



État initial des communautés benthiques du port des Flamands (Rade de Cherbourg). Projet SALMOCOT III

Noémie Baux, Emmanuel Poizot, Anne Murat, Matéo Tougne, Yann Méar

► To cite this version:

Noémie Baux, Emmanuel Poizot, Anne Murat, Matéo Tougne, Yann Méar. État initial des communautés benthiques du port des Flamands (Rade de Cherbourg). Projet SALMOCOT III. Cnam-Intechmer / LUSAC. 2024, pp.52. hal-04806501

HAL Id: hal-04806501

<https://hal.science/hal-04806501v1>

Submitted on 27 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



LABORATOIRE UNIVERSITAIRE
DES SCIENCES APPLIQUÉES
DE CHERBOURG

le cnam
intechmer

État initial des communautés benthiques du port des Flamands (rade de Cherbourg)

Projet SALMOCOT III (Saumons de France)

Rédigé par :

Baux N., Poizot E., Murat A. Tougne M. et Méar Y.

Octobre 2024



yann.mear@lecnam.net



©M. TOUGNE

Table des matières

I. INTRODUCTION	7
II. METHODOLOGIES DES ECHANTILLONS DU PORT DES FLAMANDS	9
II.1. PRELEVEMENTS	9
II.2. ANALYSES DE LABORATOIRE	10
II.2.1. GRANULOMETRIE	10
II.2.2. GEOCHIMIE ELEMENTAIRE	10
II.2.3. FAUNE BENTHIQUE	11
II.3. TRAITEMENT DES DONNEES	11
II.3.1. INTRODUCTION	11
II.3.2. ANALYSES MULTIVARIEES	12
II.3.3. ANALYSES DE LA COMPOSITION FAUNISTIQUE	13
III. COMPARAISON DES DONNEES AVEC CELLES DE LA GRANDE RADE	17
III.1.1. METHODOLOGIE DE PRELEVEMENTS DANS LA RADE. ETUDE PUBLIEE EN 2017	17
III.1.2. METHODOLOGIE DE PRELEVEMENTS DANS LA RADE. ETUDE MENEES EN 2019-2020 (APRES TRAVAUX)	17
IV. RESULTATS	18
IV.1. SEDIMENTOLOGIE	18
IV.2. MACROFAUNE BENTHIQUE	22
IV.2.1. COMPOSITION FAUNISTIQUE	22
IV.2.2. ANALYSES DE DIVERSITE	25
IV.2.3. ANALYSES MULTIVARIEES	25
IV.2.3. ETAT ECOLOGIQUE	27
IV.2. COMPARAISON AVEC LA GRANDE RADE	29
IV.2.1. FACIES SEDIMENTAIRES	29
IV.2.1. MACROFAUNE BENTHIQUE	30
V. DISCUSSION	36
V.1. LE PORT DES FLAMANDS : ZONE RICHE ET ANTHROPISEE	36
V.2. POSITIONNEMENT DU PORT DES FLAMANDS AU SEIN DE LA GRANDE RADE	38
V.3. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS POUR UNE FUTURE GESTION	39
VI. ANNEXES	41
VI.1. PHOTOGRAPHIES DES BENNES	41

VI.2. LISTE D’ESPECES ET ABONDANCES ASSOCIEES	44
VI.2. TRANSFORMATION DES DONNEES	45
<u>VII. BIBLIOGRAPHIE CITEE DANS LE RAPPORT</u>	<u>49</u>

Liste des figures

Figure 1 : Localisation des 3 stations de prélèvement, notées PF1 à PF3, dans le port des Flamands. ____	9
Figure 2 : Positionnement des points de prélèvements pour la campagne réalisée le 19 octobre 2020 (Baux et al., 2022). Superposition de la bathymétrie obtenue en 2018 (Méar et al., 2020). _____	18
Figure 3 : Distributions granulométriques des sédiments (stations PF1, PF2 et PF3 et répliqués A (vert), B (bleu) et C (rouge). _____	20
Figure 4 : Pourcentage de carbone organique total en fonction des distributions granulométriques. ____	21
Figure 5 : ACP permettant la représentation des variables les plus caractéristiques par rapport aux stations échantillonnées (novembre 2023). Avec Sr : strontium, Ca : calcium, Br : brome, COT : carbone organique total et Si : silicium. _____	22
Figure 6 : Proportions des phylums présents à chaque stations et tableau des valeurs associées en ind.0,2 m ⁻² . Autres : regroupement des sipuncula, echinodermata, cnidaria, nematoda et Phoronidae. Autres Malacostraca : regroupement des cumacea, Decapoda, Isopoda, Leptrostraca et Lophogastrida (novembre 2023). _____	24
Figure 7 : Résultat de la CAH réalisée sur les données d'abondances des trois stations PF1, PF2 et PF3, standardisées en racine carré, en utilisant une matrice de dissimilarité de Bray-Curtis et la méthode des groupes moyens. Données de novembre 2023. _____	26
Figure 8 : Résultat de la nMDS réalisée sur les données d'abondances des trois stations PF1, PF2 et PF3, standardisées en racine carré. Données de novembre 2023. _____	26
Figure 9 : Résultats de l'AMBI avec la classification de l'état écologique (Borja et al. (2000) et Borja et al. (2004) et le pourcentage des groupes écologiques observés dans les trois stations du port des Flamands. _____	28
Figure 10 : Carte synthétique de la couverture sédimentaire en rade de Cherbourg après travaux (Baux et al., 2021). _____	30
Figure 11 : Résultat de la CAH réalisée sur les données d'abondances des stations de la Grande Rade de Cherbourg avant et après travaux et dans le port des Flamands, standardisées avec la transformation de Hellinger, en utilisant une matrice de dissimilarité de Bray-Curtis et la méthode des groupes moyens. Six groupes sont formés visuellement. _____	34
Figure 12 : Cartographie des habitats marins EUNIS de la Grande Rade de Cherbourg, avant travaux (stations échantillonnées entre 2012 et 2015 ; issu de Baux et al., 2017). _____	36

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification de la pollution à partir de la valeur de H', dans les habitats sableux-vaseux (Vincent et al., 2002).	14
Tableau 2 : Groupes écologiques représentant le niveau de sensibilités des espèces utilisées comme indicateurs écologiques pour le calcul de l'indice écologique de l'AMBI, du M-AMBI et du BO2A.	15
Tableau 3 : Valeurs de l'AMBI et équivalences avec les différents états écologiques. D'après Borja et al. (2000) et Borja et al. (2004).	15
Tableau 4 : Valeurs du BO2A et équivalences avec les différents états écologiques ; d'après De-la Ossa-Carretero et Dauvin (2010) modifié de Dauvin (2018).	16
Tableau 5 : Résultats de l'analyse par fluorescence X. NA pour non dosable (en dessous de la limite de détection ; en bleu les valeurs maximale).	21
Tableau 6 : Richesse taxonomique, abondances et écart-types associés (SD), pour les trois stations échantillonnées en novembre 2023 dans port des Flamands.	23
Tableau 7 : Liste et abondances (ind.m ⁻²) des dix espèces majoritaires recensées pour chaque station.	24
Tableau 8 : Richesse taxonomique, indice de Shannon-Wiener (H'), valeurs maximums de Shannon-Wiener (H' max) et indice d'équitabilité de Pielou (J') des trois stations échantillonnées dans le port des Flamands. Novembre 2023. Couleurs correspondantes à la classification de la pollution (d'après Vincent et al., 2002 ; Tableau 1).	25
Tableau 9 : Résultats du calcul du M-AMBI sur les trois stations échantillonnées dans le port des Flamands en novembre 2023.	28
Tableau 10 : Résultats du Bo2A sur les trois stations échantillonnées dans le port des Flamands en novembre 2023. Classification de l'état écologique d'après Dauvin et al., 2018.	29
Tableau 11 : Comparaison des abondances (ind.m ⁻²) et de la richesse taxonomique (S) observées dans les échantillons de la Grande Rade avant et après travaux. Tableau à comparer avec les valeurs du Tableau 6.	31
Tableau 12 : Moyennes des abondances (ind.m ⁻²) des 10 espèces majoritaires à l'échelle de la rade (toutes stations confondues avant et après travaux).	32
Tableau 13 : Résultats des calculs de l'indice de Shannon-Wiener (H'), de l'AMBI et du BO2A, avant et après les travaux d'extension portuaires, dans la Grande Rade de Cherbourg.	33
Tableau 14 : Espèces contributrices à plus de 90 % en fonction de chaque groupe formé par la CAH.	35

Liste des annexes

Annexe 1 : Photographies des trois échantillons en PF1, prises à bord du navire. Prélèvement à la benne VanVeen 0,1m ² . _____	41
Annexe 2 : Photographies des trois échantillons en PF2, prises à bord du navire. Prélèvement à la benne VanVeen 0,1m ² . _____	42
Annexe 3 : Photographies des trois échantillons en PF3, prises à bord du navire. Prélèvement à la benne VanVeen 0,1m ² . _____	43
Annexe 4 : Liste des espèces et abondances associées pour les trois stations échantillonnées dans le port des Flamands en novembre 2023 _____	44
Annexe 5 : Comparaison des trois transformations de données pour les analyses multivariées (CAH et nMDS) sur les données d'abondances de macrofaune benthique dans le port des Flamands. En abscisses, l'ensemble des espèces de macrofaune identifiées dans les trois. _____	46
Annexe 6 : Comparaison des trois transformations de données pour les analyses multivariées (CAH et nMDS) sur les données d'abondances de macrofaune benthique issues du fichier de comparaison de la rade et du port des Flamands. En abscisses, l'ensemble des espèce. _____	47

Remerciements

Nous remercions l'entreprise Saumon de France pour le prêt de leur bateau et la mise à disposition de l'équipage, pour les prélèvements dans le port des Flamands. Nous les remercions également pour le partage des informations relatives au futur élevage de smolts à terre et de saumons en mer.

Merci aussi à tous les techniciens et stagiaires, notamment Matéo TOUGNE, ayant contribué à l'acquisition des données au laboratoire.

L'université de Caen-Normandie, et en particulier Adeline Ozenne, est également remerciée pour la gestion administrative du projet SALMOCOT III.

I. Introduction

Depuis 1985, la rade de Cherbourg fait l'objet de suivis environnementaux qui intègrent aussi bien la masse d'eau que le biota et les sédiments marins. Ces suivis sont intégrés dans le cadre du programme CHERAD, programme de monitoring de la rade. Les résultats obtenus ont fait l'objet de rapports techniques, de rapport de stage, de communications à des congrès et a des publications internationales (liste ci-après). L'étroite collaboration mise en place entre notre équipe de recherche et les responsables d'un élevage de salmonidés dans la rade a amené à mettre en place une série d'actions plus spécifiques rassemblées dans le projet SALMOCOT.

Dans ce cadre, le Cnam/Intechmer intervient plus spécifiquement autour de la mise en place d'un élevage de salmonidés (*Salmo salar*) dans la rade : de la recherche du meilleur site d'implantation, au suivi environnemental en passant par l'étude préalable à l'implantation et à la recherche de solutions pour optimiser la qualité et la quantité de poissons élevés dans les différentes cages (atteinte par les amibes, travaux de dragage et de déroctage). Salmocot III a été mis en place dès 2023 à l'occasion d'une restructuration de l'élevage de saumons.

La société « Saumons de France » (GMG Sas) qui appartient au groupe AMP (Aquaponic Management Project) souhaite installer un élevage de smolts à terre au niveau du port des Flamands et placer ensuite des individus plus robustes dans les cages situées dans la grande rade pour favoriser leur grossissement. Salmocot III est organisé autour de trois actions :

- (1) Une analyse numérique des courants (modélisation) qui a pour objectif de proposer à l'éleveur les meilleurs moments pour relarguer les eaux des bassins d'élevage dans le port des flamands afin de minimiser leur temps de résidence dans le port et d'être le plus possible diluées dans les eaux de la grande rade. Cette première étape a fait l'objet d'un premier rapport transmis à Saumons de France en octobre 2023 (Poizot E. et Méar Y., 2023).
 - (2) Une analyse des communautés benthiques du port des Flamands à partir de la combinaison d'une analyse de la nature et de la qualité des sédiments (granulométrie, géochimie organique et minérale) et de la faune.
 - (3) Une analyse du même type sera conduite, dans un second temps, sous les cages situées en grande rade afin de réaliser un état zéro avant la remise en eau d'une nouvelle population de poissons.
- *Intérêt de l'étude de la macrofaune benthique dans le Port des Flamands et historique des études menées dans la rade*

Les organismes benthiques (organismes vivants en liaison étroite avec le fond), jouent un rôle important dans l'écosystème marin. Consommateurs primaires ou secondaires de types détritivores, filtreurs, nécrophages, prédateurs... mais aussi proies de nombreux organismes marins, ils constituent un maillon important de la chaîne trophique. Leur rôle économique est également, dans le cas de certaines espèces, non

négligeable (pêcheries). Les organismes benthiques ayant une répartition inféodée au type d'habitat (défini par le substrat, l'hydrodynamisme, la salinité ou encore la température), sont également d'excellents indicateurs biologiques (Dauvin, 1993). Leur positionnement « clé » au sein de l'écosystème marin, ainsi que leur sensibilité écologique, justifient de comprendre au mieux le fonctionnement des communautés qu'ils constituent.

La rade de Cherbourg constitue un lieu d'étude intéressant puisque c'est à la fois une zone protégée de la houle, grâce à des digues qui définissent ses contours, mais également une zone à fort hydrodynamisme qui permet le mélange des masses d'eau, la remise en suspension importante des particules et l'apport potentiel de larves de faune benthique via les courants entrants. C'est également le seul lieu, en France, à accueillir une ferme marine d'élevage de salmonidés en mer.

Peu d'études, centrées sur la macrofaune benthique, ont été menées dans la rade de Cherbourg. Une seule étude, publiée dans une revue scientifique, est identifiée à ce jour (Baux et al., 2017). Celle-ci regroupe trois campagnes de prélèvements menées distinctement :

- (1) d'une part, par le bureau d'étude TBM-environnement à la demande du port de Cherbourg (TBM Environnement, 2012), focalisée sur le recensement de la macrofaune benthique à l'est de la grande rade avant le début des travaux d'extension des terres pleins portuaires (prélèvements effectués en mars 2012 sur 15 stations) ;
- (2) d'autre part, par le laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) de Caen en lien avec le CNAM-Intechmer de Cherbourg, réalisée dans le but de décrire la macrofaune benthique à proximité des cage aquacole et d'en déterminer l'impact sur l'écosystème benthique (prélèvements réalisés en février 2014 sur six stations) ;
- (3) enfin, par le laboratoire M2C de Caen, toujours en lien avec le CNAM-Intechmer de Cherbourg, dans le but de décrire les habitats benthiques (c'est-à-dire, l'analyse des communautés benthiques en relation avec le substrat) à l'échelle de la grande rade (neuf stations échantillonnées en février 2015).

Récemment, en 2019-2020, une étude a été menée, basée sur le même modèle que l'étude précédemment citée, afin d'étudier l'impact de la construction de nouveaux terre-pleins portuaires pour l'accueil des EMR à l'est de la rade et afin de refaire le point sur les communautés benthiques, la bathymétrie et les faciès sédimentaires présents dans la rade. Ces données ne sont actuellement pas publiées.

Actuellement, aucune étude n'a jamais été menée dans le port des Flamands. Cette présente étude constitue donc le premier échantillonnage et analyse des communautés de macrofaune benthique dans cette zone.

II. Méthodologies des échantillons du port des Flamands

II.1. Prélèvements

Les prélèvements de sédiments ont été réalisés le 11 novembre 2023 à l'aide d'une benne Van Veen permettant un prélèvement de 0,1 m³. Trois stations estimées représentatives de l'environnement du port des Flamands ont été investiguées (Figure 1). Sur chacune d'entre elles, 3 répliquats ont été réalisés. Dans une première étape une dizaine de grammes de sédiment a été prélevé en vue des analyses granulométriques et de géochimie. Les échantillons ont été placés dans des sachets plastiques dans une glacière à 5 °C. La totalité du sédiment restant a été tamisée sur le bateau à travers une maille de 1 mm. Les refus de tamis, constitués essentiellement de la faune benthique, ont été formolés (solution < 10 %) et stockés dans des bidons plastiques.

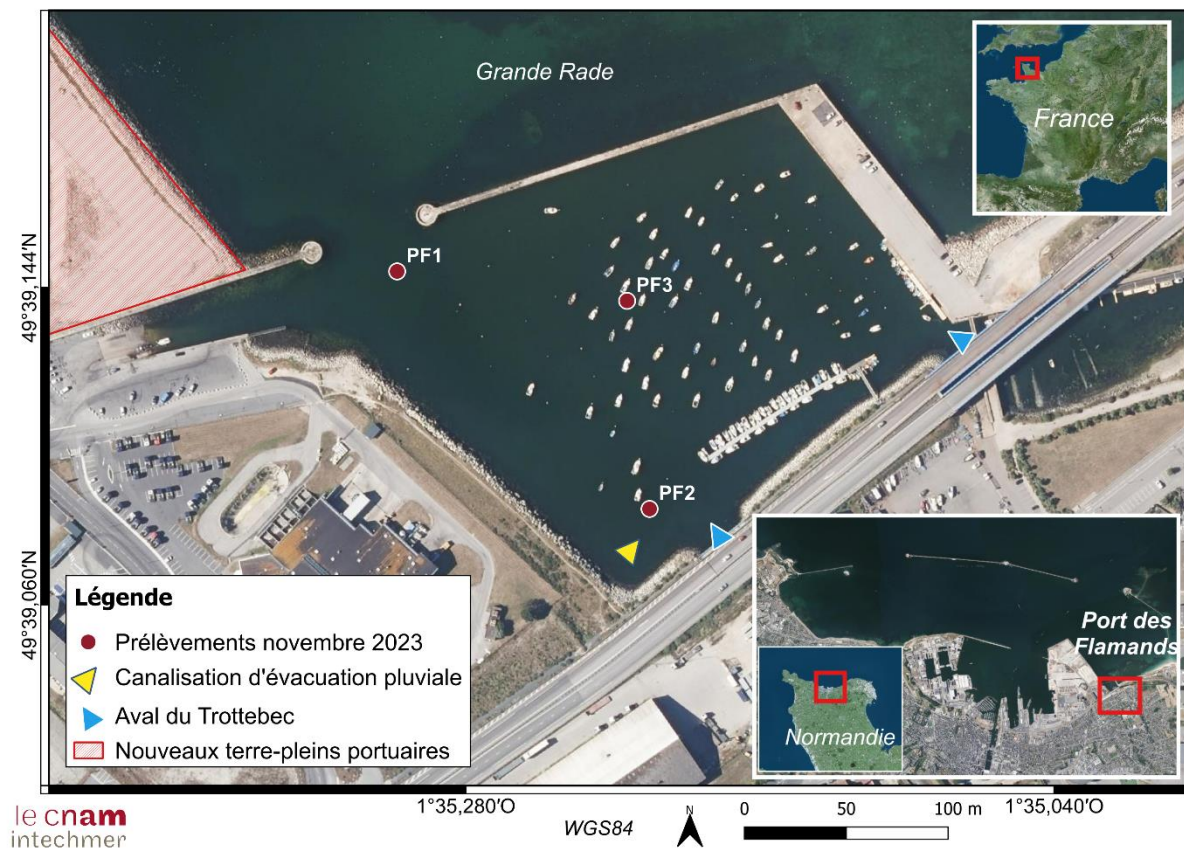


Figure 1 : Localisation des 3 stations de prélèvement, notées PF1 à PF3, dans le port des Flamands.

II.2. Analyses de laboratoire

II.2.1. Granulométrie

Pour la granulométrie par diffraction laser, les sous-échantillons sont dans la mesure du possible conservés humide à 5°C. Au moment de l'analyse, le réplicat est agité avec une solution d'héxamétaphosphate de sodium et soumis aux ultrasons, l'appareil utilisé est un HORIBA LA-960. Au moins deux réplicats sont analysés pour chaque échantillon. La gamme granulométrique analysée est de 0,011 à 3000 µm.

II.2.2. Géochimie élémentaire

II.2.2.1. Prétraitements

Les échantillons sont congelés au retour de mission puis lyophilisés.

Pour les analyses sur sédiment total, l'échantillon est finement broyé (1 à 5 g, PM400 de Retsch, bols et billes en oxyde de zirconium pour broyer efficacement et sans contamination les silicates comme le quartz). Le broyage a deux intérêts : (1) homogénéiser une masse suffisante de l'échantillon pour qu'elle soit représentative, cette quantité broyée peut ensuite être sous-échantillonnée en très petites aliquotes toujours représentatives de l'échantillon initial (50 mg pour la spectrométrie infrarouge), (2) donner à l'échantillon une granulométrie très fine, ce qui est essentiel pour la qualité des analyses quantitatives en spectrométrie de fluorescence X. Le sédiment est ensuite rincé à l'eau déminéralisée pour redissoudre les sels issus de l'eau interstitielle salée, ce qui permettra d'interpréter directement le brome comme du brome organique et le soufre comme une forme sulfure.

II.2.2.2. Spectrométrie infrarouge

Pour l'analyse du carbone organique, le sédiment est décarbonaté avant l'analyse en trois étapes (H_3PO_4 , 1M). L'appareil utilisé pour l'analyse est un LECO CS 744. Un four à induction amène l'échantillon à la fusion sous un flux de dioxygène ultrapur, le carbone est dosé par spectrométrie infrarouge sous la forme CO_2 . Au minimum deux réplicats de 50 mg sont analysés pour chaque échantillon. L'étalonnage est effectué avec des étalons LECO qui émettent à la combustion la même quantité de CO_2 que les échantillons.

II.2.2.3. Spectrométrie de fluorescence

L'appareil utilisé (xSORT, SPECTRO-Ametek), permet de doser comme élément le plus léger dans les sédiments l'aluminium Al. La limite de détection pour les éléments les plus lourds (à partir du titane Ti) est de 5 ppm. La masse minimale analysable est de 1 g. La qualité du résultat analytique est dépendante de la matrice. Le constructeur du xSORT le commercialise sous une configuration « géo » avec un traitement de

l'information « Enviro-H » qui utilise des échantillons de roche pour sa calibration. Nous avons choisi de compléter cette certification par une calibration post-analyse basée sur une soixantaine d'étalons composés de sédiments prélevés dans les différentes zones dans lesquelles nous avons travaillé en privilégiant la diversité. Ces sédiments ont été analysés par ICP-OES et ICP-MS au SARM (Service d'Analyse des Roches et des Minéraux) de Nancy. Les résultats obtenus peuvent donc être considérés avec confiance.

II.2.3. Faune benthique

Les échantillons utilisés pour l'analyse de la macrofaune ont été déformolés avant d'être traités. Un protocole visant au traitement des déchets CMR a été scrupuleusement suivi. Toutes les manipulations ont donc été réalisées avec un masque à gaz, des lunettes, des gants ainsi qu'une blouse. Les échantillons ont été tamisés à 1 mm et rincés abondamment afin d'éliminer toutes traces de formol. Le formol ainsi que l'eau sont récupérés dans des bidons de déchets CMR pour élimination. Les refus de tamis sont par la suite placés dans l'éthanol à 99 % en attendant d'être traités.

Les échantillons correspondant aux différentes stations et réplicats ont été traités un par un. Placé dans des barquettes remplies d'eau, les différents organismes contenus dans les refus de tamis ont été séparés en fonction de leur phylum et placés en piluliers sous éthanol à 99 %. Cette technique permet d'entreprendre une première étape d'identification.

Les phylums récupérés sont ensuite analysés sous loupe binoculaire (Leica M165C) et les individus sont identifiés à l'aide de clés de détermination jusqu'au rang de l'espèce (ou du genre si l'identification à l'espèce s'est démontrée impossible). Les individus ont été dénombrés par réplicas et par stations. La base de données World Register of Marine Species (WORMS) a été utilisée pour actualiser les noms des espèces à la date du 1 septembre 2024. La base de données a été mise en forme grâce au logiciel ACCESS. En raison d'un nombre conséquent d'organismes, seuls les réplicats A et B des échantillons de macrofaune benthique ont été traités. Pour le traitement des données, les abondances seront transformées et exprimées en individus.m⁻² afin de pouvoir établir des comparaisons avec les données recueillies dans la rade de Cherbourg.

II.3. Traitement des données

II.3.1. Introduction

Les nombreuses données obtenues par l'analyse en fluorescence X, celles obtenues par spectrométrie infrarouge et après détermination des espèces benthiques ont été traitées sur R studio.

Le test de Kruskal-Wallis est utilisé pour comparer les distributions de plusieurs groupes indépendants lorsque les données ne suivent pas une distribution normale

(testée avec le test de Shapiro). Le logiciel R a été utilisé pour réaliser les calculs statistiques (package « pgirmess »).

II.3.2. Analyses multivariées

La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et le Scaling Multidimensionnel Non-Métrique (nMDS) sont utilisés pour analyser les similarités ou dissimilarités entre les échantillons de faune.

La CAH (Classification Ascendante Hiérarchique) : Utilisée pour regrouper les échantillons en formant des clusters hiérarchiques basés sur leurs dissimilarités ou similarité. Chaque nœud représente un regroupement d'objets, et plus on monte vers le haut du cluster, plus les groupes sont larges et hétérogènes. La base de données brutes est tout d'abord transformée (racine carrée, $\log x + 1$...). Ici, il a été choisi de transformer les données selon la méthode d'Hellinger (Erreur ! Source du renvoi introuvable.) car cette transformation, appliquée au jeu de données du port des Flamands, permet de réduire l'effet des valeurs extrêmes et normalise bien les données et réduit l'impact des espèces très abondantes. Puis une matrice de similarité ou de dissimilarité est créée. Ici, la matrice est générée avec la méthode de Bray-Curtis (adaptée pour des données écologiques et des comptages. Cet indice de Bray-Curtis mesure la dissimilarité entre deux échantillons en fonction de leur composition en espèces. L'indice de Bray-Curtis varie généralement entre 0 (identique) à 1 (complètement différent). La méthode choisie pour la représentation de la CAH est celle des groupes moyens, couramment utilisée lorsqu'il s'agit de données de comptage en écologie et qui considère la moyenne des dissimilarités entre les objets pour former les groupes.

La nMDS (Non-Metric Multidimensional Scaling) : Utilisée pour représenter visuellement les similitudes entre les échantillons lorsque les données ne suivent pas une distribution normale. La nMDS est plus adaptée que la MDS classique, pour les données non métriques ou les mesures de dissimilarité non euclidiennes. Elle est réalisée à partir des données transformées en racine carrée. La représentation est évaluée par le stress de Kruskal (Kruskal, 1964). On estime que la représentation est excellente si le stress est inférieur à 0,1 ; satisfaisante si le stress est compris entre 0,1 et 0,25 ; médiocre si la valeur est supérieure à 0,5 (Wagenaar et Padmos, 1971).

Les regroupements ainsi mis en évidence ont été testés grâce à une analyse de similarité ANOSIM, développée par Clarke (1993). Le calcul d'un indice de similarité permet de tester l'hypothèse nulle (H_0) selon laquelle il n'existe aucune différence entre les assemblages. Dans le cas où une différence significative est observée, une analyse de la contribution des espèces à la similarité (SIMPER, SIMilarity PERcentages) a été réalisée (Clarke, 1993). Ce type d'analyse permet d'identifier les espèces qui sont majoritairement responsables des différences observées entre les assemblages.

En présence d'une somme importante de données (géochimie minérale, organique, granulométrie) quantitatives à traiter et interpréter, l'analyse en

composantes principales (ACP ou PCA en anglais pour Principal Component Analysis), consiste à transformer des variables liées entre elles (dites « corrélées » en statistique) en nouvelles variables décorrélées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées « composantes principales » ou axes principaux. Elle permet de résumer l'information en réduisant le nombre de variables et donc une interprétation plus facile du jeu de données initiales.

Les analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel R.

II.3.3. Analyses de la composition faunistique

II.3.2.1. Richesse taxonomique (S)

La richesse taxonomique (S) correspond au nombre total de taxons (unité quelconque genre, famille, espèce, sous-espèce, etc. des classifications hiérarchiques des êtres vivants) présents dans les échantillons.

II.3.2.2. Abondances (A)

L'abondance (A) est la somme totale des individus de tous les taxons par unité de surface. Elle est exprimée en m².

II.3.2.3. Indice de diversité de Shannon-Wiener (H') et Piélou (J')

L'indice de diversité de Shannon-Wiener (H' ; Shannon, 1948) est couramment utilisé. Il permet d'exprimer la diversité en prenant en compte le nombre d'espèces et l'abondance des individus au sein de chacune de ces espèces. Ainsi, une communauté dominée par une seule espèce aura un coefficient moindre qu'une communauté dont toutes les espèces sont codominantes. La valeur de l'indice varie de 0 (une seule espèce, ou bien une espèce dominant toutes les autres) à log₂ S (lorsque toutes les espèces ont même abondance). C'est donc un indicateur de l'hétérogénéité de la biodiversité du milieu étudié.

$$H' = \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

avec :

$p_i = n_i/N$, Fréquence de l'espèce ou taxa,

S = Nombre total d'espèce ou de taxa.

Vincent et al. (2002) ont mis en place des valeurs seuils de référence pour l'indice de Shannon-Wiener concernant les habitats sablo-vaseux (Tableau 1).

L'indice de Piélou (J') ou indice d'équitabilité accompagne souvent l'indice de Shannon-Wiener. Il permet de mesurer la répartition des individus au sein des espèces, mais cette fois, indépendamment de la richesse taxonomique. Sa valeur varie de 0 : dominance d'une espèce, à 1 : équirépartition des individus au sein des espèces :

$$J' = \frac{H'}{H'_{\max}}$$

avec :

$$H'_{\max} = \log_2 S$$

Tableau 1 : Classification de la pollution à partir de la valeur de H' , dans les habitats sableux-vaseux (Vincent et al., 2002).

Référence couleur	Etat écologique	Valeur de H'	Classification
	Mauvais	<1	Azoïque, très pollué
	Médiocre	]2-1]	Fortement pollué
	Modéré	]3-2]	Modérément pollué
	Bon	]4-3]	Zone de transition
	Excellent	>4	Sites de référence

II.3.2.4. Qualité écologique

- **AMBI : AZTI's Marine Biotic Index et M-AMBI**

L'état écologique est étudié à l'aide de différents indices biotiques. Les indices biotiques constituent une approche de la structure des peuplements benthiques en fonction du niveau de perturbation. Cinq groupes écologiques sont définis par Hily (1984) en fonction de différentes sensibilités (Tableau 2).

$$AMBI = \frac{(0 \times \%GI) + (1,5 \times \%GII) + (3 \times \%GIII) + (4,5 \times \%GIV) + (6 \times \%GV)}{100}$$

Le coefficient benthique ou AMBI, mise en place par Borja et al. (2000) se calcule en pondérant le pourcentage de chaque groupe écologique (GI à GV) représenté par le poids de sa contribution dans la représentation du niveau de perturbation (lié à la teneur en matière organique). Une corrélation a été proposée par Borja et al. (2004), entre les valeurs de l'AMBI et les États Écologiques définis par la DCE (Directive Cadre sur l'Eau), permettant de classer l'état du système (Tableau 3).

Tableau 2 : Groupes écologiques représentant le niveau de sensibilités des espèces utilisées comme indicateurs écologiques pour le calcul de l'AMBI, du M-AMBI et du BO2A.

Groupes	Type d'espèces	Caractéristiques
I	Sensibles à une hypertrophisation	Largement dominantes en conditions normales, mais disparaissent les premières si perturbation
II	Indifférentes à une hypertrophisation	Espèces peu influencées par une augmentation de la quantité de M.O.
III	Tolérantes à une hypertrophisation	Naturellement présentes dans les milieux vaseux, elles sont le signe d'un déséquilibre du système
IV	Opportunistes de second ordre	Cycle de vie court et proliférant dans les sédiments réduits
V	Opportunistes de premier ordre	Prolifèrent dans les sédiments réduits. Espèces adaptées au milieux perturbés

Tableau 3 : Valeurs de l'AMBI et équivalences avec les différents états écologiques. D'après Borja et al. (2000) et Borja et al. (2004).

Classification du site	Valeur de l'indice AMBI	Etat écologique	Dominance des groupes écologiques	Etat des communautés
Non stressé	$0,0 < \text{AMBI} < 0,2$	Très bon	I	Normal
	$0,2 < \text{AMBI} < 1,2$			Appauvri
Légèrement stressé	$1,2 < \text{AMBI} < 3,3$	Bon	III	Déséquilibré
Moyennement stressé	$3,3 < \text{AMBI} < 4,3$	Moyen	IV-V	En transition vers l'état "stressé"
	$4,3 < \text{AMBI} < 5,0$			Stressé
Fortement stressé	$5,0 < \text{AMBI} < 5,5$	Médiocre	V	En transition vers l'état "fortement stressé"
	$5,5 < \text{AMBI} < 6$			Fortement stressé
Extrêmement stressé	Azoïque	Mauvais	Azoïque	Azoïque

- **Indice M-AMBI (Multivariate AMBI)**

Muxika et al. (2007) préconisent l'AMBI combiné avec d'autres paramètres tels que l'indice de Shannon-Wiener (H') et la richesse spécifique (S), à travers le calcul d'un indice biotique modifié, le M-AMBI. Ces trois composants sont utilisés dans une analyse multivariée pour produire un score théoriquement plus représentatif et sensible aux variations des communautés benthiques (Sigovini et al., 2013).

Ainsi, le calcul de l'AMBI et du M-AMBI est réalisé à l'aide du logiciel AMBI 6.0 développé par l'AZTI (<http://ambi.asti.es/>), sur les trois stations.

- *Le BO2A : Benthic Opportunistic Annelida Amphipodsindex*

Il s'agit d'un indice écologique utilisé pour évaluer la qualité environnementale des habitats marins benthiques, basé sur le ratio entre l'abondance des amphipodes (hors genre *Jassa*), qui sont sensibles aux perturbations de l'environnement et des polychètes opportunistes qui résistent à de fortes concentrations de matière organique (Caglar et Albayrak, 2012 ; de-la-Ossa-Carretero et Dauvin, 2010 ; Dauvin et Ruellet, 2009). Le BO2A est nul lorsqu'il n'y a pas d'annélides opportunistes dans l'échantillon, ce qui indique une zone avec une très faible quantité de matière organique. L'indice est faible lorsque l'environnement est de bonne qualité et augmente avec l'enrichissement en matière organique (Tableau 4). L'avantage du BO2A est qu'il n'est pas directement dépendant de la méthode d'échantillonnage (taille du tamis par exemple) puisqu'il utilise les fréquences. De plus, il n'est pas basé sur le même modèle d'espèces sensibles/tolérantes à l'augmentation de M.O. que l'AMBI et permet donc d'apporter de nouvelles informations.

$$BO2A = -\log_{10} \left[\frac{f_{\text{annelides}}}{f_{\text{amphipodes}} + 1} \right] + 1$$

Avec :

$f_{\text{Annelides}}$ = abondance relative des annélides opportunistes (nombre total d'annélides opportunistes / nombre total d'individus dans l'échantillon)
 $f_{\text{Amphipodes}}$ = abondance relative des amphipodes (nombre total d'amphipodes / nombre total d'individus dans l'échantillon). Le genre *Jassa* est exclu.

Tableau 4 : Valeurs du BO2A et équivalences avec les différents états écologiques ; d'après De-la Ossa-Carretero et Dauvin (2010) modifié de Dauvin (2018).

Ref couleur	État écologique	BO2A
	Mauvais	0,25513 - 0,30103
	Médiocre	0,19885 - 0,25512
	Modéré	0,13003 - 0,19884
	Bon	0,02453 - 0,13002
	Excellent	0,00000 - 0,02452

III. Comparaison des données avec celles de la Grande Rade

Les données et résultats issus des échantillonnages du port des Flamands réalisés en novembre 2023 seront comparés à ceux obtenus dans des études précédemment menées au sein de la Grande Rade de Cherbourg, notamment à celles obtenues et publiées par Baux et al. (2017).

De plus, afin d'affiner la comparaison, des données non publiées, issus d'une étude réalisée après les travaux d'extension des terre-pleins portuaires pour l'accueil des EMR, en 2019-2020, seront utilisées (financement Port de Normandie).

Les données concernant les échantillons prélevés dans le port des Flamands et celles provenant du rapport non publié (après travaux) ont été obtenues en utilisant un granulomètre à diffraction laser HORIBA LA-960. Le protocole d'analyse est identique pour ces deux ensembles d'échantillons. Les données présentées dans la publication de Baux et al. (2017) ont été obtenues par tamisage humide pour obtenir le pourcentage de fraction fine (< 50 microns) et par tamisage à sec sur colonne de tamis pour séparer les différentes fractions sableuses.

III.1.1. Méthodologie de prélèvements dans la rade. Etude publiée en 2017

Toute la méthodologie est disponible dans l'article publié par Baux et al. (2017) ainsi que le rapport de stage de Baux (2015).

III.1.2. Méthodologie de prélèvements dans la rade. Etude menées en 2019-2020 (après travaux)

Les prélèvements (Figure 2) ont été réalisés à l'aide d'une benne Van Veen de 0,1m². Un total de 15 stations a été échantillonné sur l'ensemble de la rade. Ces stations ont été sélectionnées parmi les stations échantillonnées dans les études précédemment menées dans la rade (Baux et al., 2017), afin de réaliser, une comparaison des résultats et étudier l'impact des travaux d'agrandissement des terre-pleins portuaires. A chaque station, trois réplicats ont été réalisés pour les prélèvements de macrofaune benthique, couplés à ceux pour les analyses granulométriques et de matière organique associées, comptabilisant un total de 45 prélèvements (3 réplicats, 15 stations).

Afin de réaliser la comparaison, seuls deux réplicats seront conservés pour les données issues de la Grande Rade, afin de réaliser les analyses sur un même nombre de réplicats.

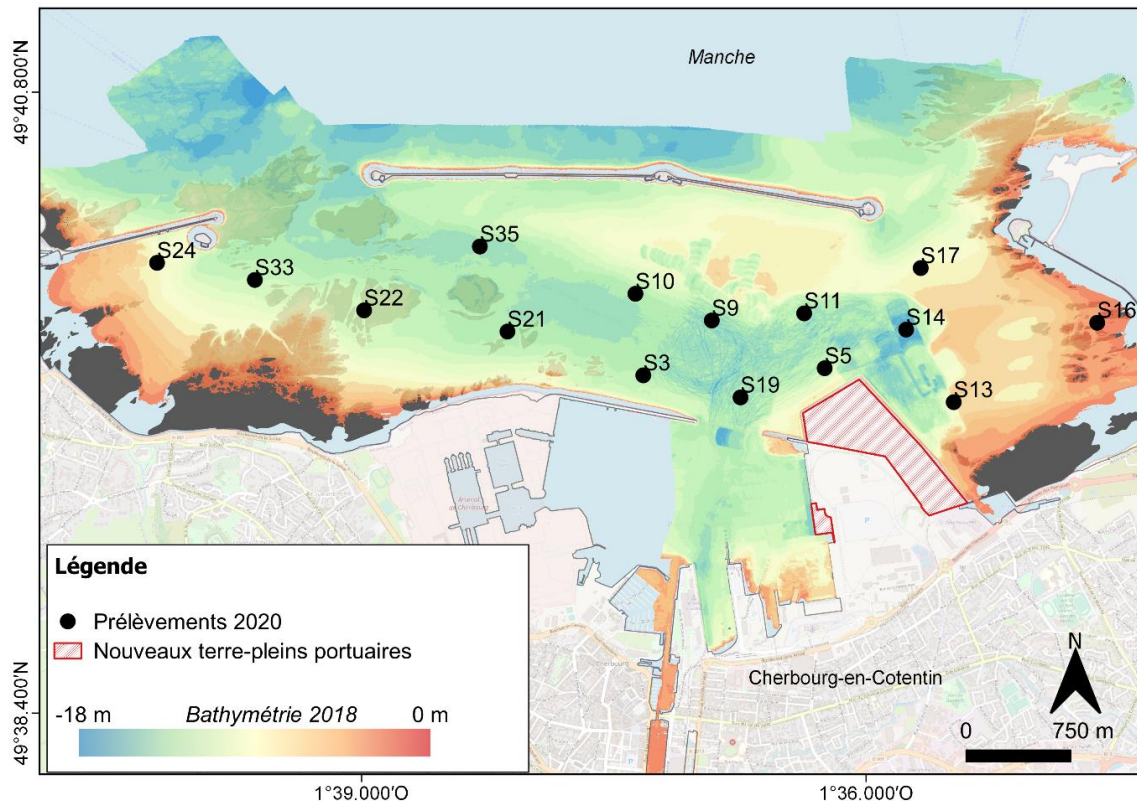


Figure 2 : Positionnement des points de prélèvements pour la campagne réalisée le 19 octobre 2020 (Baux et al., 2022). Superposition de la bathymétrie obtenue en 2018 (Méar et al., 2020).

IV. Résultats

IV.1. Sédimentologie

Dès le prélèvement en mer, les observations faites à bord du navire permettent de différencier les 3 stations. La station PF1, localisée légèrement à l'est de la passe reliant le port des Flamands avec la grande rade est constituée principalement de sables fins légèrement envasés. La station PF2 localisée à proximité de la sortie du Trottebec est elle aussi constituée par du sable envasé mais la présence très importante de débris végétaux continentaux (feuilles et branches) la caractérise. La station PF3 représentative de la zone centrale du port est constituée par un sédiment beaucoup plus fin homogène. Oxydé sur une épaisseur millimétrique, il passe très rapidement à une couleur noir foncé. Ce changement de couleur est lié au passage d'une zone oxydée en surface à une zone réduite (sans oxygène) en profondeur. Ce passage souligne le peu d'échange entre la masse d'eau et le sédiment.

L'analyse des distributions granulométriques des 3 stations confirme ces observations de terrain (Figure 3). Les modes granulométriques des stations PF1 et PF2 se situent tous les deux dans la classe des sables fins (125-250 μm). Les deux stations présentent aussi un mode secondaire autour des 10 μm (silts). Ces deux stations se

différencient cependant nettement par leur pourcentage en fraction inférieure à 63 μm (pourcentage de vase). La station PF2 apparaissant nettement plus envasée. À l'inverse la station centrale (PF3) ne présente pas de stock sableux individualisé même si des particules sableuses sont présentes en faible concentration. La distribution granulométrique des sédiments de cette station est organisée autour d'un mode silteux avec une queue complexe vers les particules les plus grossières (< 63 μm).

Pour la station PF2 ou les conditions à la mer n'ont permis de ne prélever que 2 répliquats (Figure 3), les distributions granulométriques diffèrent par l'existence plus ou moins marquée du stock de sables fins. L'analyse de la position géographique des 2 répliquats permet de mettre en évidence une présence plus marquée du sable dans l'axe de la passe port-rade qu'en bordure occidentale. Cette différence granulométrique souligne la présence d'une dynamique des masses d'eau et des sédiments dans la passe qui s'atténue très rapidement en bordure.

Pour les stations PF2 et PF3, la distance séparant les différents répliquats est du même ordre que celle séparant les deux répliquats de la station PF1. Cette distance pluridécamétrique est liée à la dérive du navire support due au fort vent d'ouest soufflant lors de la mission. Cependant, les distributions granulométriques, pour chacune des stations, soulignent une grande homogénéité spatiale à l'échelle de la zone étudiée (Figure 3).

L'analyse du Carbone Organique Total (COT) souligne la grande disparité des trois stations investiguées (Figure 4). La concentration en COT apparaît faible (0,40 %) au niveau de la station PF1. Il s'agit d'une zone hydrodynamiquement active, loin de toutes sources d'apports en matière organique. La station PF2 qui présente une granulométrie semblable à la station PF1 a cependant un pourcentage de COT plus important (2,58 %). Cette augmentation pourrait être liée à l'important apport de matières végétales lors des crues du Trottebec. La station PF3 est celle qui présente la plus forte concentration de COT (5,18 %). La zone centrale constitue un « puit » de matière organique sans qu'il soit possible sans analyse complémentaire (dosage du Br par fluorescence X) définir s'il s'agit de matière organique d'origine continentale ou marine.

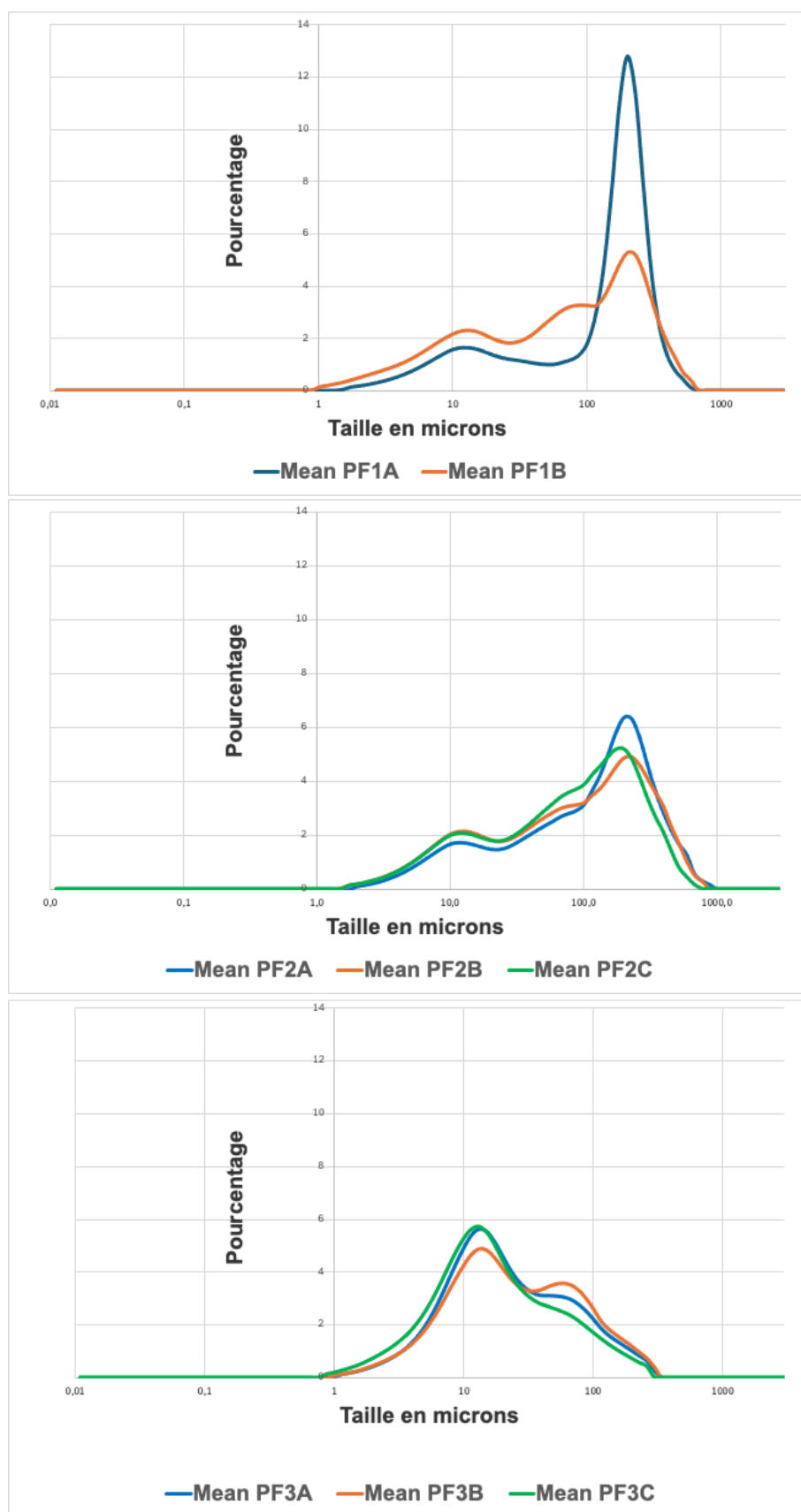


Figure 3 : Distributions granulométriques des sédiments (stations PF1, PF2 et PF3 et réplicats A (vert), B (bleu) et C (rouge)).

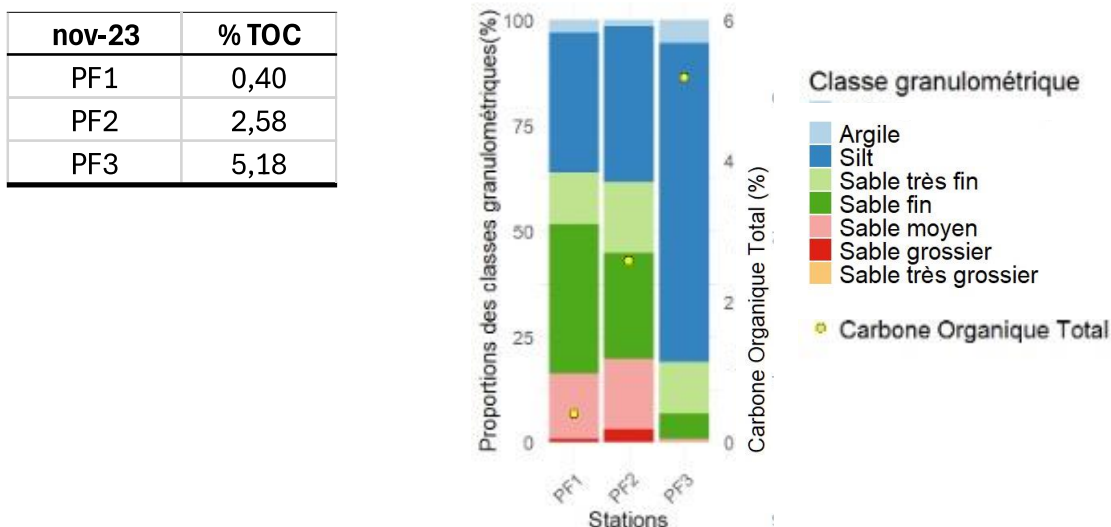


Figure 4 : Pourcentage de carbone organique total en fonction des distributions granulométriques.

Les résultats de l'analyse élémentaire par fluorescence X (Tableau 5) sont utilisés pour tenter de mettre en évidence une quelconque influence marine ou continentale au niveau des 3 stations. L'analyse en composantes principales permet de visualiser ces corrélations (Figure 5).

Tableau 5 : Résultats de l'analyse par fluorescence X. NA pour non dosable (en dessous de la limite de détection ; en bleu les valeurs maximale).

Echantillons	Ag	Al	As	Ba	Br	Ca	Cr	Cu	Fe	I	K	Mn	Nb	Ni
PF1 11 2023	NA	NA	NA	197	10	47373	NA	NA	2496	NA	11753	NA	NA	NA
PF2 11 2023	NA	NA	NA	298	NA	6500	NA	NA	4499	NA	12744	NA	NA	NA
PF3 11 2023	21	18153	23	314	461	61080	66	43	27782	160	16003	237	7	17
	Pb	Rb	S	Sb	Si	Sr	Ta	Th	Ti	V	Y	Zn	Zr	
PF1 11 2023	NA	34	996	8	317617	271	28	NA	371	NA	NA	8	180	
PF2 11 2023	NA	32	1996	14	374119	42	17	NA	809	NA	NA	46	239	
PF3 11 2023	52	82	8764	NA	209870	445	NA	16	3235	67	19	226	154	

Les trois stations investiguées s'individualisent nettement en occupant les trois tiers du cercle (Figure 5). La station PF2 apparaît comme étant la plus enrichie en silicium. Elle caractérise un milieu continental de sables fins à moyens mis en place lors des crues du Troitebec. La station PF3 présente une association entre le carbone organique total (TOC), le brome et l'aluminium. Elle caractérise ainsi une zone où s'accumulent des sédiments fins. La matière organique y est principalement d'origine marine. La station PF1 est celle qui est la plus enrichie en carbonates. L'observation visuelle donne une origine marine (fins débris coquilliers) à ces carbonates.

En interprétant les résultats obtenus avec ceux issus de la modélisation des courants dans la grande rade et les observations de terrain (Poizot et Méar, 2023), il apparaît que les courants de marée (jusant) sont responsables d'une exportation des

sédiments fins amenés par les crues du Trottebec ainsi que des macro-débris végétaux continentaux (feuilles, branches...) vers l'extérieur du port. A l'opposé, au flot, les sédiments marins les plus grossiers sédimentent dans la passe entre la rade et le port et les plus fins enrichis en matières organiques marines s'associent à ceux amenés par le Trottebec pour sédimenter au centre du port.

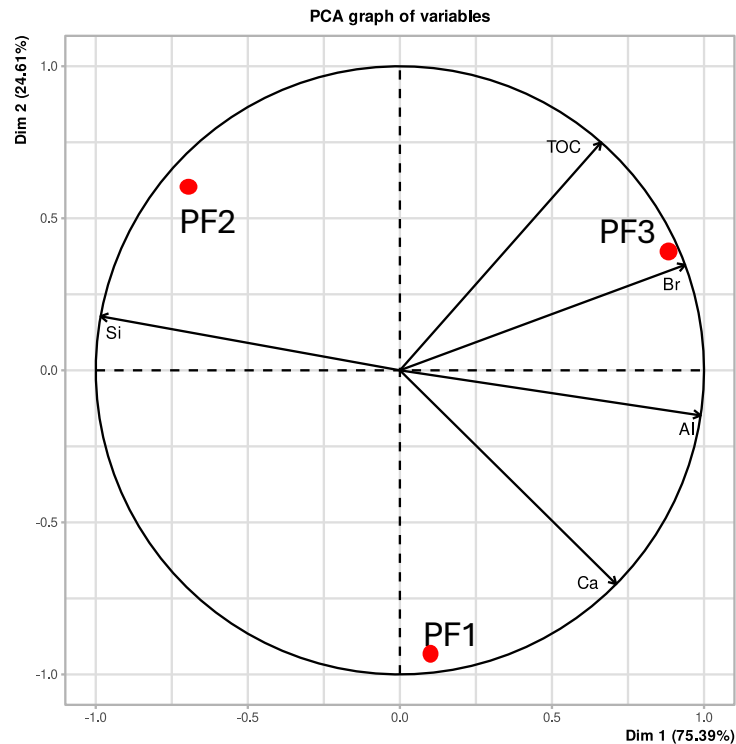


Figure 5 : ACP permettant la représentation des variables les plus caractéristiques par rapport aux stations échantillonnées (novembre 2023). Avec Sr : stontium, Ca : calcium, Br : brome, COT : carbone organique total et Si : silicium.

IV.2. Macrofaune benthique

Tout d'abord, il est important de noter que seuls deux répliquats ont été traités en totalité. La faune des répliquats C n'a été que partiellement identifiée et dénombrée au vu de la grande quantité de polychètes à détuber (tous les groupes faunistiques ont été dénombrés hormis les polychètes dans ces troisièmes répliquats). Ainsi, les analyses ne se porteront que sur deux répliquats par station.

IV.2.1. Composition faunistique

Les trois stations sont composées d'une faune riche et diversifiée (Tableau 6). La station PF1, à proximité de la passe, présente la richesse taxonomique la plus élevée avec 62 taxons recensés. Ce n'est toutefois pas la station qui présente les plus fortes abondances (6377 ind.o,2m⁻²). La station PF2 présente les abondances les plus élevées

(8419 ind.o,2m⁻²) mais également la richesse taxonomique la plus faible (33 taxons recensés). Il semble donc qu'il y ait un petit nombre d'espèces mais composées de nombreux individus, en comparaison des deux autres stations. Enfin la station PF3 se compose de 36 espèces pour une abondance de 2245 ind.o,2m⁻².

Statistiquement, le test de Kruskal-wallis ne révèle pas de différences significatives entre les trois stations, en termes d'abondance (KW = 0,094).

Tableau 6 : Richesse taxonomique, abondances et écart-types associés (SD), pour les trois stations échantillonnées en novembre 2023 dans port des Flamands.

Station	S	SD S	A (ind.m ⁻²)	SD A
PF1	62	1	31885	296,5
PF2	33	3	42095	717,5
PF3	36	2	11225	213,5

En termes de composition faunistique (Figure 6 et Tableau 7), la station PF2 est celle qui présente la plus grande proportion de polychètes (28980 ind.m⁻² en PF2 ; 3174 ind.m⁻² en PF1 et 862 ind.m⁻² en PF3), lié à la présence d'une grande quantité, de *Hediste diversicolor* (8625 ind.m⁻² en PF2 contre seulement 95 ind.m⁻² en PF1 et 1125 ind.m⁻² en PF3), de *Capitella capitata* (7655 ind.m⁻² en PF2 contre seulement 105 ind.m⁻² en PF1 et 50 ind.m⁻² en PF3) et de Spionidés (représenté par les *Malacoceros* sp., *Spio decorata* et *Spiophanes bombyx*). En comparaison avec les stations PF1 et PF3, ce ne sont pas les mêmes espèces de polychètes qui sont dominantes, puisque l'on trouve un grand nombre de Maldanidae et de *Pseudopolydora antennata* en PF1 (respectivement 5990 ind.m⁻² et 3705 ind.m⁻² en PF1 contre, 485 ind.m⁻² et 0 ind.m⁻² en PF2 ; 110 ind.m⁻² et 20 ind.m⁻² en PF3). En PF3, on note également de fortes abondances de *Notomastus latericeus* (1655 ind.m⁻² en PF3 ; 3110 ind.m⁻² en PF1 et seulement 35 ind.m⁻² en PF2) ainsi que de *Melinna palmata* (975 ind.m⁻² en PF3 ; 185 ind.m⁻² en PF1 et seulement 0 ind.m⁻² en PF2).

De même on note une différence importante de présence d'Oligochètes entre les trois stations, avec de fortes abondances recensées en PF2 (11800 ind.m⁻² en PF2, contre 620 ind.m⁻² en PF1 et 1140 ind.m⁻² en PF3), ainsi que la quasi-absence de Tanaidacés en PF2 (notamment d'*Apseudopsis latreilli* : 105 ind.m⁻² en PF2, comparé à 10895 ind.m⁻² en PF1 et 4795 ind.m⁻² en PF3).

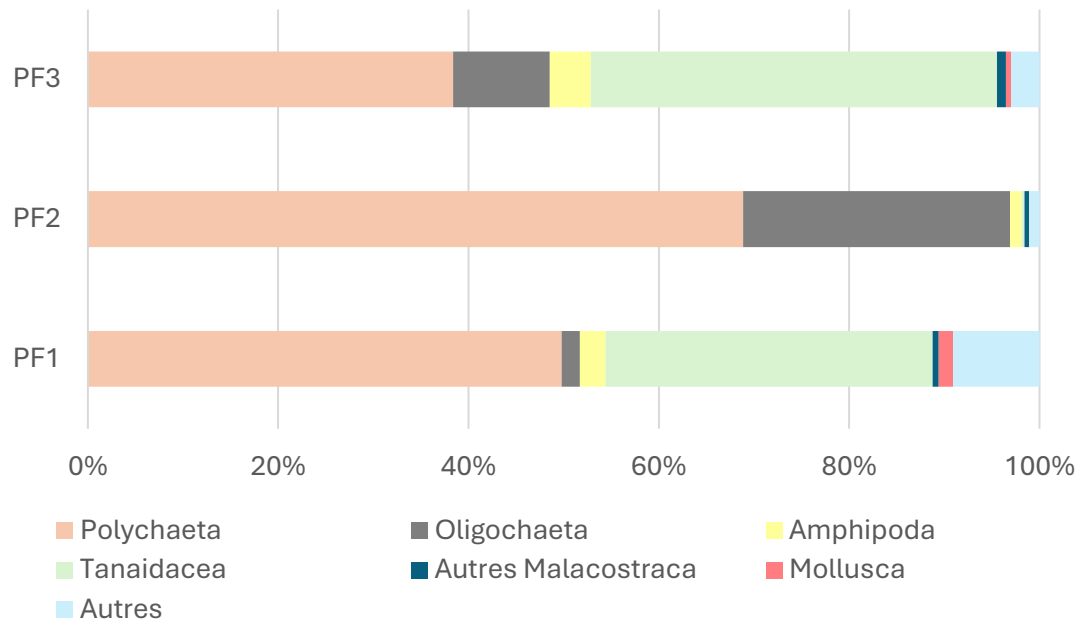


Figure 6 : Proportions des phylums présents à chaque stations et tableau des valeurs associées en ind.0,2 m⁻². Autres : regroupement des sipuncula, echinodermata, cnidaria, nematoda et Phoronidae. Autres Malacostraca : regroupement des Cumacea, Decapoda, Isopoda, Leptrostraca et Lophogastrida (novembre 2023).

Tableau 7 : Liste et abondances (ind.m⁻²) des dix espèces majoritaires recensées pour chaque station.

PF1		PF2		PF3	
SP	Ind.m ⁻²	SP	Ind.m ⁻²	SP	Ind.m ⁻²
<i>Apseudopsis latreillii</i>	10895	Oligochaeta	11800	<i>Apseudopsis latreillii</i>	4795
Maldanidae	5990	<i>Hediste diversicolor</i>	8625	<i>Notomastus latericeus</i>	1655
<i>Pseudopolydora antennata</i>	3705	<i>Capitella capitata</i>	7655	Oligochaeta	1140
<i>Notomastus latericeus</i>	3110	<i>Malacoceros</i> sp.	6855	<i>Hediste diversicolor</i>	1125
<i>Phoronis psammophila</i>	2355	<i>Spio decorata</i>	2710	<i>Melinna palmata</i>	975
<i>Spio decorata</i>	1085	<i>Spiophanes bombyx</i>	1980	<i>Erichtionius punctatus</i>	365
Oligochaeta	620	Maldanidae	485	Nematoda	210
<i>Galathowenia oculata</i>	620	Nematoda	375	<i>Galathowenia oculata</i>	115
<i>Dipolydora giardi</i>	530	<i>Parexogone hebes</i>	295	Maldanidae	110
Nematoda	470	<i>Erichtionius punctatus</i>	240	<i>Amphipholis squamata</i>	95

IV.2.2. Analyses de diversité

Les indices de Shannon-Wiener (H') et de Piélou (J') ont été calculés pour les trois stations échantillonnées dans le port des Flamands en novembre 2023 (

Tableau 8). Pour rappel, l'indice H' varie de 0 (une espèce dominante) à $H'_{\max}$ (toutes les espèces ont la même abondance). L'écart entre H' et $H'_{\max}$ est globalement le même pour les trois stations (2,77 en PF1, 2,27 en PF2 et 2,34 en PF3), avec des valeurs plutôt éloignées de celles d' $H'_{\max}$, mettant en évidence la présence d'espèces dominantes plutôt qu'une répartition équitable des abondances entre les espèces.

De même l'indice de Piélou (J'), qui varie de 0 (dominance d'une des espèces) à 1 (équirépartition des individus dans les espèces), montre des valeurs moyennes pour toutes les stations, reflet d'une dominance partielle de certaines espèces. Il n'y a pas d'équirépartition des individus au sein des espèces. La station PF1 montre la valeur de J' la plus faible, suggérant une dominance plus marquée de certaines espèces par rapport aux autres, probablement en lien avec les fortes abondances de *A. latreilli* (10895 ind.m⁻²).

D'après la classification de Vincent et al. (2002) le port des Flamands montrerait en état écologie « bon » à « modéré » (Tableau 1).

Tableau 8 : Richesse taxonomique, indice de Shannon-Wiener (H'), valeurs maximums de Shannon-Wiener ($H'_{\max}$) et indice d'équitabilité de Piélou (J') des trois stations échantillonnées dans le port des Flamands. Novembre 2023. Couleurs correspondantes à la classification de la pollution (d'après Vincent et al., 2002 ; Tableau 1).

	PF1	PF2	PF3
S	62	33	36
H'	3,19	2,77	2,83
$H'_{\max}$	5,95	5,04	5,17
J'	0,53	0,55	0,55

IV.2.3. Analyses multivariées

D'après les résultats de la CAH (Classification Ascendante Hiérarchique ; Figure 7), PF1 et PF3 sont les deux stations les plus similaires (niveau de dissimilarité d'environ 0,50, soit 50 % de similarité). Un second groupe est formé avec la station PF2 à un niveau de dissimilarité plus élevé (environ 0,65, soit seulement 35 % de similarité avec le groupe formé par PF1-PF3), ce qui indique une plus grande différence dans la composition des espèces ou des abondances en PF2.

La nMDS (Figure 8), qui permet de représenter dans un espace à deux dimensions, les relations entre les stations et leur similarité, montre des résultats en accord avec ceux de la CAH. Les stations PF1 et PF3 sont proches en termes d'espèces par rapport à la station PF2 qui diffère des deux autres. La valeur de stress de Kruskal indique une

représentation excellente. Toutefois, il est important de noter que l'analyse est réalisée avec un nombre de données peu important.

Aucune analyse ANOSIM ou SIMPER n'a été réalisée pour tester les groupes formés par la CAH au vu du faible nombre de groupe formés (2 groupes).

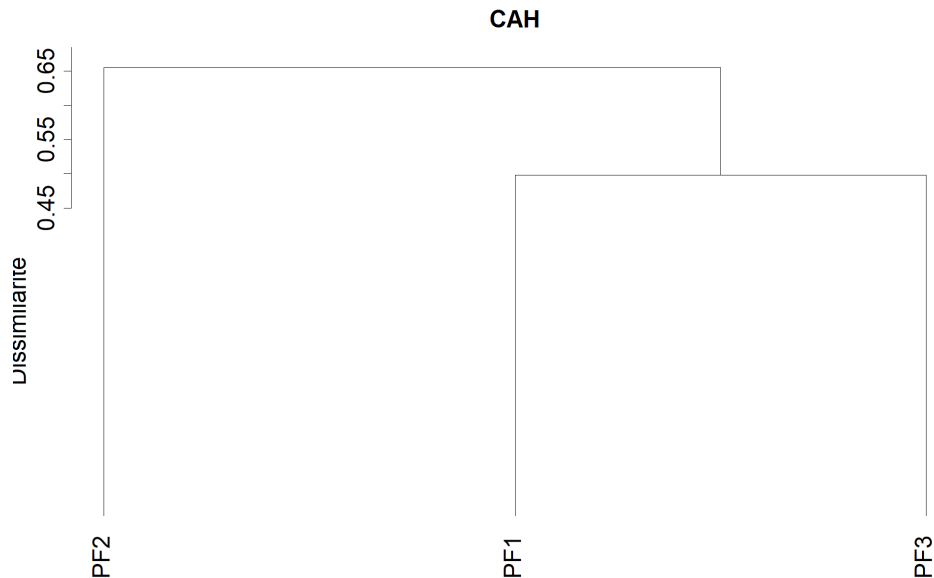


Figure 7 : Résultat de la CAH réalisée sur les données d'abondances des trois stations PF1, PF2 et PF3, standardisées en racine carré, en utilisant une matrice de dissimilarité de Bray-Curtis et la méthode des groupes moyens. Données de novembre 2023.

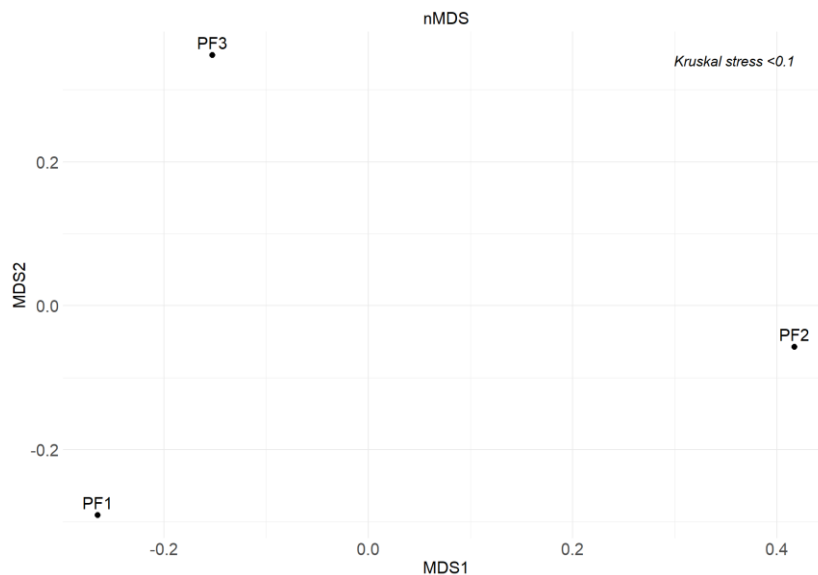


Figure 8 : Résultat de la nMDS réalisée sur les données d'abondances des trois stations PF1, PF2 et PF3, standardisées en racine carré. Données de novembre 2023.

IV.2.3. Etat écologique

Les résultats du calcul de l'AMBI (Figure 9) mettent en évidence des différences entre les stations, avec la station PF2, qui semble la plus dégradée. Celle-ci est composée de 51,1 % d'espèces du groupe III (espèces tolérantes à une hypertrophisation, naturellement présentes dans les vases mais qui sont signe d'un déséquilibre du système car leur prolifération est liée à l'enrichissement en matière organique) et 46,6 % d'espèces du groupe V (espèces opportunistes de premier ordre qui prolifèrent dans les sédiments réduits et reflètent une étape de pollution maximale avant disparition des invertébrés). Dans les stations PF1 et PF3, ce sont les espèces du groupe III qui dominent largement (respectivement 70,3 % et 80,7 %), mais l'on observe également la présence d'espèces des autres groupes. En PF1, on note la présence de 10,3 % d'espèces du groupe II (indifférentes à l'hypertrophisation mais influencée par l'augmentation de la quantité de M.O.) mais également de 13,4 % d'espèce du groupe IV (opportunistes de second ordre proliférant dans les sédiments réduits). En PF3, la présence d'espèce du groupe I est de 6,1 % (sensibles à une hypertrophisation, dominantes dans les sédiments propres et sensibles à toutes modifications du système), mais avec également la présence d'espèces du groupe V (10,7 %).

La faible présence d'espèces du groupe I et II sur l'ensemble des stations, reflètent un milieu déjà enrichi en M.O. et anthropisé.

La classification de l'environnement proposé par Borja et al. (2000) et Borja et al. (2004), classe la station PF2 en « médiocre », reflétant un état « stressé » des communautés en place, tandis que PF1 et PF3 sont classées en « bon », caractérisant l'état des communautés en « déséquilibre ».

Le calcul du M-AMBI (Tableau 9) classe le port des Flamands en état écologique excellent à bon.

Toutefois, il est important de noter que la robustesse de l'indice est moindre lorsque le nombre de taxons échantillonnés est réduit (ce qui est notre cas), ou lorsque les communautés sont dominées par certains taxons comme les Nématodes (Muniz *et al*, 2005), ce qui est le cas en PF2 (Tableau 7). Les problèmes de classification des espèces dans un groupe en particulier peut également être source d'erreurs et diffère d'un site à l'autre et reste discuté au sein de la communauté scientifique.

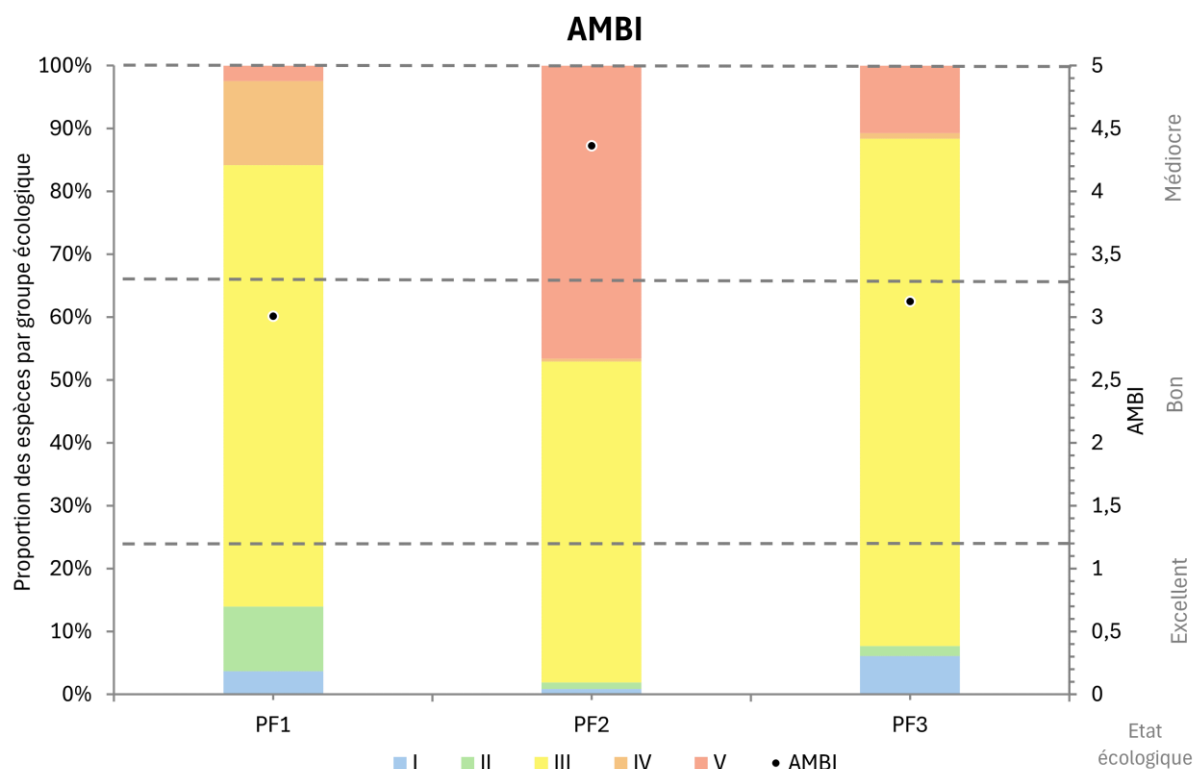


Figure 9 : Résultats de l'AMBI avec la classification de l'état écologique (Borja et al. (2000) et Borja et al. (2004) et le pourcentage des groupes écologiques observés dans les trois stations du port des Flamands.

Tableau 9 : Résultats du calcul du M-AMBI sur les trois stations échantillonnées dans le port des Flamands en novembre 2023.

Stations	M-AMBI	Etat
PF1	1,17	Excellent
PF2	0,76	Bon
PF3	0,94	Excellent

Le BO2A est basé sur une interprétation du ratio d'espèces sensibles et opportunistes différente de celle de l'AMBI et du M-AMBI. Il permet donc d'apporter de nouvelles informations. Pour le port des Flamands, le Bo2A classe les stations PF1 et PF2 en état écologique « médiocre ». Pour la station PF3, le Bo2A a indiqué un état écologique « mauvais » (Tableau 10).

Tableau 10 : Résultats du Bo2A sur les trois stations échantillonnées dans le port des Flamands en novembre 2023. Classification de l'état écologique d'après Dauvin et al., 2018.

Stations	BO2A	Etat
PF1	0,05942634	Médiocre
PF2	0,12178267	Médiocre
PF3	0,02199504	Mauvais

IV.2. Comparaison avec la Grande Rade

IV.2.1. Faciès sédimentaires

La rade de Cherbourg se caractérise par une mosaïque de substrats identifiées dans les différents travaux menées par le Cnam-Intechmer, notamment dans des études actualisées menées avant et après les travaux d'extension portuaires pour l'accueil des EMR (nouveaux terre-pleins de 39ha, construits à l'est, à proximité de l'entrée du port des Flamands). Les dernières études menées à grande échelle (rapports sédimento PNA) en 2018 ont permis de réaliser une cartographie synthétique des différents faciès sédimentaire dans la rade (Figure 10) Figure 10 : Carte synthétique de la couverture sédimentaire en rade de Cherbourg après travaux (Baux et al., 2021)..

Pour résumer ces études, il a été constaté, la présence de plusieurs modes (échantillons plurimodaux), avec, pour 2012 (avant travaux), des échantillons principalement bimodaux avec un mode majoritaire à 200 μm (sable fins ; SF) et un mode minoritaire entre 0,4 μm et 0,6 μm (argiles). En 2018 (après travaux), le mode à 200 μm (SF) est toujours majoritaire et le mode à 0,4-0,6 μm (argiles) est également toujours présent. Toutefois, le mode à 10 μm , très peu représenté en 2012, devient majoritaire en 2018. Les sédiments de 2018 sont donc trimodaux. En 2018, toutes les stations échantillonnées ont montré au moins 20 % de fraction fine supplémentaire même pour les dépôts les plus grossiers. Un envasement superficiel global après les travaux a été observé par rapport à 2012.

En comparaison, les analyses des modes granulométriques des stations dans le port des Flamands montrent la même tendance que les échantillons dans la Grande Rade, avec des échantillons bimodaux (voir section IV.1. Sédimentologie). Lorsque l'on compare les distributions granulométriques des stations du port des Flamands avec celles des stations de la rade de Cherbourg échantillonnées après les travaux dans l'étude non publiée de Baux et al. (2021), il a été possible de retrouver des compositions granulométriques similaires entre les deux zones d'étude. Par exemple, les stations S11, S13, S14, S16 et S17 (située à l'est de la Rade ; Figure 2) ont montré une prédominance marquée de sables fins, rappelant la composition observée dans PF1 et PF2 (bien que PF2 montre également une grande quantité de débris végétaux terrestres la rendant particulière). De même, les stations S3, S10 (au centre de la

rade) et S24 (à l'ouest) ont présenté une forte dominance en silts-argiles, comparable à la structure granulométrique de PF3.

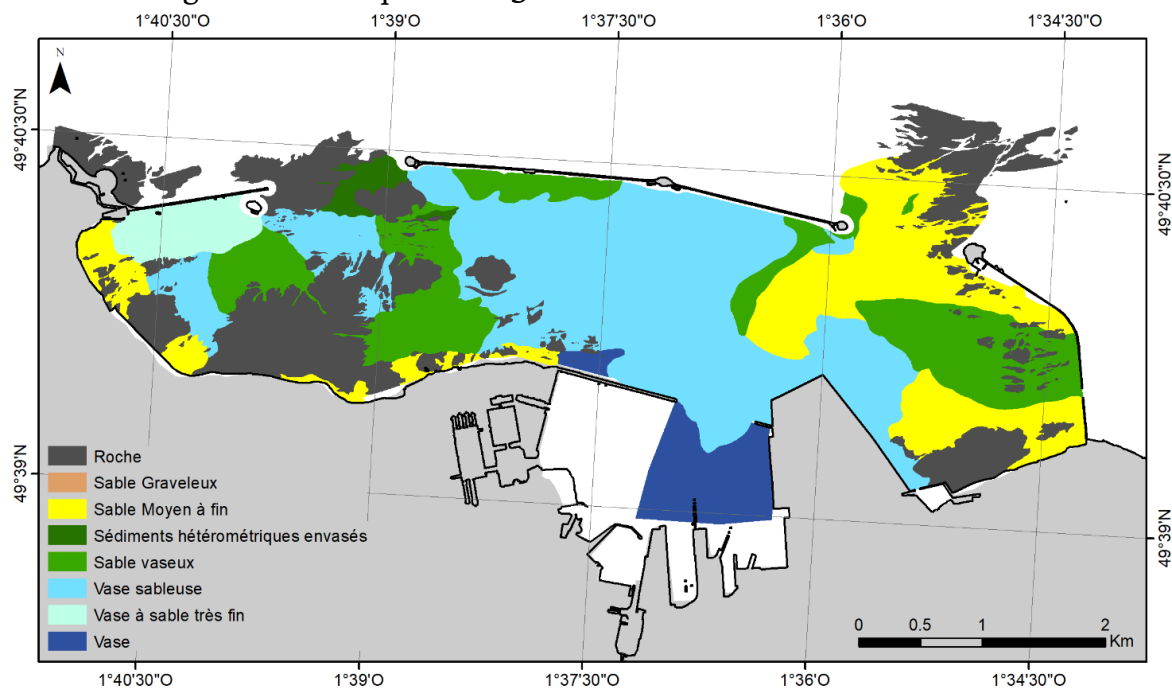


Figure 10 : Carte synthétique de la couverture sédimentaire en rade de Cherbourg après travaux (Baux et al., 2021).

IV.2.1. Macrofaune benthique

IV.2.1.1. Comparaison des compositions faunistiques

Pour rappel, la richesse taxonomique observée dans le port de Flamands est comprise entre 33 et 36 taxons (Tableau 6). En comparaison, la Grande Rade présentait, avant les travaux, une richesse taxonomique comprise entre 20 et 55 puis, après les travaux, entre 15 et 85 taxons (Tableau 11), en lien avec l'augmentation du nombre d'espèces opportunistes par suite de l'envasement généralisé de la Grande Rade. Globalement, le port des Flamands n'apparaît pas moins riche ou plus riche que les stations échantillonnées dans la rade, mais se positionne dans les valeurs moyennes retrouvées à l'échelle de la rade (moyenne de S avant travaux : 33 ; après travaux : 45 et dans le port des Flamands : 44).

Concernant les abondances, celles recensées dans le port des Flamands sont comprises entre 11 225 ind.m⁻² (PF3) et 42 095 ind.m⁻² PF2 ; Tableau 6). Dans la Grande Rade, les valeurs sont comprises entre 1090 ind.m⁻² et 13 990 ind.m⁻² avant travaux et 320 ind.m⁻² à 27 750 ind.m⁻² après travaux (Tableau 11). Les abondances moyennes recensées dans le port des Flamands sont donc nettement supérieures à celles observées dans la Grande Rade (moyenne des abondances : avant travaux : 3 874 ind.m⁻² ; après travaux : 7 375 ind.m⁻² et dans le port des Flamands : 28 402 ind.m⁻²).

Tableau 11 : Comparaison des abondances (ind.m^{-2}) et de la richesse taxonomique (S) observées dans les échantillons de la Grande Rade avant et après travaux. Tableau à comparer avec les valeurs du Tableau 6.

Stations	RdC avant travaux		RdC après travaux	
	S	A (ind.m^{-2})	S	A (ind.m^{-2})
S3	31	2020	68	5 650
S5	39	5130	17	395
S9	38	2795	50	27 750
S10	20	1930	34	3 785
S11	31	2855	36	1 595
S13	28	3170	45	4 860
S14	35	3595	44	10 150
S16	22	1090	35	2 080
S17	30	2560	20	320
S19	41	13990	45	13 285
S21	55	3260	76	6 310
S22	43	4855	50	7 920
S24	22	3115	15	495
S33	-	-	85	14 875
S35	-	-	57	11 155

En termes de composition faunistique, en considérant l'ensemble de la Grande Rade, les espèces dominantes sont, comme pour le port des Flamands (Tableau 12) : *Apseudopsis latreilli* (abondances maximales recensées en S33 après travaux : 11 840 ind.m^{-2}), Maldanidae, (abondances maximales recensées en S19 avant travaux : 2 270 ind.m^{-2}), *Notomastus latericeus* (abondances maximales recensées en S13 après travaux : 890 ind.m^{-2}), et *Spio decorata* (abondances maximales recensées en S13 avant travaux : 685 ind.m^{-2}). On constate que ces espèces sont présentes dans la rade dans le même ordre de grandeur que dans le port des Flamands (Tableau 7), hormis pour le polychète *Spio decorata*, trouvé en plus grande quantité dans le port.

On note que très peu d'*Ampelisca tenuicornis* (amphipode) ont été recensés dans le port des Flamands (185 ind.m^{-2} en PF1), contrairement à la Grande Rade, de même aucun *Apseudes talpa* (tanaïdés) n'a été recensés dans le port des Flamands. Ces deux espèces sont considérées comme étant sensibles à l'enrichissement en matière organique.

Tableau 12 : Moyennes des abondances (ind.m⁻²) des 10 espèces majoritaires à l'échelle de la rade (toutes stations confondues avant et après travaux).

	Moyenne des A (ind.m ⁻²)
<i>Apseudopsis latreillii</i>	2 724
<i>Ampelisca tenuicornis</i>	1 099
Maldanidae	561
<i>Melinna palmata</i>	525
<i>Notomastus latericeus</i>	215
<i>Apseudes talpa</i>	374
<i>Crepidula fornicata</i>	488
<i>Kirkegaardia dorsobranchialis</i>	243
<i>Chaetozone gibber</i>	122
<i>Spio decorata</i>	198

IV.2.1.2. Comparaison de l'état écologique

Dans la rade, de manière générale, on a constaté que les valeurs de H' étaient intermédiaires (entre 0 et H'max) avant et après les travaux (Tableau 13). La classification de pollution, proposée par Vincent et al. (2002) indiquait que les stations étaient majoritairement classées en zone modérément polluée et en zone de transition (Tableau 13). Les stations S33 et S35 (à proximité des nouveaux terre-pleins) étaient classées en tant que zone très polluée, à la suite des travaux d'agrandissement des terre-pleins.

Les indices AMBI calculés expriment que la majorité des stations avant et après travaux sont considérées dans un « bon » état écologique. Toutefois, dans le détail, la proportion des groupes écologiques, permettant le calcul de cet indice a évolué. Ainsi, le groupe écologique III, caractéristique d'un déséquilibre du système, a fortement augmenté dans les stations S5, S13 et S14 localisées au sud-est de la grande rade (autour du nouveau terre-plein).

De même, le BO2A, classe la rade en état écologique « bon » à « excellent », hormis avant les travaux, dans deux stations à l'est de la rade (S16 et S17) qui sont classées en « modéré ».

Tableau 13 : Résultats des calculs de l'indice de Shannon-Wiener (H'), de l'AMBI et du BO2A, avant et après les travaux d'extension portuaires, dans la Grande Rade de Cherbourg.

Stations	H'	H'	AMBI		BO2A	
	Avant travaux	Après travaux	Avant travaux	Après travaux	Avant travaux	Après travaux
S3	2,5	4,0	2,7	2,0	0,08510	0,05225
S5	3,5	3,1	1,2	2,3	0,03031	0,05084
S9	3,4	2,4	2,0	1,1	0,05663	0,00573
S10	2,1	3,2	2,7	2,4	0,04712	0,11939
S11	2,1	2,9	2,3	2,3	0,01490	0,03287
S13	2,8	3,6	2,5	2,7	0,09208	0,06318
S14	3,1	3,5	1,3	2,3	0,02390	0,01107
S16	3,0	3,9	2,8	1,8	0,19477	0,05334
S17	3,3	4,1	2,2	2,0	0,12258	0,02348
S19	3,1	3,2	2,3	1,7	0,03570	0,00749
S21	4,6	4,2	2,3	2,0	0,07004	0,03654
S22	2,2	2,1	2,7	2,5	0,02146	0,00815
S24	2,3	2,7	2,2	2,7	0,05527	0,07086
S33		1,6		2,7		0,00955
S35		1,9		2,5		0,00499

Comparativement au port des Flamands (Tableau 9, Tableau 10, Figure 9), il semblerait que la classification de l'environnement soit globalement la même.

IV.2.1.3. Comparaison des communautés benthiques

D'après les résultats de la CAH (Figure 11), menée sur les données d'abondances recensées dans le port des Flamands et dans la rade de Cherbourg (avant et après travaux), la station PF2 apparaît être statistiquement à part de toutes les autres (dissimilarité à environ 85 % ; Figure 11), ce qui est concordant avec nos précédents résultats, du fait de la particularité de cette station, soumise aux apports continentaux du Trottebec.

A l'inverse, les stations PF1 et PF3 sont regroupées ensemble et semblent proches des stations S22, S35 (avant travaux), S33, S21, S3 (après travaux), S11, S13, S14, S19, S9 (centre et Est de la rade ; groupe 2). Les stations PF1 et PF3 sont éloignées des stations S10 et S3, qui se composent d'une quantité importante de Crépides (Tableau 14) sur un substrat envasé. De même avec la station S24, très particulière, car très envasée (en lien avec la présence d'un gyre qui dépose de la particule fine, à l'ouest de la rade). Il semble également que les stations PF1 et PF3 soient éloignées statistiquement des deux stations S16 et S17, localisée à proximité de la passe de l'Est et de l'herbier à Zostères marine, à l'est de la rade (substrat de sable propre non envasé). A échelle plus fine, la composition faunistique apparaît similaire entre les deux stations du port des Flamands (PF1 et PF3) et deux stations à l'est de la rade (S11 et S13, après travaux), à environ 50 % de similarité (groupe 2 bis).

Les regroupements ainsi mis en évidence ont été testés grâce à une analyse de similarité ANOSIM. Le calcul de l'indice de similarité a mis en évidence une différence significative entre les groupes formés par la CAH ($P=0,79$), ce qui a permis, une analyse de la contribution des espèces permettant de former les groupes (SIMPER). Ce type d'analyse permet d'identifier les espèces qui sont majoritairement responsables des différences observées entre les assemblages.

On observe (Tableau 14) que sept espèces contributrices à plus de 90 % ont permis de rassembler les stations PF1 et PF3 dans le groupe 2. Il s'agit principalement d'amphipodes (toutes hormis *Pseudopolydora sp.* qui est un polychète et *Apseudopsis latreilli* qui est un tanaïdacé). A l'échelle du groupe 2 bis, formé par la CAH (stations PF1, PF3, S11 et S13 après travaux), seules deux espèces sont contributrices à plus de 90 % (*Pseudopolydora sp.* et *Spisula subtruncata*).

Pour la station PF2, à part dans les regroupements de la CAH, 11 espèces contributrices à plus de 90 % sont identifiées, principalement des annélides.

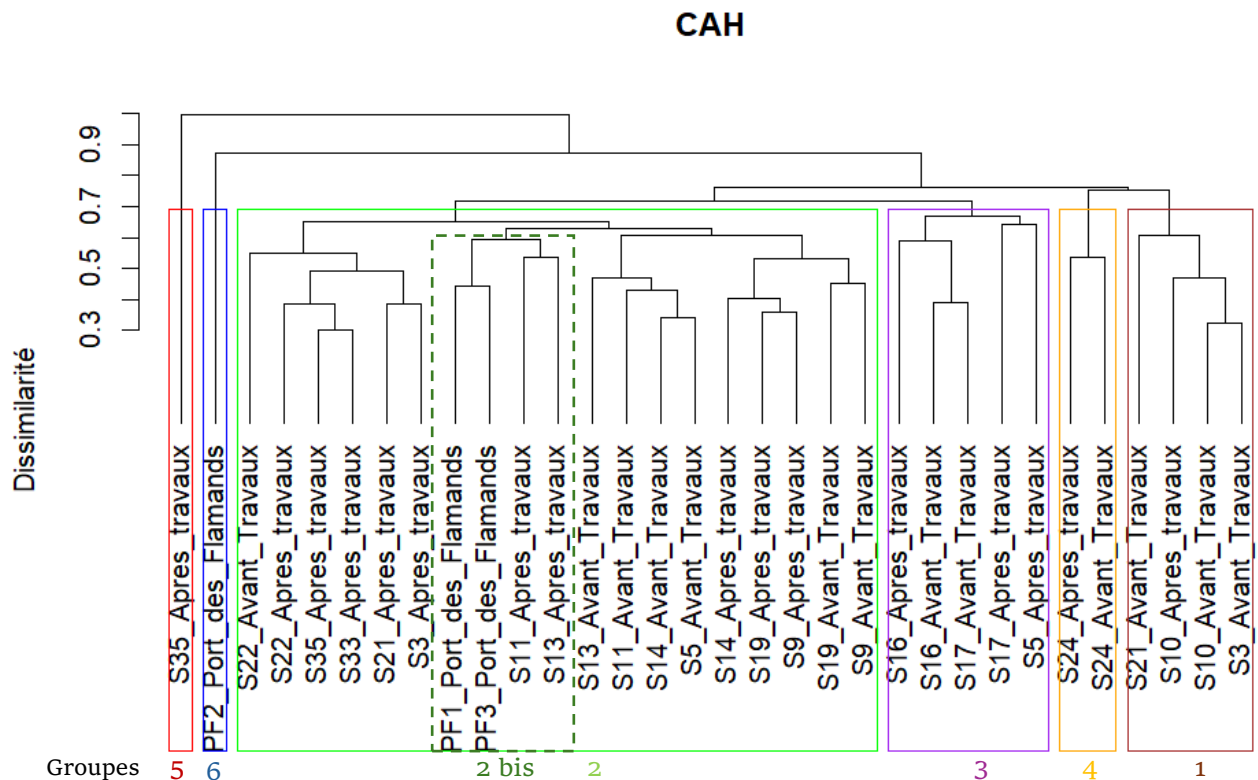


Figure 11 : Résultat de la CAH réalisée sur les données d'abondances des stations de la Grande Rade de Cherbourg avant et après travaux et dans le port des Flamands, standardisées avec la transformation de Hellinger, en utilisant une matrice de dissimilarité de Bray-Curtis et la méthode des groupes moyens. Six groupes sont formés visuellement.

Tableau 14 : Espèces contributrices à plus de 90 % en fonction de chaque groupe formé par la CAH.

Contribution des espèces (%)					
Groupe 1		Groupe 2		Groupe 3	
<i>Crepidula fornicata</i>	95,6	<i>Photis longicaudata</i>	99,2	<i>Paucibranchia bellii</i>	97,4
<i>Eualus cranchii</i>	95,0	<i>Ampelisca tenuicornis</i>	98,6	<i>Centraloecetes kroyeranus</i>	92,3
<i>Orbinia sertulata</i>	93,4	<i>Urothoe sp.</i>	98,3		
<i>Achelia sp.</i>	92,2	<i>Acromegalomma vesiculosum</i>	97,4		
<i>Liocarcinus marmoreus</i>	90,5	<i>Pseudopolydora sp.</i>	96,8		
		<i>Apseudopsis latreillii</i>	95,4		
		<i>Corophium sp.</i>	90,3		
Groupe 4		Groupe 5		Groupe 6	
<i>Chaetozone christiei</i>	97,4	<i>Eurysyllis tuberculata</i>	44,2	<i>Malacoceros sp.</i>	99,9
<i>Terebellides stroemii</i>	93,7			<i>Capitella capitata</i>	99,9
<i>Hippolyte sp.</i>	90,5			<i>Spiophanes bombyx</i>	99,6
				<i>Hediste diversicolor</i>	99,3
				<i>Oligochaeta</i>	99,2
				<i>Arenicola marina</i>	98,8
				<i>Parexogone hebes</i>	98,6
				<i>Nebalia truncosoi</i>	96,7
				<i>Corophium sp.</i>	96,6
				<i>Neanthes acuminata</i>	94,7
				<i>Nematoda</i>	91,0

La dernière cartographie des habitats benthiques réalisée dans la rade de Cherbourg date de 2017 (Baux et al., 2017). L'étude menée à cette époque avait souligné la présence de sept habitats benthiques différents dans la rade grâce à la multiplicité de substrats meubles disponibles pour la macrofaune (Figure 12). Il semblerait, à la vue de l'ensemble des résultats, que les deux stations du port des Flamands PF1 et PF3, soit proches des deux habitats à *Spio decorata* (anciennement *Spio decoratus*) sur sable fin localisés à l'Est de la rade. Ces habitats étaient toutefois décrits comme étant pauvres en matière organique avant les travaux. A la suite des travaux portuaires, la zone Est a montré une augmentation du pourcentage de vase et de particules fines, modifiant probablement la structure des communautés en place avant travaux.

La station PF2, du fait de sa particularité (sous influence continentale forte), pourrait permettre d'ajouter un nouvel habitat parmi ceux observés dans la rade et non observé jusqu'à présent dans la rade.

Toutefois, pour valider ses observations et décrire des habitats concordant avec la classification européenne (EUNIS), il est nécessaire d'obtenir des données complémentaires dans le port des Flamands (bathymétrie, courantologie, faciès sédimentaires à fin échelle).

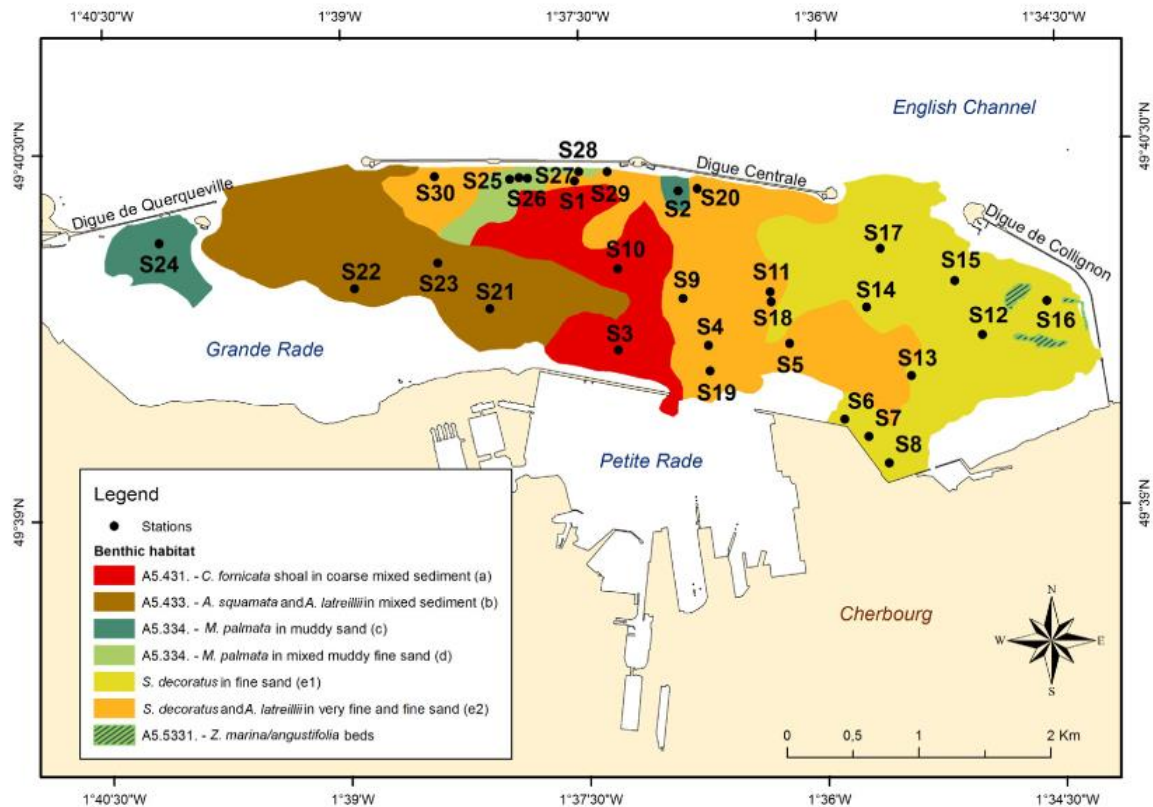


Figure 12 : Cartographie des habitats marins EUNIS de la Grande Rade de Cherbourg, avant travaux (stations échantillonnées entre 2012 et 2015 ; issu de Baux et al., 2017).

V. Discussion

V.1. Le port des flamands : zone riche et anthropisée

A échelle fine, on note des différences entre les trois stations échantillonnées dans le port des Flamands, avec la station PF2 qui, soumise à l'influence du cours d'eau, Le Trottebec, montre des particularités sédimentaires et faunistiques, comparée aux deux autres stations. Cette station présente une importante quantité de matières végétales probablement amenées lors des crues du Trottebec, qui, en se dégradant, provoque localement l'accumulation de matière organique continentale. Le panel d'espèces présentes dans cette zone est très différent des deux autres stations, avec la présence marquée d'Oligochètes, de Nématodes et d'*Hediste diversicolor*. On note même l'absence totale du tanaidacé *Apseudopsis latreilli*, pourtant dominant dans les stations PF1 et PF3. On note que la station PF2 présente la valeur d'abondance totale la plus élevée et possède une proportion colossale d'espèces opportunistes de groupe V (espèces opportunistes de premier ordre qui prolifèrent dans les sédiments réduits et reflètent une étape de pollution maximale avant disparition des invertébrés ; 46 % à cette station), quantité inquiétante et à surveiller, car l'ajout de matière organique apportée par les rejets de l'élevage pourraient, à terme, rendre la zone anoxique et azoïque. Cette proximité de l'embouchure de la rivière et donc de l'influence des apports terrestres, crée un

environnement tout à fait particulier dans cette zone du port des Flamands. Des données complémentaires pourraient permettre d'approfondir ces observations, avec la mise en place de suivis de la qualité de l'eau (salinité, température, turbidité, analyse poussée de l'origine de la matière organique, ...).

En termes de composition sédimentaire et d'espèces, les stations PF1 et PF3 sont plus semblables, mais des différences sont également observées entre elles. En effet, la station PF3, au centre du port présente un enrichissement en matière organique importante et un mode silteux dominant en comparaison de la station PF1. La zone centrale semble donc constituer un « puit » de matière organique, qui par rapport à la station PF2, est cette fois d'origine marine. En termes de composition faunistique, la station PF3 présente, comme pour les deux autres stations, des abondances élevées d'espèces opportunistes, inféodées aux milieux riches en matière organique. L'indice BO2A ne tempore pas cette observation en classant cette station dans un état écologique « mauvais », grade en dessous des deux autres stations, reflétant une proportion importante d'espèces opportunistes par rapport aux espèces sensibles, probablement en lien avec le fait que la valeur d'abondance totale est la plus faible, parmi les trois stations. Il est également important de noter la présence en forte proportion d'espèces de groupe III (espèces tolérantes à une hypertrophisation, naturellement présentes dans les vases mais qui sont signe d'un déséquilibre du système car leur prolifération est liée à l'enrichissement en matière organique) dans cette station, qui induisent le rehaussement de la classification du site par l'indice AMBI et le M-AMBI, en classant la zone en état écologique « bon ».

La station PF1 diffère des deux autres stations au niveau de la composition du substrat, composé de sable fins très peu envasés et pauvres en matière organique, reflétant une zone hydrodynamiquement active, loin de toutes sources d'apports en matière organique.

Elle apparaît plus diversifiée que les autres stations, avec un plus grand nombre d'espèces recensées ainsi qu'une meilleure représentation en mélange des groupes écologiques (notamment avec la présence de proportions importantes d'espèces du groupe II et IV en comparaison des autres stations). Cette composition sédimentaire et faunistique est probablement liée au fait de sa localisation à proximité de la passe, permettant la communication directe avec la Grande Rade, facilitant l'entrée de spécimens larvaires et d'adultes d'espèces de macrofaune benthique.

De manière globale, le port des Flamands apparaît être une zone riche et diversifiée mais avec la présence non négligeable d'un grand nombre d'espèces dites opportunistes, inféodées aux milieux anthropisés et riche en matière organique. D'un point de vue sédimentaire, le port semble être une zone d'accumulation de matière organique et de sédiment fins (sable vaseux). Il est classé en état écologique bon à médiocre par l'AMBI, lorsque l'on considère l'ensemble de la base de données, statuts déclassés par le BO2A, qui catégorise la zone entre médiocre à très mauvais lorsque l'on considère plus précisément le ratio entre les espèces opportunistes et les espèces sensibles. L'indice de Shannon-Wiener (H') classe, quant à lui, le port en état modéré. Toutefois, il est important de noter que la robustesse des indices est moindre lorsque le

nombre de taxons échantillonnés est réduit (ce qui est notre cas), ou lorsque les communautés sont dominées par certains taxons comme les Nématodes (Muniz *et al.*, 2005), ce qui est le cas en PF2 (Tableau 7). De plus, les problèmes de classification des espèces dans un groupe en particulier peut également être source d'erreurs et diffère d'un site à l'autre et reste discuté au sein de la communauté scientifique, comme pour l'espèce *A. latreilli* parfois classée comme espèce sensible et parfois comme espèce opportuniste.

V.2. Positionnement du port des Flamands au sein de la Grande Rade

De nos jours, la description et la classification des habitats benthiques constituent la première étape dans la gestion des écosystèmes marins (Dauvin *et al.*, 1994 ; Dauvin, 1997, 2002). Initié en 1991, l'inventaire « ZNIEFF-Marine » (Zones Naturelles d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique) vise à identifier des zones marines basées sur des habitats remarquables, intégrant une notion de fonctionnalité (alimentation, reproduction, etc.) ainsi que la présence d'espèces ou de combinaisons d'espèces (benthos, poissons, oiseaux et mammifères) ayant une grande valeur patrimoniale naturelle. En Normandie, cet inventaire est tout d'abord basé sur les habitats benthiques car le critère de « présence d'espèces » pris isolément n'est pas suffisamment discriminant pour délimiter les périmètres. Les communautés de sables fins dans la partie orientale de la Rade sont reconnues comme des habitats patrimoniaux naturels. 62 espèces présentes dans ces habitats ont été considérées comme « déterminantes » pour les habitats benthiques en Normandie. Parmi elles, 56 % ont été observées lors des campagnes de surveillance menées dans la Rade (Baux *et al.*, 2017). De plus, les sables fins vaseux avec *Melinna palmata* dans la rade de Cherbourg sont l'un des habitats déterminants utilisés pour l'élaboration de l'inventaire ZNIEFF-Marine en Normandie (Baffreau *et al.*, 2015). La rade a été acceptée comme zone ZNIEFF-Marine et deux sites à l'intérieur en Zones d'Intérêt Biologique et Ecologique Majeur, ont été proposées pour protéger la partie orientale de la rade et l'herbier de *Zostera marina*. Les herbiers de zostères ont d'ailleurs été mentionnés comme des habitats en déclin ou menacés sur la liste OSPAR. Cet inventaire patrimonial nécessite des données récentes pour créer de nouvelles zones et confirmer et mettre à jour les anciennes zones. Ainsi, des échantillonnages sont nécessaires pour améliorer nos connaissances et la gestion future dans un contexte d'activités humaines croissantes. La présente étude contribue à enrichir nos connaissances des communautés et habitats benthiques du Nord-Cotentin.

La comparaison de la composition faunistique entre la Grande Rade et le port des Flamands a mis en évidence un nombre d'espèces moyen similaire mais des abondances nettement plus élevées dans le port des Flamands que dans la Grande Rade, que ce soit avant ou après les travaux d'extension portuaires à l'Est de la rade. Le port des Flamands apparaît environ quatre fois plus diversifié que la Grande Rade (en considérant les valeurs les plus récentes de la rade, après travaux). Il est à noter que le calcul du différentiel de richesse taxonomique et d'abondance avant et après travaux avait mis en

évidence la perte drastique d'espèces sur les stations à l'Est de la rade, à proximité des nouveaux terre-pleins portuaires et dans les zones de dragage (Baux et al., 2022).

De plus, il semble que les communautés benthiques observées dans le port des Flamands soient similaires à celles observées à l'Est de la rade (plutôt que celles à l'Ouest ou au centre). Il se pourrait que la communication, *via* la passe entre le port des Flamands et la Grande Rade, permette l'échange d'individus adultes et larvaires, qui s'installent, trouvant des conditions de vie adéquate (même type de substrat que dans la rade, ...). Le port des Flamands est soumis à l'influence directe de la partie Est de la rade, *via* les courants entrants dans le port. En effet, l'étude hydrodynamique réalisée précédemment à l'échelle de la grande rade (Poizot et Méar, 2023) souligne que les courants de marée résiduels (quel que soit le marnage) sont orientés vers l'intérieur du port. En période de crue du Trottebec, les eaux douces, moins denses, restent à la surface de la colonne d'eau et sont expulsées vers la zone côtière et la plage occidentale de Collignon. Les vents dominants de S-O favorisent l'expulsion de ces eaux douces tandis que les vents de N-E la contrarie.

De même, si l'on considère cette influence de l'Est de la rade, durant les travaux d'extension portuaires réalisés à proximité de la passe du port des Flamands, il est envisageable que l'impact engendré par ces travaux (augmentation du pourcentage de vase, diminution des espèces sensibles, modification des habitats benthiques) ait entraîné une répercussion jusque dans le port des Flamands, apportant de la particule fine qui se serait déposée et aurait permis l'installation d'une faune opportuniste. Toutefois, l'absence de données dans le port des Flamands avant cette présente étude, ne permet pas de détailler plus précisément le lien entre les communautés actuellement présentes dans le port et celles de la Grande Rade. Il pourrait être intéressant de réaliser des prélèvements par carottier, afin d'établir l'origine des particules fines pour valider ou non cette hypothèse.

D'autre part, seule la station PF2 apparaît très différente de ce qui est connu à ce jour dans la rade. La communauté benthique installée dans cette zone, soumise aux apports continentaux du Trottebec pourrait constituer un nouvel habitat benthique qui viendrait s'ajouter aux 7 habitats déjà décrits dans la rade. Toutefois, des données complémentaires sont nécessaires pour valider ou invalider cette observation (bathymétrie, faciès sédimentaire à l'échelle du port, courantologie...).

V.3. Conclusion et recommandations pour une future gestion

Un état initial du substrat et des communautés de macrofaune benthique du port des Flamands, localisé à l'Est de la rade de Cherbourg, a été établi. Il a été mené afin de représenter un état initial menée préalable à l'installation des bassins d'élevage de smolts à terre. En effet, cet élevage va induire de futurs rejets d'eau chargée en matière organique (fèces et reste de nourriture) dans la partie Sud-Ouest du port de Flamands. Ces rejets sont susceptibles d'affecter l'environnement du port.

L'inventaire de la macrofaune benthique a révélé des profils variés entre les stations, soumises à deux influences majeures : une influence marine *via* la communication avec la Grande Rade et une influence continentale *via* les crues de la

rivière Trottebec. Globalement, une forte densité d'individus et d'espèces est observée mais il semblerait que les communautés en place soient déjà composées majoritairement d'espèces opportunistes inféodés aux milieux riches en matière organique.

Les proportions de vase associée à du carbone organique relevées dans le port des Flamands (notamment en PF2 et PF3) indiquent une sédimentation importante de la matière organique et des particules fines, dans cette zone. Considérant les prévisions de relargages quotidiennes qui seraient d'environ 2 000 m³ d'eau chargée en matière organique via les canalisations d'évacuation des eaux de pluie (Figure 1), il apparaît nécessaire de mettre en place un suivi environnemental dans le port. Ce suivi sera basé sur deux points essentiels : 1) le suivi du potentiel envasement et de l'enrichissement en matière organique de la zone (stations PF2 et PF3) éventuellement à une fréquence semestrielle (prélèvements et analyses peu chronophages) et 2) la surveillance de la proportion d'espèces opportunistes associées à l'enrichissement en matière en organique et de veiller à garder l'équilibre du système pour ne pas basculer dans un système anoxique et azoïque. C'est plus particulièrement le cas au niveau de la stations PF2 où la forte proportion d'espèces opportunistes de groupe V pourrait ne pas supporter pas un enrichissement supplémentaire en matière organique sans atteindre un point de rupture du système. Cette surveillance pourrait-être envisagée à tous les ans, dans un premier temps et en cas de stabilisation des communautés en place, le suivis pourrait-être réalisé tous les cinq ans au maximum.

D'autre part, un suivi bathymétrique au sondeur monofaisceau semble indispensable pour compléter les connaissances, car il n'existe aucune donnée sur ce sujet, actuellement dans le port des Flamands. Une imagerie des fonds permettrait de mieux comprendre le fonctionnement du système et notamment de faire le lien avec les zones d'accumulation de matière organique.

Indépendamment de ces suivis à grande échelle, des suivis réguliers de la qualité de l'eau sont préconisés, à proximité de la zone de rejet, afin de pouvoir anticiper les éventuelles modifications de la qualité de l'eau (salinité, turbidité, conductivité, température, chlorophylle a, ...). Idéalement un suivi saisonnier est préconisé.

VI. Annexes

VI.1. Photographies des bennes



*Annexe 1 : Photographies des trois échantillons en PF1, prises à bord du navire.
Prélèvement à la benne VanVeen 0,1m².*



PF2A



PF2B



PF2C

Annexe 2 : Photographies des trois échantillons en PF2, prises à bord du navire.
Prélèvement à la benne VanVeen 0,1m².



*Annexe 3 : Photographies des trois échantillons en PF3, prises à bord du navire.
Prélèvement à la benne VanVeen 0,1m².*

VI.2. Liste d'espèces et abondances associées

Annexe 4 : Liste des espèces et abondances associées pour les trois stations échantillonnées dans le port des Flamands en novembre 2023

	Ind.0,2m ²			Ind.m ²		
	PF1	PF2	PF3	PF1	PF2	PF3
<i>Ampelisca brevicornis</i>	37			185	0	0
<i>Amphipholis squamata</i>	12		19	60	0	95
<i>Aora typica</i>	7			35	0	0
<i>Apseudopsis latreillii</i>	2179	21	959	10895	105	4795
<i>Arenicola marina</i>	1	9	1	5	45	5
<i>Astacilla damnoniensis</i>	3		1	15	0	5
<i>Capitella capitata</i>	21	1531	10	105	7655	50
<i>Chaetozone gibber</i>	1			5	0	0
<i>Cirriformia tentaculata</i>	1	41	16	5	205	80
<i>Corophium sp.</i>	23	34		115	170	0
<i>Dexamine spinosa</i>			1	0	0	5
<i>Diastylis sp.</i>	1			5	0	0
<i>Dipolydora giardi</i>	106			530	0	0
<i>Edwardsiidae</i>			1	0	0	5
<i>Erichtionius punctatus</i>	42	48	73	210	240	365
<i>Eteone flava</i>		1		0	5	0
<i>Galathowenia oculata</i>	124		23	620	0	115
<i>Gammaropsis maculata</i>			6	0	0	30
<i>Glycera lapidum</i>	1			5	0	0
<i>Golfingia sp.</i>	1			5	0	0
<i>Hediste diversicolor</i>	19	1725	225	95	8625	1125
<i>Hilbigneris gracilis</i>	1			5	0	0
<i>Idotea balthica</i>			1	0	0	5
<i>Iphinoe serrata</i>	21	6	4	105	30	20
<i>Kroyera carinata</i>	1	8		5	40	0
<i>Lanice conchilega</i>	7			35	0	0
<i>Laonome kroyeri</i>	7		3	35	0	15
<i>Leucothoe incisa</i>	5			25	0	0
<i>Leucothoe procera</i>	4			20	0	0
<i>Liljeborgia pallida</i>		1		0	5	0
<i>Lophogaster typicus</i>	2			10	0	0
<i>Loripes orbiculatus</i>	22	1		110	5	0
<i>Lucinoma borealis</i>	33			165	0	0
<i>Lumbrineris latreilli</i>	3	1		15	5	0
<i>Lutraria angustior</i>	1			5	0	0
<i>Malacoceros</i>	1	1371	12	5	6855	60
Maldanidae	1198	97	22	5990	485	110
<i>Marphysa sp.</i>	1			5	0	0
<i>Melinna palmata</i>	37		195	185	0	975
<i>Neanthes acuminata</i>	4	14	11	20	70	55
<i>Nebalia troncosoi</i>	11	32	2	55	160	10
Nematoda	94	75	42	470	375	210
<i>Nephtys caeca</i>	4		1	20	0	5
<i>Nephtys cirrosa</i>	8			40	0	0
<i>Nephtys hombergii</i>	1		1	5	0	5
<i>Notomastus latericeus</i>	622	7	331	3110	35	1655

	Ind.0,2m ⁻²			Ind.m ⁻²		
	PF1	PF2	PF3	PF1	PF2	PF3
<i>Nototropis falcatus</i>		1		0	5	0
<i>Nucula nitidosa</i>	1		7	5	0	35
<i>Oligochaeta</i>	124	2360	228	620	11800	1140
<i>Parexogone hebes</i>	15	59	1	75	295	5
<i>Pariambus typicus</i>	8		1	40	0	5
<i>Peringia ulvae</i>			1	0	0	5
<i>Periculodes longimanus</i>	3	7		15	35	0
<i>Philocheras trispinosus</i>	1			5	0	0
<i>Phoronis psammophila</i>	471	14	4	2355	70	20
<i>Phtisica marina</i>	38	4	16	190	20	80
<i>Phyllodoce mucosa</i>	3			15	0	0
<i>Poecilochaetus serpens</i>	2			10	0	0
<i>Polybius navigator</i>	1	3	13	5	15	65
<i>Polycirrus sp.</i>	3			15	0	0
<i>Pseudopolydora antennata</i>	741		4	3705	0	20
<i>Scoloplos armiger</i>		1		0	5	0
<i>Spio decorata</i>	217	542	5	1085	2710	25
<i>Spiophanes bombyx</i>	21	396	1	105	1980	5
<i>Spisula subtruncata</i>	1			5	0	0
<i>Sthenelais boa</i>	2	1		10	5	0
<i>Thyasira flexuosa</i>	39	2	4	195	10	20
<i>Tritia reticulata</i>	1			5	0	0
<i>Tryphosites longipes</i>	3			15	0	0
<i>Websterinereis glauca</i>	2			10	0	0
<i>Zeuxo holdichi</i>	13	4		65	20	0

VI.2. Transformation des données

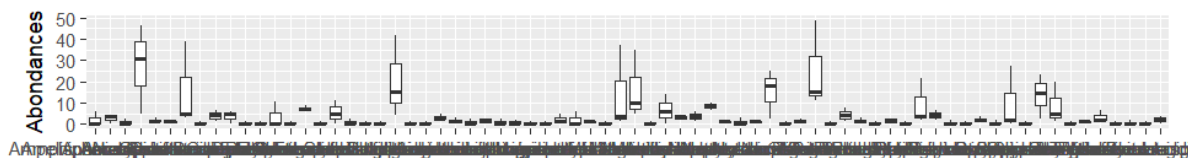
La transformation en racine carrée (Annexe 5 et Annexe 6, A) modifie les valeurs d'abondance tout en réduisant l'impact des valeurs élevées. Appliquée à nos données, on observe toujours une grande variabilité pour certaines espèces, mais la transformation semble avoir un effet sur la réduction des valeurs extrêmes. Elle a permis la standardisation des données tout en tenant compte des proportions des espèces. On observe une réduction de la variabilité dans les abondances, avec des valeurs beaucoup plus homogènes. Cette transformation a permis de réduire l'effet des valeurs extrêmes (certaines espèces étant très abondantes). Pour les analyses multivariées (CAH et nMDS), la transformation Hellinger est mieux adaptée aux données écologiques contenant de nombreux zéros et permet de mieux capturer les relations de distance entre les stations et les espèces.

La transformation en LogX+1 (Annexe 5 et Annexe 6, C) est également populaire pour les données avec des valeurs très inégales, comme dans les échantillons du port des Flamands (grandes différences entre les stations), car elle compresse les écarts entre les faibles et fortes abondances. Avec le jeu de données du port des Flamands, cette méthode semble lisser les différences tout en conservant certaines valeurs élevées, mais de manière moins extrême que la transformation en racine carrée.

Comparaison des transformations

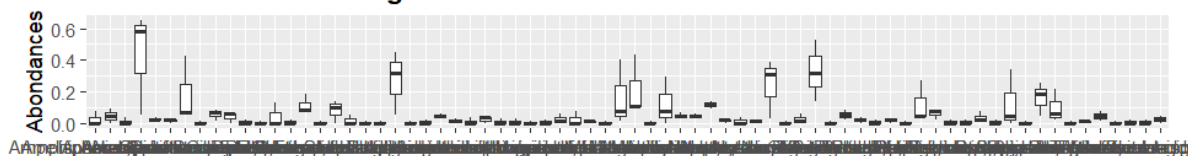
A

Transformation en racine carrée



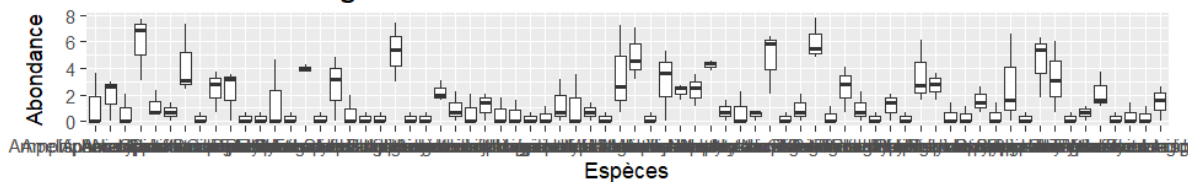
B

Transformation Hellinger



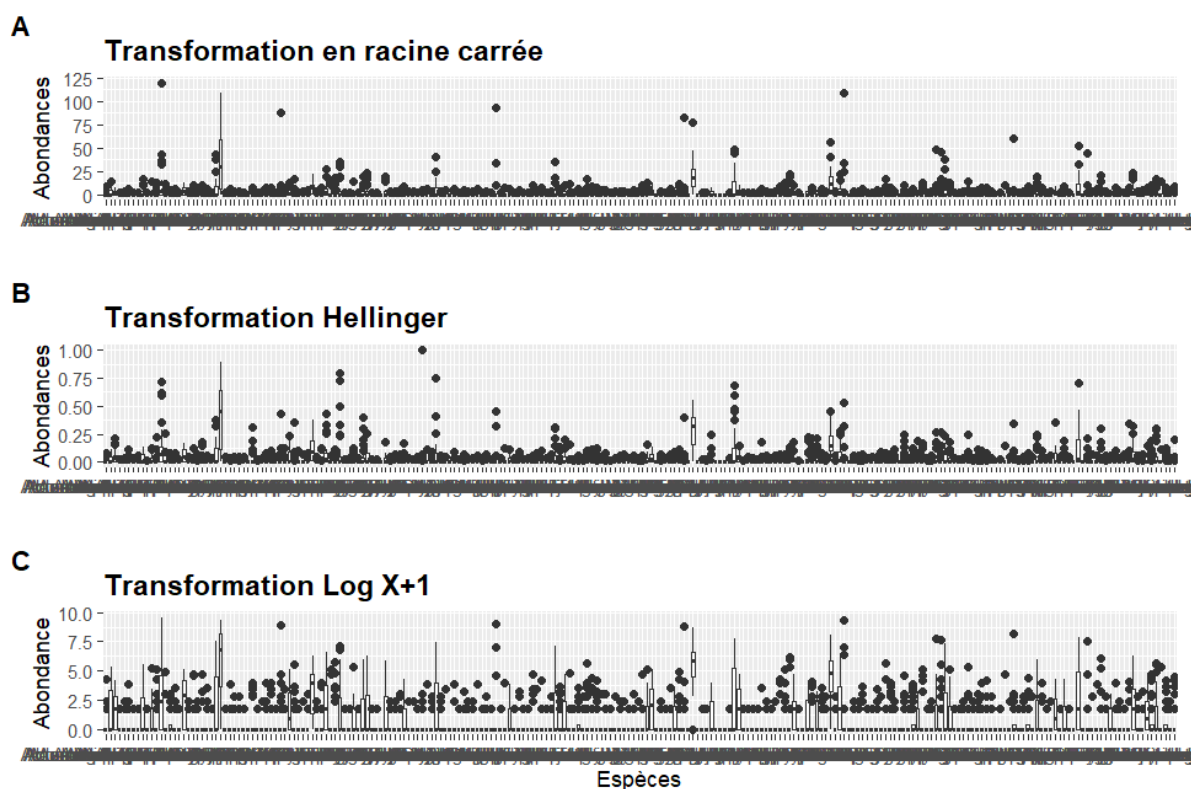
C

Transformation Log X+1



Annexe 5 : Comparaison des trois transformations de données pour les analyses multivariées (CAH et nMDS) sur les données d'abondances de macrofaune benthique dans le port des Flamands. En abscisses, l'ensemble des espèces de macrofaune identifiées dans les trois.

Comparaison des transformations



Annexe 6 : Comparaison des trois transformations de données pour les analyses multivariées (CAH et nMDS) sur les données d'abondances de macrofaune benthique issues du fichier de comparaison de la rade et du port des Flamands. En abscisses, l'ensemble des espèce.

VII. Bibliographie citée dans le rapport

- Baux, N. (2015) Etudes des communautés benthiques de la rade de Cherbourg. Rapport de Master, 2. *Univ. Sci. Technol. Lille*, Lille.
- Baux, N., Méar, Y., Poizot, E., Gregoire, G. and Murat, A. (2021) Influence des travaux de construction du terre-plein EMR en rade de Cherbourg-en-Cotentin (Sédimentologie). Comparaison 2012-2018. *LUSAC/Cnam-Intechmer*.
- Baux, N., Pezy, J.-P., Bachelet, Q., Baffreau, A., Méar, Y., Poizot, E., Guyonnet, B. and Dauvin, J.-C. (2017) Soft bottom macrobenthic communities in a semi-enclosed Bay bordering the English Channel: The Rade de Cherbourg. *Regional Studies in Marine Science*, 9, 106–116.
- Borja, A., Franco, J. and Pérez, V. (2000) A Marine Biotic Index to Establish the Ecological Quality of Soft-Bottom Benthos Within European Estuarine and Coastal Environments. *Marine Pollution Bulletin*, 40, 1100–1114.
- Borja, A. (2004) The biotic indices and the Water Framework Directive: the required consensus in the new benthic monitoring tools. *Marine Pollution Bulletin*, 48, 405–408.
- Caglar, S. and Albayrak, S. (2012) Assessment of ecological quality status of Küçükçekmece Bay (Marmara Sea) by applying BENTIX, AMBI, BOPA and BO2A biotic indexes. *Mediterranean Marine Science*, 13, 198–207.
- Clarke, K. (1993) Nonparametric Multivariate Analyses of Changes in Community Structure. *Austral Ecology*, 18, 117–143.
- Dauvin, J.-C. and Ruellet, T. (2009) The estuarine quality paradox: Is it possible to define an ecological quality status for specific modified and naturally stressed estuarine ecosystems? *Marine Pollution Bulletin*, 59, 38–47.
- Dauvin, J.-C. (2018) Twenty years of application of Polychaete/Amphipod ratios to assess diverse human pressures in estuarine and coastal marine environments: A review. *Ecological Indicators*, 95, 427–435.
- De-la-Ossa-Carretero, J.A. and Dauvin, J.-C. (2010) A comparison of two biotic indices, AMBI and BOPA/BO2A, for assessing the Ecological Quality Status (EcoQS) of benthic macro-invertebrates. DOI : 10.1285/i1825229Xv4n1p12.
- Gregoire G., Méar Y., Poizot E., Marion C., Murat A. and Hebert B. (2019) The morpho-sedimentology of an artificial roadstead (Cherbourg, France), *Journal of Maps*, 15:2, 677–685. DOI : 10.1080/17445647.2019.1642247.
- Kruskal, J.B. (1964) Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis. *Psychometrika*, 29, 1–27.
- Méar, Y., Poizot, E. and Baux, N. (2020) Influence des travaux de construction du terre-plein EMR en rade de Cherbourg-en-Cotentin. Bathymétrie, comparaison 2012 et 2018. *LUSAC-Cnam/Intechmer*.
- Muniz, P., Venturini, N., Pires-Vanin, A.M.S., Tommasi, L.R. and Borja, Á. (2005) Testing the applicability of a Marine Biotic Index (AMBI) to assessing the ecological quality of soft-bottom benthic communities, in the South America Atlantic region. *Marine Pollution Bulletin*, 50, 624–637.

- Muxika, I., Ibaibarriaga, L., Sáiz, J.I. and Borja, Á. (2007) Minimal sampling requirements for a precise assessment of soft-bottom macrobenthic communities, using AMBI. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 349, 323–333.
- Poizot, E. and Méar, Y. (2023) Dynamique des rejets d’effluents, issus de la production hors-sol de salmonidés, à la sortie du port des Flamands, en rade de Cherbourg. *LUSAC, Cnam/Intechmer*.
- Shannon, C.E. (1948) A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379–423.
- Sigovini, M., Keppel, E. and Tagliapietra, D. (2013) M-AMBI revisited: looking inside a widely-used benthic index. *Hydrobiologia*, 717, 41–50.
- Vincent, C., Heinrich, H., Edwards, A., Nygaard, K. and Haythornthwaite, J. (2002) Guidance on typology, reference conditions and classification systems for transitional and coastal waters. CIS working group, 2, 119. In: *2.4HOL6 FINAL DRAFT*, 2, 119 pp.
- Wagenaar, W.A. and Padmos, P. (1971) Quantitative interpretation of stress in Kruskal’s multidimensional scaling technique. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 24, 101–110.