que la relation entre la salinité et la concentration en chlorophylle *a* est non linéaire et présente plusieurs variations locales. À faible salinité (~37.65–37.75 PSU), la chlorophylle *a* tend à augmenter légèrement, suggérant des conditions favorables au phytoplancton dans cette gamme restreinte. Cette tendance positive est suivie d'une diminution progressive entre 37.75 et 37.90 PSU, où les valeurs modélisées restent relativement faibles.

Autour de 38.0 PSU, le modèle révèle une augmentation marquée de la chlorophylle *a*, culminant brièvement à des concentrations élevées. Cette hausse nette pourrait correspondre à un phénomène ponctuel (intrusion d'eau, mélange, ou apport de nutriments) plutôt qu'à une tendance générale, car elle est associée à un intervalle de confiance élargi, traduisant une forte incertitude et une variabilité importante des données à cette salinité.

Au-delà de 38.05 PSU, la chlorophylle *a* diminue à nouveau, indiquant que les salinités les plus élevées de la gamme échantillonnée ne semblent pas favorables à une forte biomasse phytoplanctonique.

Globalement, le GAM ne met pas en évidence une corrélation monotone (ni linéaire ni systématique) entre salinité et chlorophylle *a*. La relation apparaît faiblement structurée, dominée par des fluctuations locales avec des incertitudes parfois importantes. Cela suggère que la salinité, dans l'intervalle restreint étudié (37.6 à 38.2 PSU), n'est probablement pas un facteur déterminant du contrôle de la concentration en chlorophylle *a*, ou qu'elle agit en interaction avec d'autres variables environnementales (stratification, lumière, nutriments) non prises en compte ici.

4.5.3. Densité

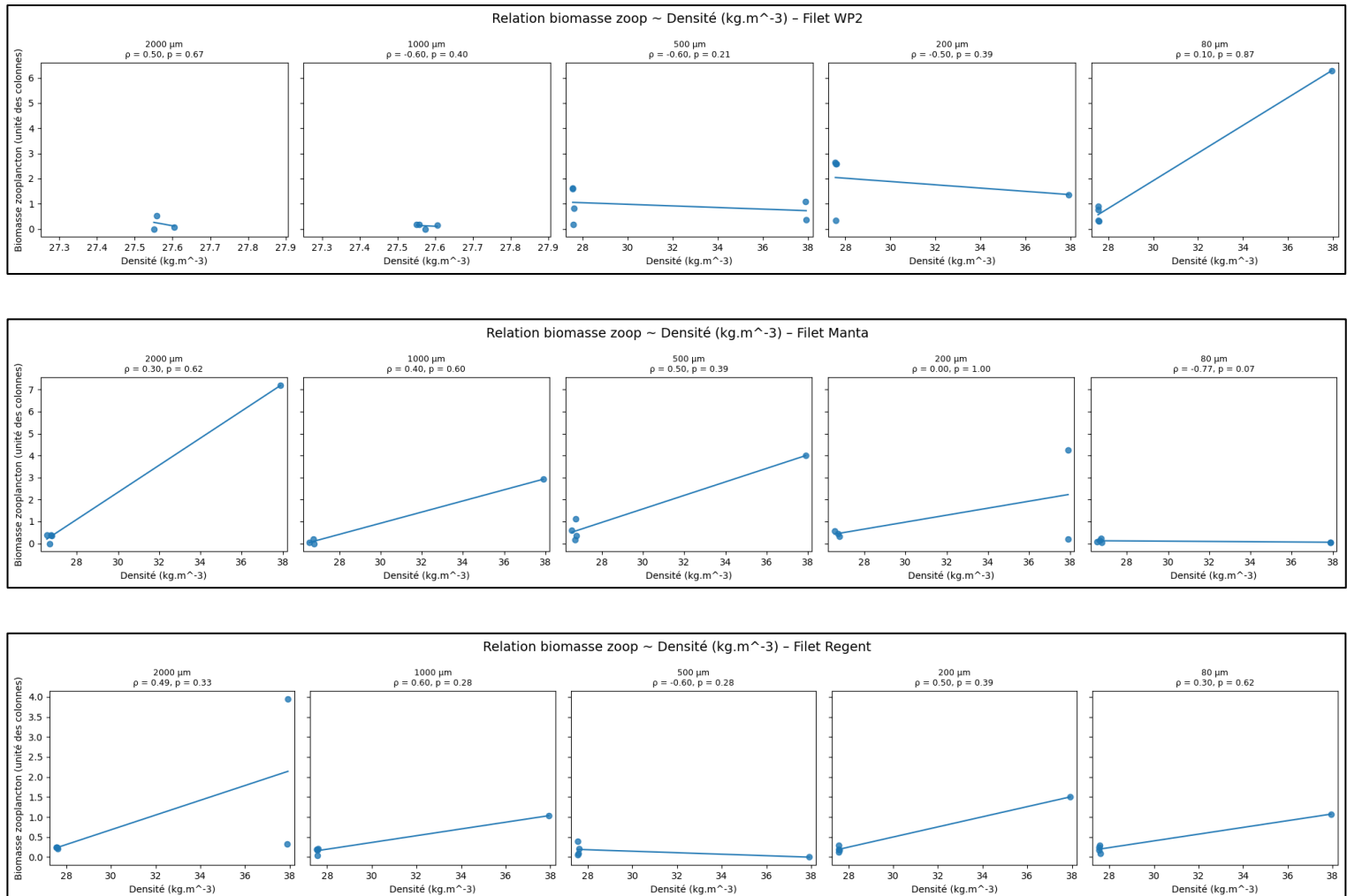


Figure 41. Relations entre la biomasse zooplanctonique et la salinité pour les trois types de filets (WP2, Manta et Regent). Pour chaque filet, la biomasse zooplanctonique est représentée pour cinq classes de tailles (2000, 1000, 500, 200 et 80 μm). Chaque sous-graphe montre les valeurs mesurées ainsi que la régression linéaire correspondante lorsqu'au moins trois points étaient disponibles. Les coefficients de corrélation de Spearman (ρ) et les valeurs de p associées sont indiqués en en-tête de chaque panneau afin d'évaluer la force et la significativité de la relation entre la densité et la biomasse. Ces visualisations permettent de comparer la sensibilité apparente des différentes classes de taille et des différents filets aux variations de densité.

L'analyse des relations entre la biomasse zooplanctonique et la densité de l'eau ne met en évidence aucune corrélation claire ou robuste, tous filets et classes de taille confondus. Les coefficients de corrélation de Spearman (ρ), calculés pour chaque filet et chaque classe granulométrique, présentent des valeurs très variables – tantôt positives, tantôt négatives – mais toujours associées à des p-values élevées (> 0,05 dans la grande majorité des cas). Autrement dit, les variations observées pourraient tout à fait résulter du hasard plutôt que d'un lien déterministe entre les deux paramètres.

Pour le filet WP2, aucune classe de taille ne montre de tendance cohérente : les p-values restent largement non significatives (p > 0,19). Certaines tailles présentent un ρ modérément positif ou négatif, mais les ensembles de points étant très réduits, la

puissance du test est insuffisante pour conclure. La relation apparaît donc totalement indéterminée.

Pour le filet Manta, les coefficients ρ sont globalement positifs mais faibles à modérés ($0 \leq \rho \leq 0,50$), et surtout associés à des p-values non significatives ($0,39 \leq p \leq 0,62$). Une seule taille montre une tendance négative plus marquée ($80 \mu\text{m}$), mais là encore sans support statistique. L'ensemble suggère que la densité ne constitue pas un facteur structurant pour la biomasse collectée par ce filet.

Pour le filet Regent, les résultats suivent la même logique : ρ varie entre $-0,60$ et $+0,60$ selon les classes, sans aucune significativité ($p \geq 0,28$). La variabilité inter-taille n'est pas cohérente, et aucune tendance monotone ne se dégage le long du gradient de densité.

Globalement, la densité de l'eau ne semble pas influencer directement la biomasse zooplanctonique dans les conditions de cette étude. Ce résultat peut s'expliquer par :

- La faible amplitude du gradient de densité observé dans la colonne d'eau (variations très faibles entre stades),
- La dominance de facteurs biologiques (disponibilité alimentaire, cycles de vie, migrations verticales) sur ce type d'organisation communautaire,
- La faible taille de l'échantillon pour chaque combinaison filet $\times$ classe, qui limite la détection de relations significatives.

Ainsi, contrairement à ce que l'on aurait pu attendre dans un système fortement stratifié, les variations de densité ne constituent pas un facteur clé de la distribution de biomasse zooplanctonique dans ce jeu de données.

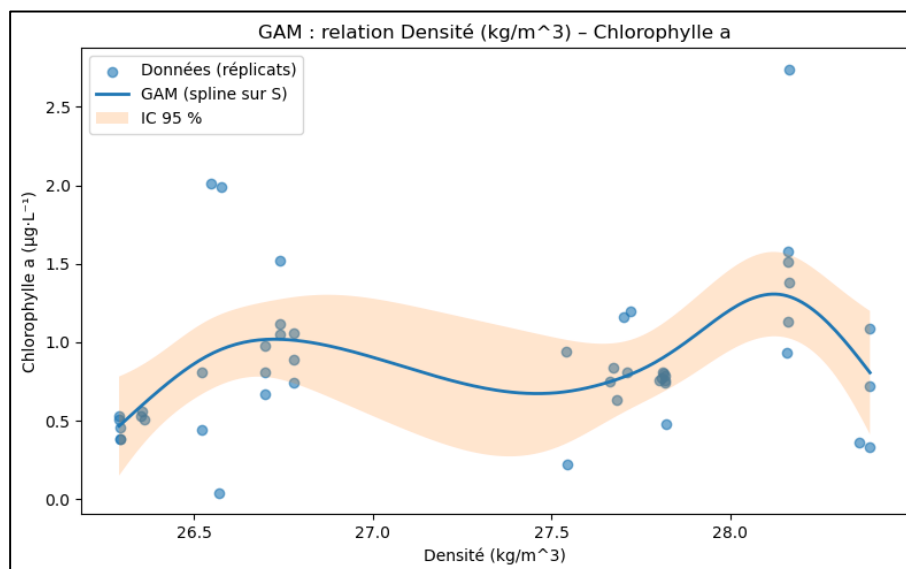


Figure 42. Relation entre la chlorophylle a et la densité, obtenue à partir des répliqués de toutes les stations et profondeurs. La courbe représente l'ajustement GAM (spline sur la température) et l'enveloppe correspond à l'intervalle de confiance à 95 %. Les points individuels montrent la variabilité des concentrations mesurées.

Le modèle GAM met en évidence une relation non linéaire entre la densité de l'eau (σ_t) et la concentration en chlorophylle a, indiquant que la réponse du phytoplancton ne suit pas une simple tendance croissante ou décroissante. La courbe lissée montre trois zones principales :

- 1) À faible densité ($\approx 26.4\text{--}26.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), la chlorophylle a augmente légèrement. Cette zone correspond généralement aux couches superficielles plus chaudes et moins denses, où la lumière est abondante et peut soutenir une activité photosynthétique plus forte.
- 2) Dans la zone intermédiaire ($\approx 26.8\text{--}27.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), le GAM montre une légère diminution des concentrations de chlorophylle a. Cela pourrait refléter une zone de transition où les conditions de lumière diminuent alors que les nutriments ne sont pas encore suffisamment abondants pour stimuler la production primaire.
- 3) À plus forte densité ($\approx 27.8\text{--}28.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), les concentrations de chlorophylle a augmentent de nouveau. Cette tendance est cohérente avec la présence d'une couche plus profonde enrichie en nutriments, alimentée par la reminéralisation ou les intrusions d'eaux plus froides et denses, favorisant localement un développement phytoplanctonique.

L'intervalle de confiance (IC 95 %) relativement large montre toutefois que l'incertitude associée à ces tendances est notable : les variations locales entre stations et profondeurs sont importantes, et la relation observée n'est pas fortement contrainte par les données. Cela signifie que la tendance générale doit être interprétée avec prudence. Néanmoins, le modèle suggère que la chlorophylle a répond à une combinaison de facteurs liés indirectement à la densité (température, stratification, disponibilité en nutriments) plutôt qu'à la densité elle-même.

En résumé, aucune corrélation simple n'est identifiée, mais le GAM révèle une réponse non linéaire du phytoplancton aux variations de densité, cohérente avec une structuration verticale influencée par la stratification et la distribution des nutriments dans la colonne d'eau.

4.5.4.Synthèse

Rôle des paramètres abiotiques sur la chlorophylle a

Les analyses basées sur les modèles additifs généralisés (GAM) révèlent que la chlorophylle a présente des relations non linéaires avec la température, la salinité et la densité. Ces courbes montrent surtout que les variations de Chl a ne suivent pas un gradient simple, mais plutôt une succession de zones d'augmentation ou de diminution, suggérant une réponse intégrée à plusieurs facteurs physico-chimiques. La température semble influencer la distribution de la Chl a, mais aucune tendance monotone ou corrélation clairement positive ou négative ne se dégage. De même, les GAM appliqués à la salinité et à la densité montrent des fluctuations de la réponse algale mais sans inflexion nette permettant d'identifier un seuil environnemental majeur. En résumé, la biomasse phytoplanctonique montre une structure fine et complexe, mais aucun paramètre isolé ne semble expliquer directement sa variabilité, ce qui suggère une régulation plurifactorielle incluant aussi des processus biologiques (mélange vertical, disponibilité en nutriments, interactions trophiques).

Rôle des paramètres abiotiques sur la biomasse zooplanctonique

Les relations entre la biomasse zooplanctonique et les variables environnementales (température, salinité et densité) ont été explorées au moyen de tests de corrélation (Spearman) et de régressions linéaires simples, appliqués séparément à chaque filet et à chaque classe de taille. Les résultats montrent un tableau très contrasté : les coefficients de corrélation (ρ) varient fortement selon les filets et les mailles, et la grande majorité des relations ne sont pas statistiquement significatives ($p > 0,05$). Lorsque des corrélations semblent apparaître (comme ponctuellement pour le Manta ou le Regent dans certaines classes), elles reposent souvent sur très peu de points et doivent être interprétées avec prudence. Globalement, aucun paramètre abiotique ne se distingue comme un déterminant clair de la biomasse zooplanctonique, que ce soit la température, la salinité ou la densité. La forte variabilité observée entre stations et filets suggère que la distribution du zooplancton est davantage influencée par des facteurs biologiques (production primaire locale, comportements migratoires, advection) que par des gradients environnementaux simples.

Conclusion générale : un contrôle environnemental faible ou non linéaire

Dans l'ensemble, la comparaison entre biomasses planctoniques et paramètres environnementaux met en évidence l'absence de corrélations linéaires simples pour les deux compartiments planctoniques.

- Pour la chlorophylle a, les GAM laissent entrevoir des réponses non linéaires, mais aucun des paramètres étudiés ne ressort comme potentiel indicateur environnemental.
- Pour le zooplancton, les corrélations montrent peu de relations robustes, indépendamment du filet ou de la classe de taille.

Ainsi, si des tendances locales existent, aucun paramètre abiotique ne semble exercer un contrôle dominant et direct sur la biomasse planctonique dans ce jeu de données. Cela suggère que la structure planctonique repose sur des dynamiques complexes, probablement gouvernées par l'intégration de multiples processus physiques (stratification, mélange, circulation) et biologiques (production primaire, interactions trophiques, migrations). Cette complexité rend peu probable l'identification d'un facteur environnemental unique expliquant la variabilité observée.

5. Conclusion

Les 6 campagnes d'échantillonnage réalisées dans la rade nord de Marseille ont permis de caractériser de manière intégrée la variabilité physico-chimique et biologique de ce milieu. L'analyse conjointe des paramètres environnementaux et des communautés planctoniques a mis en évidence une interconnexion qui unit aux propriétés hydrologique la dynamique du phytoplancton et la structuration du zooplancton. De plus, les observations effectuées aux cours de ces sorties s'inscrivent dans la continuité des tendances décrites dans les séries longues effectuées par SOMLIT (1994-2025) renforçant la robustesse de nos interprétations.

L'étude des différents paramètres hydrologiques révèle des variations marquées de la température, salinité et densité à travers la colonne d'eau. Ces variations reflètent les différents régimes de vents induisant une alternance entre des périodes de stratification stable et des périodes de mélange vertical. Les données météorologiques ont donc permis d'identifier des épisodes de vents forts susceptibles d'induire et/ou d'intensifier, dans des zones spécifiques, le brassage de surface, d'augmenter la turbidité, de modifier la profondeur de la couche de mélange et de la couche euphotique. Les profils d'oxygène dissous, quant à eux, ont permis d'interpréter l'influence des échanges mer-atmosphère, l'hydrodynamisme, ainsi que la production primaire des organismes photosynthétiques et de la respiration, confirmant le fonctionnement dynamique et spatialement contrasté de la colonne d'eau.

Les analyses portant sur la matière en suspension et la turbidité ont souligné le rôle déterminant des apports terrigènes, hydrologiques et biologiques dans la structuration des premiers mètres de la colonne d'eau. La chlorophylle a, utilisée comme indicateur de biomasse phytoplanctonique, a permis d'appréhender la répartition verticale et les

variations d'abondance du phytoplancton, en lien direct avec la disponibilité en lumière (PAR) et la stabilité hydrologique. L'ensemble de ces résultats met en évidence une forte sensibilité des processus photosynthétiques aux conditions physiques du milieu.

L'étude du zooplancton a montré que les communautés présentent une structuration verticale nette, en cohérence avec les gradients environnementaux observés. La quantification du biovolume et de la biomasse dessiquée a permis d'identifier une hétérogénéité notable entre les stations et entre les classes de taille, traduisant un contrôle étroit des communautés zooplanctoniques par les paramètres abiotiques et par la disponibilité en biomasse phytoplanctonique. En croisant ces observations avec les données environnementales, le rapport met en lumière l'existence de relations intrinsèques qui existent entre la dynamique planctonique et l'ensemble des déterminants physico-chimiques mesurés au cours de la campagne.

Bien que nos résultats soient cohérents avec les séries longues et avec les mécanismes connus du milieu, plusieurs limites inhérentes à notre façon d'échantillonner doivent être soulignées. Il y a certaines incertitudes liées aux étapes de pesée pour la matière en suspension ou pour certaines manipulations de filtration, ainsi que de la difficulté d'interpréter des phénomènes soumis à une forte variabilité atmosphérique et hydrodynamique avec seulement 6 périodes d'échantillonnages sur 2 stations différentes.

Pour conclure, les différents résultats obtenus démontrent ainsi que la variabilité du milieu marin ne peut pas être attribuée à un seul facteur environnemental. Elle résulte au contraire de l'action simultanée et interdépendante de multiples processus comme le forçage météorologique, les différents apports particuliers, l'hydrodynamisme local, les variations de stratification thermique et haline, ainsi que les réponses biologiques associées. L'analyse des résultats comparés des 6 stations montre que les variations physico-chimiques au sein de la colonne d'eau conditionne, de manière intégrée et non univoque, la distribution verticale de l'intensité de la production phytoplanctonique ainsi que la composition en biomasse de zooplancton.

En effet, les variations de température, salinité et densité entre les stations révèlent la variabilité du mélange vertical et de la stabilité hydrologique dans cette zone côtière. Cette variabilité influence directement la disponibilité en lumière et en nutriment dans le début de la colonne d'eau. À leur tour, cette disponibilité variable détermine la distribution de la *chlorophylle a* et les profils de PAR qui sont des indicateurs de la biomasse et de la productivité du phytoplancton. De même, les variations d'oxygène dissous et de turbidité, étroitement liées à l'hydrodynamisme et aux apports terrigènes ou biologiques, modulent les conditions écologiques auxquelles les communautés planctoniques sont exposées. L'ensemble de ces gradients physiques se reflète ensuite dans la structuration verticale et quantitative du zooplancton, dont les biovolumes et

biomasses mesurés montrent une forte hétérogénéité entre classes de taille et entre stations, en cohérence avec les conditions locales observées.

Ainsi, dû à la complexité des interactions étudiées, il est fortement peu probable qu'un unique facteur environnemental explique la variabilité observée. L'ensemble de nos résultats établissent clairement l'existence de corrélations fonctionnelles entre les différents paramètres physico-chimiques et la composition du phyto- et zooplancton. Les stations plus stratifiées ou plus éclairées montrent des signatures phytoplanctoniques distinctes de celles affectées par des épisodes de brassage et de turbidité accrue du aux forçage des vents les jours précédents. Les communautés zooplanctoniques réagissent aussi de manière cohérente à ces variations de stabilité de la colonne d'eau et de production primaire.

Ces résultats témoignent que l'organisation trophique du plancton dans la rade Nord de Marseille découle directement d'un couplage complexe entre les différents paramètres physico-chimiques et la dynamique hydrologique.

Pour finir, nos résultats affirment que la compréhension des variations spatiales des communautés planctoniques nécessite une approche holistique intégrant simultanément les processus physiques, chimiques et biologiques, seule capable de rendre compte de la structuration fine des écosystèmes côtiers.

6. Bibliographie

BATTISTI, K. (2012). Analyse des caractéristiques physico-chimiques et phytoplanctoniques des eaux du golfe du Lion durant la campagne LATEX2010. Approche lagrangienne.

DOGLIOLI, A. (2013). Bouvier_rapportOPB205.pdf.

Pinazo, C. *et al.* MASSILIA: Modélisation de la baie de MARSeILLE : Influence des apports Anthropiques de la métropole sur l'écosystème marin.
<https://archimer.ifremer.fr/doc/00145/25592/> (2013).

Gatti, Julie, et Anne Petrenko. « Intrusions du courant Nord méditerranéen sur la partie Est du plateau continental du Golfe du Lion ». Atelier national de reproduction des thèses, (2012).

Conan, P. (1996). Variabilité et bilan de la production primaire en zone cotière (Méditerranée Nord occidentale; entrée du golfe du Lion) en relation avec les systèmes biologique, chimique et hydrodynamique (Courant Nord Méditerranéen) (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 2).

OASU. Marseille | Somlit. <https://www.somlit.fr/marseille/> (2018).

Jacob, E. *et al.* Identification et suivi spatio-temporel des espèces planctoniques du Golfe du Lion: Rapport final de l'action 4 du Projet GOLDYS.
<https://doi.org/10.13155/96520> (2023) doi:[10.13155/96520](https://doi.org/10.13155/96520).

Collina-Girard, J. COLLINA-GIRARD, J (1995).-Bassin de Marseille, carte au 1/50 000° du plateau continental, Institut Géographique National, Aix en Provence.

Insu CNRS. <https://www.dt.insu.cnrs.fr/moyens-nationaux/flotte-de-station-du-cnrs/antedon-ii/>

Météo France. <https://meteofrance.com/climat/relevés/france/provence-alpes-cote-d-azur/marignane>.

Windguru forecast maps.
<https://www.windguru.cz/map/?lat=43.23007083039087&lon=5.307946679943825&zoom=10.66561990522099>.

Garcia, T., Bănar, D., Guilloux, L., Berline, L. & Carlotti, F. Temporal dynamics of copepod taxa and trophic groups in a long-term time series in the NW-Mediterranean Sea. *Journal of Plankton Research* **47**, fbae076 (2025).

Carlotti, F. & Guilloux, L. Marseille bay Copepod Time series Dataset (2006-2020). SEANOE <https://doi.org/10.17882/106872> (2025).

Garcia, T. *et al.* Temporal changes in zooplankton indicators highlight a bottom-up process in the Bay of Marseille (NW Mediterranean Sea). *PLOS ONE* **18**, e0292536 (2023).