SUIVI BIOLOGIQUE DU SITE DE RECHARGE DE PLAGE DE POINTE-AUX-OUTARDES

2024 — Année 3 après recharge

biome
laboratoire d'écologie et de biodiversité aquatique
Université Laval

14 février 2025

Équipe de terrain 2024 :
Maude Arseneault
Floriane Barot
Cindy Grant
Élisa Lefevre
Laurie Izard
Benjamin Monnier
Sonia Pagé
Alexis Pelletier Côté
Alice Pouliot
Jessica Verreault

Conception des protocoles :
Cindy Grant

Traitement des échantillons et saisie de données :
Lucy Adilen Fernandez Paz
Floriane Barot
Maude Couture
Diane Gagnon
Benjamin Monnier
Sonia Pagé
Rosalee Strassburg-Huot

Taxonomiste de référence :
Lisa Treau de Coeli

Statistiques :
Cindy Grant

Rédaction du rapport :
Gabrièle Deslongchamps
Cindy Grant

Projet réalisé sous la supervision de Philippe Archambault, professeur, Université Laval

Table des matières

1 INTRODUCTION 7

1.1 Mise en contexte 7
1.2 Objectifs et hypothèses 7

2 MATÉRIEL ET MÉTHODE 8

2.1 Site d'étude 8
2.2 Prélèvements 9
2.3 Traitement en laboratoire 10
2.3.1 Caractérisation des sédiments 10
2.3.2 Caractérisation de la faune benthique 10
2.4 Approche statistique 10

3 RÉSULTATS 2024 – ANNÉE 3 APRÈS RECHARGE 12

3.1 Caractérisation des sédiments 12
3.2 Caractérisation des assemblages benthiques 17
3.2.1 Analyses univariées 20
3.2.2 Analyses multivariées 30

4 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ANNÉE 3 APRÈS LES TRAVAUX DE RECHARGE 39

5 COMPILATION DES PRINCIPAUX DES RÉSULTATS DU SUIVI BIOLOGIQUE 39

6 RÉFÉRENCES 42

ANNEXE 1. Taxons inventoriés à Pointe-aux-Outardes en 2024 avec leur abondance relative (Ab rel, %), leur biomasse relative (Bio rel, %) et leur coefficient de fréquence (CF, %). **..... 46**

Liste des figures

Figure 1. Localisation des 6 sites étudiés à Pointe-aux-Outardes dans le cadre du projet de suivi biologique du site de recharge de plage : référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE). 8

Figure 2. Contenu en matière organique des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour l'interaction entre les facteurs profil (■ = rive, ■ = équilibre et ■ = large) et sites : référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE). 12

Figure 3. Contenu en matière organique des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour l'interaction entre les facteurs années (2021 en ■, 2022 en ■, 2023 en ■ et 2024 en ■) et sites : référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE). 13

Figure 4. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (■ = rive, ■ = équilibre et ■ = large) au site référence ouest (RfO) de Pointe-aux-Outardes en 2024. 14

Figure 5. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (■ = rive, ■ = équilibre et ■ = large) au site sous influence ouest (SiO) de Pointe-aux-Outardes en 2024. 14
Figure 6. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (■ = rive, ■ = équilibre et ■ = large) au site recharge ouest (ReO) de Pointe-aux-Outardes en 2024. 15
Figure 7. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (■ = rive, ■ = équilibre et ■ = large) au site recharge est (ReE) de Pointe-aux-Outardes en 2024. 15
Figure 8. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (■ = rive, ■ = équilibre et ■ = large) au site sous influence est (SiE) de Pointe-aux-Outardes en 2024. 16
Figure 9. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (■ = rive, ■ = équilibre et ■ = large) au site référence est (RfE) de Pointe-aux-Outardes en 2024. 16
Figure 10. Abondance relative (%) des invertébrés benthiques prélevés à Pointe-aux-Outardes en 2021 (■), 2022 (■), 2023 (■) et 2024 (■). 18
Figure 11. Biomasse relative (%) des invertébrés benthiques prélevés à Pointe-aux-Outardes en 2021 (■), 2022 (■), 2023 (■) et 2024 (■). 19
Figure 12. Courbes d'accumulation d'espèces – nombre de taxons inventoriés en fonction du nombre d'échantillons pour les travaux faits à Pointe-aux-Outardes en 2021 (gris), 2021-2022 (orange), 2021-2022-2023 (bleu) et 2021-2022-2023-2024 (jaune). 20
Figure 13. Richesse spécifique des assemblages benthiques (nombre de taxons/station, moyenne ± erreur-type) aux sites référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE) en 2021 (■), 2022 (■), 2023 (■) et 2024 (■) pour les profils près de la rive (■), à l'équilibre (■) et vers le large (■). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey pour l'interaction entre les facteurs année et profil aux sites RfO, ReO et ReE, pour les facteurs année et profil distinctement aux sites SiO, SiE et RfO. 25
Figure 14. Abondance totale (nombre total d'individus/m^2, moyenne ± erreur-type) aux sites référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE) en 2021 (■), 2022 (■), 2023 (■) et 2024 (■) pour les profils près de la rive (■), à l'équilibre (■) et vers le large (■). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey pour l'interaction entre les facteurs année et profil aux sites RfO, SiO, ReO, ReE et RfE, pour les facteurs année et profil distinctement au site SiE. 26
Figure 15. Biomasse totale (g/m^2, moyenne ± erreur-type) aux sites référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE) en 2021 (■), 2022 (■), 2023 (■) et 2024 (■)pour les profils près de la rive (■), à l'équilibre (■) et vers le large (■). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey pour l'interaction entre les facteurs année et profil aux sites RfO, ReO et ReE, pour le facteur profil aux sites SiO, SiE et RfE. 27
Figure 16. Indice d'équitabilité de Pielou (moyenne ± erreur-type) aux sites référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE) en 2021 (■), 2022 (■), 2023 (■) et 2024 (■) pour les profils près de la rive (■), à l'équilibre (■) et vers le large (■). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey pour

l'interaction entre les facteurs année et profil aux sites SiO, SiE et ReE, pour les facteurs année et profil distinctement aux sites RfO et RfE, puis pour le facteur profil au site ReO. 28
Figure 17. Indice de diversité de Shannon-Wiener (moyenne ± erreur-type) aux sites référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE) en 2021 (■), 2022 (■), 2023 (■) et 2024 (■) pour les profils près de la rive (■), à l'équilibre (■) et vers le large (■). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey pour l'interaction entre les facteurs année et profil aux sites RfO, RfE, SiE et ReE, pour les facteurs année et profil distinctement aux sites SiO et ReO. 29

Liste des tableaux

Tableau 1. Identifiants et descriptions des sites choisis pour le suivi environnemental à la plage de Pointe-aux-Outardes 9
Tableau 2. Paramètres échantillonnés ainsi que l'unité et la méthode d'échantillonnage utilisée. 9
Tableau 3. Résultats des analyses de variance (ANOVA) testant l'effet de l'année, du site, du profil et leurs interactions sur les caractéristiques univariées des assemblages benthiques soit la richesse spécifique, l'abondance, la biomasse, l'indice d'équitabilité de Pielou (J') et l'indice de diversité de Shannon-Wiener (H'). 21
Tableau 4. Résultats des analyses de variance multivariées par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du site, du profil et leurs interactions sur les abondances des assemblages d'invertébrés benthiques de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données d'abondance brutes et sur des données transformées en présence/absence. 30
Tableau 5. Résultats des analyses de variance multivariées par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du site, du profil et leurs interactions sur les biomasses des assemblages d'invertébrés benthiques de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données de biomasse transformées en racine quatrième. 30
Tableau 6. Résultats des analyses de variance multivariées par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du profil et leur interaction sur les abondances des assemblages d'invertébrés benthiques du site recharge est (ReE) de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données d'abondance transformées en racine quatrième. 33
Tableau 7. Résultats des analyses de variance multivariées par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du profil et leur interaction sur les abondances des assemblages d'invertébrés benthiques du site recharge ouest (ReO) de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données d'abondance transformées en racine quatrième. 34
Tableau 8. Résultats des analyses de variance multivariées par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du profil et leur interaction sur les abondances des assemblages d'invertébrés benthiques du site sous influence est (SiE) de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données d'abondance transformées en racine quatrième. 35
Tableau 9. Résultats des analyses de variance multivariées par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du profil et leur interaction sur les abondances des assemblages d'invertébrés

benthiques du site sous influence ouest (SiO) de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données d'abondance transformées en racine quatrième.....36
Tableau 10. Résultats de l'analyse de variance multivariée par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du profil et leur interaction sur les abondances des assemblages d'invertébrés benthiques du site référence est (RfE) de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données d'abondance transformées en racine quatrième.....37
Tableau 11. Résultats des analyses de variance multivariées par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du profil et leur interaction sur les abondances des assemblages d'invertébrés benthiques du site référence ouest (RfO) de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données d'abondance transformées en racine quatrième.....38
Tableau 12. Synthèse des principaux résultats pour chacune des années 2021 à 2024 du suivi biologique de Pointe-aux-Outardes.....40

Liste des acronymes

ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
EGSL	Estuaire et golfe du Saint-Laurent
EMSL	Estuaire maritime du Saint-Laurent
LHE	Ligne des hautes eaux
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MES	Matière en suspension
MO	Matière organique
MPO	Pêches et Océans Canda
MNT	Modèle numérique de terrain

1 Introduction

1.1 Mise en contexte

En lien avec le Cadre de prévention de sinistres, le MSP a financé deux projets majeurs de recharge de plage en 2021, dont celui de la plage de Pointe-aux-Outardes située sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent, à l'extrémité sud de la péninsule de Manicouagan**.** Les berges de Pointe-aux-Outardes, qui s'étendent sur 1,6 km à l'est du quai, sont affectées par l'érosion, notamment causée par les tempêtes successives qui causent des dommages côtiers ainsi que le recul de la falaise.

Dans le but d'amoindrir les impacts négatifs de l'érosion et d'éviter que les dommages ne s'étendent aux résidences et aux infrastructures municipales qui se trouvent au sommet du talus en érosion, une intervention de protection a été réalisée à l'été 2021. Les travaux de recharge ont débuté le 1er juin 2021 et été réalisés à l'est de l'ancien sur une longueur de 1 370 m. Au total, 168 000 m^3 de matériaux granulaires, constitués d'un mélange de sable, de gravier et de cailloux naturels arrondis (diamètre moyen (D_{50})[1] = 10 à 15 mm), ont été mis en place. La recharge devrait pouvoir offrir une résistance de la berge face à l'érosion pendant une trentaine d'années, et ce, sans nécessiter de recharge d'entretien.

1.2 Objectifs et hypothèses

L'objectif principal est de définir l'étendue spatiale et temporelle des travaux de recharge de plage sur les assemblages benthiques. Les objectifs spécifiques et leurs hypothèses sont :

Objectif 1 : Définir l'étendue spatiale des effets de la recharge sur les assemblages benthiques.

Hypothèse 1 : Compte tenu de la modélisation numérique réalisée par Lasalle|NHC (2020), il est prédit que les travaux de recharge auront un impact immédiat et important sur les assemblages benthiques du site de recharge, un impact immédiat modéré aux sites sous influence et aucun impact aux sites référence.

- Les assemblages benthiques (abondance, biomasse, diversité) seront complètement détruits suite aux travaux au site même de la recharge.
- L'abondance, la biomasse et la diversité des assemblages benthiques seront diminuées aux sites sous influence suite aux travaux de recharge.
- L'abondance, la biomasse et la diversité des assemblages benthiques demeureront intactes aux sites référence.

Objectif 2 : Définir l'étendue temporelle des effets de la recharge sur les assemblages benthiques.

Hypothèse 2 : Il est prédit qu'après un certain temps, les assemblages benthiques au site même de la recharge et ceux aux sites sous influence de la recharge retrouveront l'équilibre et seront alors plus ou moins similaires aux assemblages benthiques des sites référence (principe de bioéquivalence).

- L'abondance, la biomasse et la diversité des assemblages benthiques augmenteront significativement dans le temps suite aux travaux au site même de la recharge.

[1] Diamètre médian (ou D_{50}) représente la taille médiane (en mm) pour laquelle 50% des sédiments ont une granulométrie inférieure à la valeur indiquée.

- L’abondance, la biomasse et la diversité des assemblages benthiques augmenteront graduellement dans le temps aux sites sous influence.
- Les assemblages benthiques (abondance, biomasse, diversité) ne varieront pas dans le temps aux sites référence.

Ce rapport dresse le portrait des assemblages benthiques et des caractéristiques des sédiments dans le secteur de Pointe-aux-Outardes trois ans après les travaux de recharge de plage.

2 Matériel et méthode

2.1 Site d'étude

Le suivi biologique à la plage de Pointe-aux-Outardes est effectué aux sites définis en 2021 (**Figure 1**). Tous les sites sont de mêmes dimensions (800 m le long de la rive par 250 m vers le large) :

- les sites recharge sont directement sur la zone de travaux (ReO et ReE)
- les sites sous influence sont à l’intérieur de la zone d’influence prédite (< 1 km), par rapport au quai pour le site ouest (SiO) et par rapport à la zone de travaux pour le site est (SiE)
- les sites référence sont au-delà du double de la zone d’influence prédite (> 2 km), par rapport au quai pour le site ouest (RfO) et par rapport à la zone de travaux pour le site est (RfE).

Le **Tableau 1** rassemble les identifiants de chaque site et leur description. Chaque site a été découpé en blocs lesquels permettent d’inclure l’effet profil de plage, soit la distance de la rive vers le large.



Figure 1. Localisation des 6 sites étudiés à Pointe-aux-Outardes dans le cadre du projet de suivi biologique du site de recharge de plage : référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE).

Tableau 1. Identifiants et descriptions des sites choisis pour le suivi environnemental à la plage de Pointe-aux-Outardes.

Identifiant	Description
RfO	Site référence, au-delà du site sous influence vers l'ouest
SiO	Site adjacent à la recharge vers l'ouest et considéré comme étant sous influence
ReO	Zone de recharge elle-même, site ouest
ReE	Zone de recharge elle-même, site est
SiE	Site adjacent à la recharge vers l'est et considéré comme étant sous influence
RfE	Site référence, au-delà du site sous influence vers l'est

2.2 Prélèvements

Le suivi biologique, débuté en 2021, a été poursuivi en 2022, 2023 et 2024. En 2024, l'échantillonnage s'est déroulé du 2 au 10 juin 2024. Un total de 270 stations d'échantillonnage, réparties dans les sites et tirées aléatoirement, ont été visitées.

À chaque station d'échantillonnage, des mesures et des échantillons ont été prélevés de façon à quantifier les paramètres suivants (**Tableau 2**): classes de tailles des sédiments, contenu en matière organique des sédiments, surface de recouvrement des végétaux (% par espèce), abondance d'organismes benthiques (nombre d'individus/m^2 par espèce) et biomasse humide d'organismes benthiques (g/m^2 par espèce).

Tableau 2. Paramètres échantillonnés ainsi que l'unité et la méthode d'échantillonnage utilisée.

Paramètres mesurés	Unité	Méthode
Classe de taille des sédiments	% par classe de taille de sédiments	Échantillonnage des sédiments de surface
Contenu en matière organique des sédiments	% de matière organique	Échantillonnage des sédiments de surface
Surface de recouvrement des végétaux	% par espèce	Quadrat de 50 x 50 cm
Richesse spécifique du benthos Abondance Biomasse humide	Nombre de taxons/station Nombre d'individus/m^2 Grammes/m^2	Quadrat de 50 x 50 cm et cylindre de 10 cm diamètre

Pour la caractérisation des sédiments, deux échantillons ont été prélevés sur une profondeur de 5 cm. Ces échantillons ont été congelés jusqu'à leur traitement en laboratoire.

La caractérisation de la faune benthique a été réalisée en trois temps. D'abord, l'utilisation d'un quadrat de 50 x 50 cm a permis de déterminer les pourcentages de recouvrement des végétaux. Ensuite, un échantillon de 10 cm de diamètre et 20 cm de profondeur a été prélevé pour la détermination ultérieure de l'assemblage benthique. Cet échantillon a été tamisé sur place sur une maille de 0,5 mm puis préservé dans une solution de formaldéhyde 4%. Enfin, les sédiments sous le quadrat ont été explorés pour en retirer tous les organismes de taille supérieure à 2 mm, notamment les bivalves.

2.3 Traitement en laboratoire

2.3.1 Caractérisation des sédiments

Pour la détermination du contenu en matière organique, les sédiments ont été séchés (70°C, minimum 48 heures ou jusqu'à l'obtention d'un poids constant), puis brûlés (550°C pendant 6 heures). La différence de poids avant et après le brûlage exprime la portion de matière organique contenue dans l'échantillon et les résultats sont exprimés en % de matière organique par échantillon.

Les analyses granulométriques ont été faites par colonne de tamis, sur des échantillons préalablement séchés à 70°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Les résultats sont exprimés en % par classe de taille de sédiments par échantillon et la classification utilisée des sédiments est inspirée de celle de Wentworth (1922).

2.3.2 Caractérisation de la faune benthique

Au laboratoire, les échantillons de benthos ont été triés sous loupe binoculaire puis tous les organismes ont été identifiés au plus bas niveau taxonomique possible, dénombrés et pesés (biomasse humide par espèce).

Les taxons listés dans la base de données ont été validés à l'aide du World Register of Marine Species (WoRMS Editorial Board 2023). Les espèces pélagiques ont été retirées de la base de données (copépodes cyclopoides et calanoides) ainsi que les larves d'insectes. Les données issues des carottes (échantillonnage 10 cm de diamètre, tamisage entre 0,5 mm et 2 mm) et celles issues des quadrats (échantillonnage 50 $\times$ 50 cm, tamisage $\geq$ 2 mm) ont été ramenées par mètre carré puis additionnées.

2.4 Approche statistique

Le plan d'échantillonnage pour l'année 3 du projet compte 3 facteurs : le facteur *Année* compte 4 niveaux (2021, 2022, 2023, 2024), le facteur *Site* compte 6 niveaux (RfO, SiO, ReO, ReE, SiE, RfO) et facteur *Profil* compte 3 niveaux (rive, équilibre, large).

Pour dresser le portrait des assemblages benthiques, les données ont été analysées avec des approches univariée et multivariée. Les espèces benthiques ont d'abord été classées selon un coefficient de fréquence afin de distinguer les taxons constants (coefficient de fréquence ≥ 50%), les taxons communs (11 à 49%) et les taxons rares (≤ 10%).

Les assemblages benthiques ont ensuite été décrits à l'aide d'indicateurs univariés :

- richesse spécifique (S) : nombre de taxons/station
- abondance : nombre total d'individus/m^2,
- biomasse : poids humide d'organismes, g/m^2,
- indice d'équitabilité de Pielou : J' = H'/Log(S)
- indice de diversité de Shannon-Wiener : H' = -SUM(Pi*Log_e(Pi))

Ces indicateurs écologiques ont été calculés à l'aide du logiciel de statistiques PRIMER v7 (Clarke & Warwick 2001, Clarke & Gorley 2006).

Des analyses de variance (ANOVAs à 3 facteurs) ont été réalisées pour évaluer la variation spatiale et temporelle du contenu en matière organique des sédiments et des caractéristiques univariées des assemblages (richesse, abondance, biomasse, indice d'équitabilité et indice de diversité) selon l'année (2021, 2022, 2023, 2024), le site (RfO : référence ouest, SiO : sous influence ouest, ReO : recharge ouest, ReE : recharge est, SiE : sous influence est et RfE : référence est), le profil (rive : le haut de la recharge à l'équilibre, équilibre : le bas de la recharge à l'équilibre et large : le double de la limite du profil à l'équilibre) ainsi que leurs interactions. L'homogénéité des variances et la normalité des résidus préalables aux analyses ont été vérifiées visuellement, tel que suggéré par Quinn & Keough (2002) et des transformations ont été effectuées, lorsque nécessaires, pour satisfaire aux postulats du test. Des comparaisons *a posteriori* ont été faites avec le test de Tukey. Ces analyses ont été effectuées à l'aide du logiciel JMP v16.

Des analyses de variance multivariées par permutation (PERMANOVA) ont été faites suivant le même plan statistique (9999 permutations, Anderson 2001) pour évaluer la variation spatiale et temporelle de la granulométrie des sédiments et la composition des assemblages benthiques. Les matrices de similarité ont été calculées respectivement à partir de la distance euclédienne et de l'indice de Bray-Curtis (avec une similarité de 100 entre les échantillons n'ayant aucun organisme répertorié).

Les analyses ont été faites sur les abondances et sur les biomasses d'organismes dans un premier temps, sur des données non transformées et ensuite, sur des données transformées en présence-absence ; cette transformation extrême permet de réduire complètement l'importance attribuée à la dominance des espèces donnant à chaque taxon, le même poids dans l'analyse (Clarke & Warwick 2001). Toutes les analyses multivariées ont été faites à l'aide du logiciel PRIMER v7 (Clarke & Warwick 2001, Clarke & Gorley 2006).

Un seuil de significativité de 0,05 a été fixé pour toutes les analyses statistiques.

3 Résultats 2024 – Année 3 après recharge

3.1 Caractérisation des sédiments

Le contenu en matière organique des sédiments est très faible, atteignant un maximum de 2,83 % (valeur moyenne ± erreur-type de 0,48 ± 0,02 %; **Figure 2**. Ces valeurs sont similaires à ce qui a été observé aux années précédentes, soit une tendance à la hausse des contenus en matière organique de la plupart des sites par rapport à l'année avant recharge (**Figure 3**).

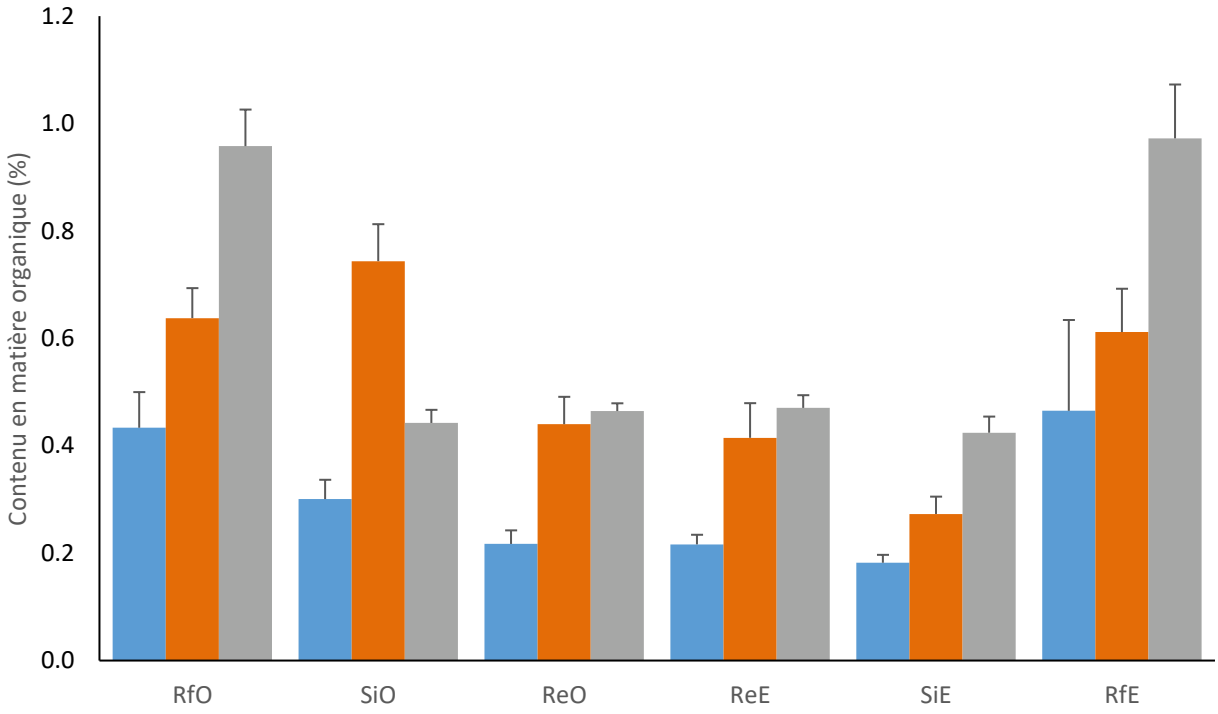


Figure 2. Contenu en matière organique des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour l'interaction entre les facteurs profil (= rive, = équilibre et = large) et sites : référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE).

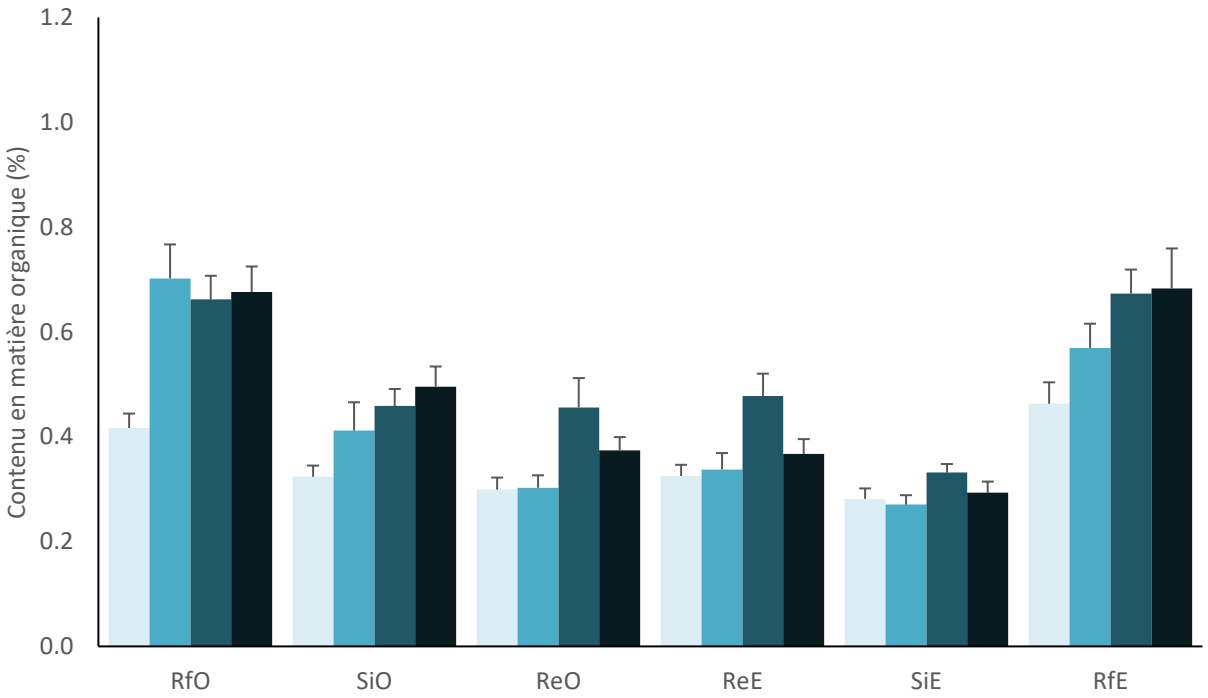


Figure 3. Contenu en matière organique des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour l'interaction entre les facteurs années (2021 en , 2022 en , 2023 en et 2024 en) et sites : référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE).

Les analyses granulométriques (**Figure 4** à **Figure 9**) ont montré que les sédiments prélevés sont majoritairement des sables fins (125 – 250 µm) et moyens (250 – 500 µm) pour tous les sites, à l'exception des sites ReO et ReE qui présentent également une proportion importante de gravier fin (> 4000 µm; Wentworth 1922;). On remarque également qu'à l'intérieur d'un même site les sédiments varient peu suivant le profil.

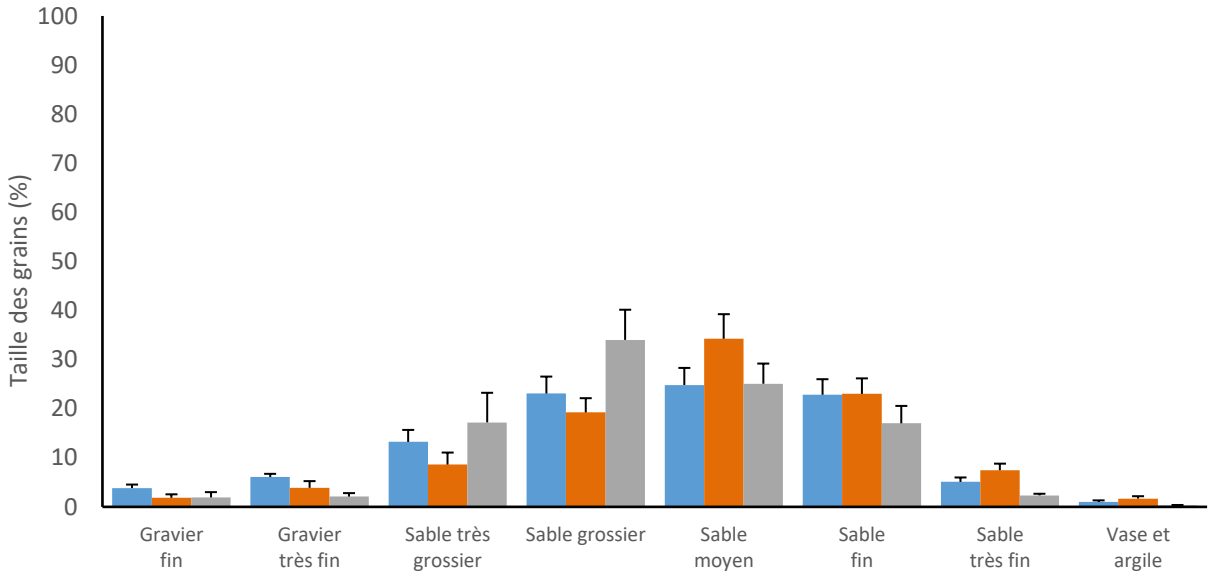


Figure 4. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (= rive, = équilibre et = large) au site référence ouest (RfO) de Pointe-aux-Outardes en 2024.

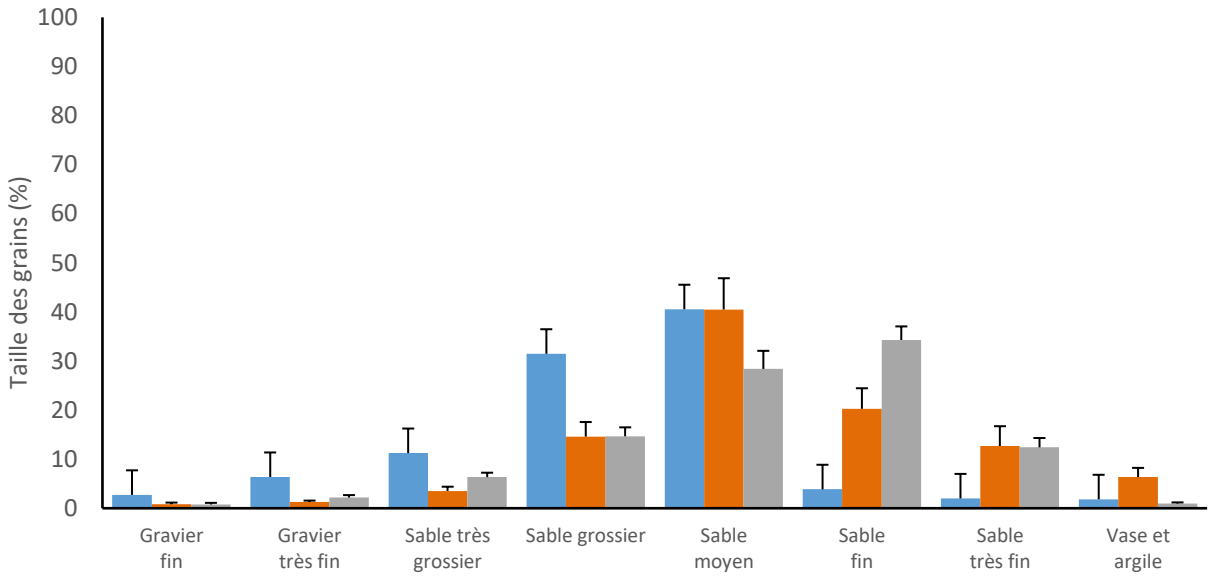


Figure 5. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (= rive, = équilibre et = large) au site sous influence ouest (SiO) de Pointe-aux-Outardes en 2024.

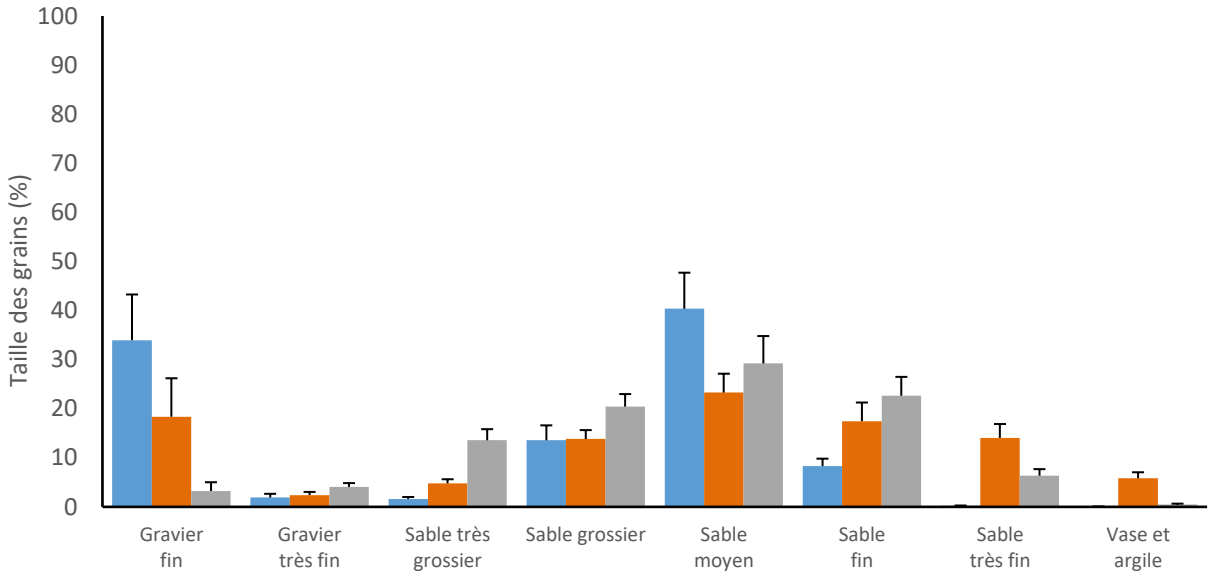


Figure 6. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (= rive, = équilibre et = large) au site recharge ouest (ReO) de Pointe-aux-Outardes en 2024.

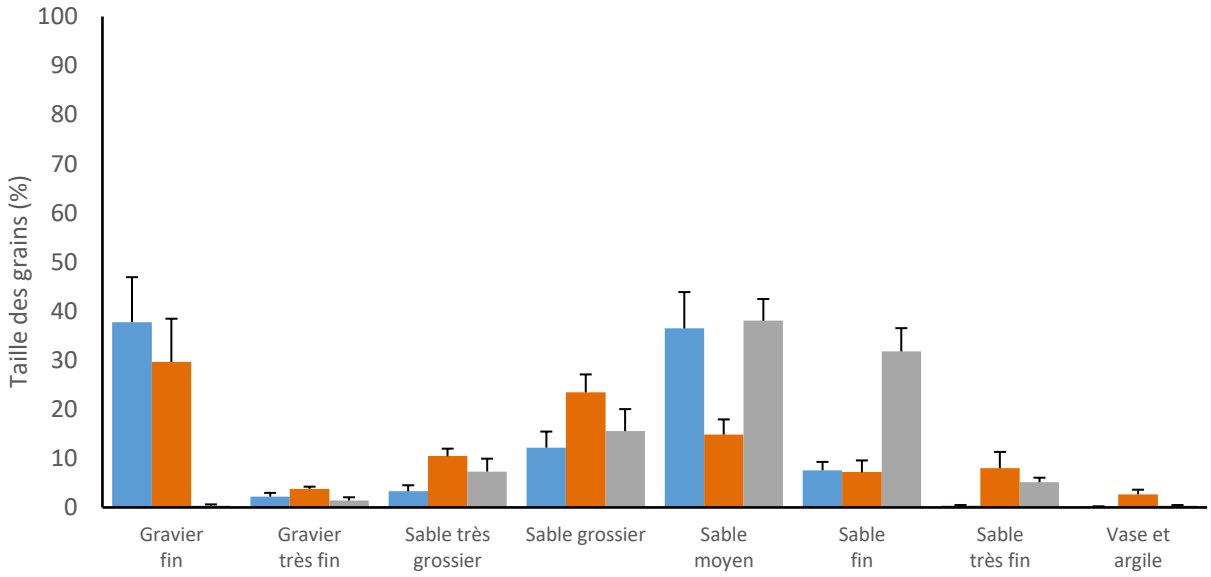


Figure 7. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (= rive, = équilibre et = large) au site recharge est (ReE) de Pointe-aux-Outardes en 2024.

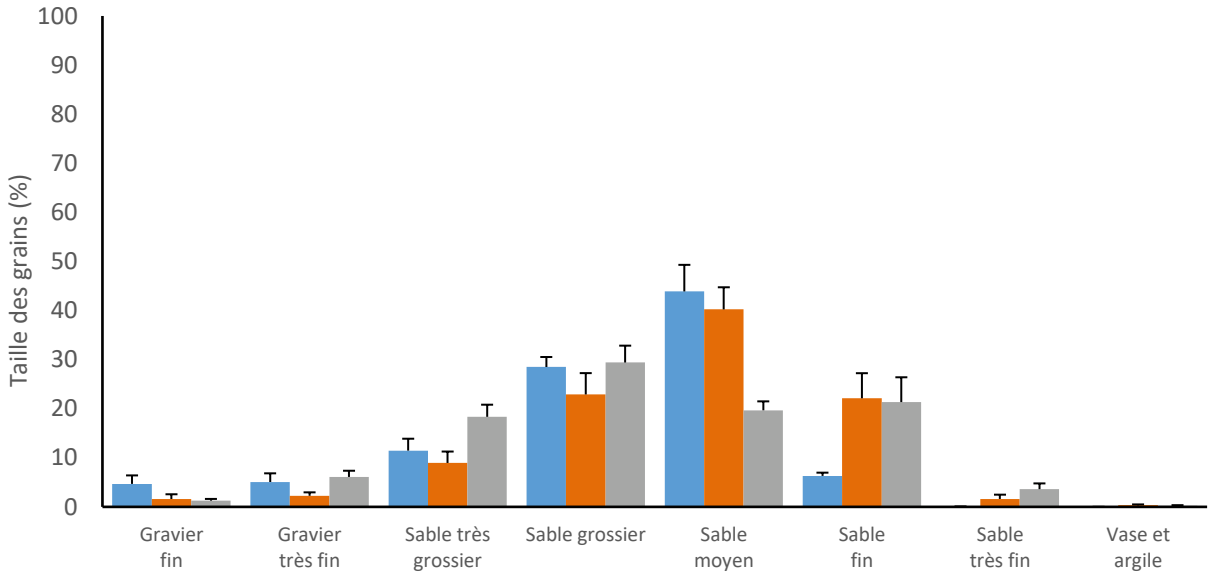


Figure 8. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (= rive, = équilibre et = large) au site sous influence est (SiE) de Pointe-aux-Outardes en 2024.

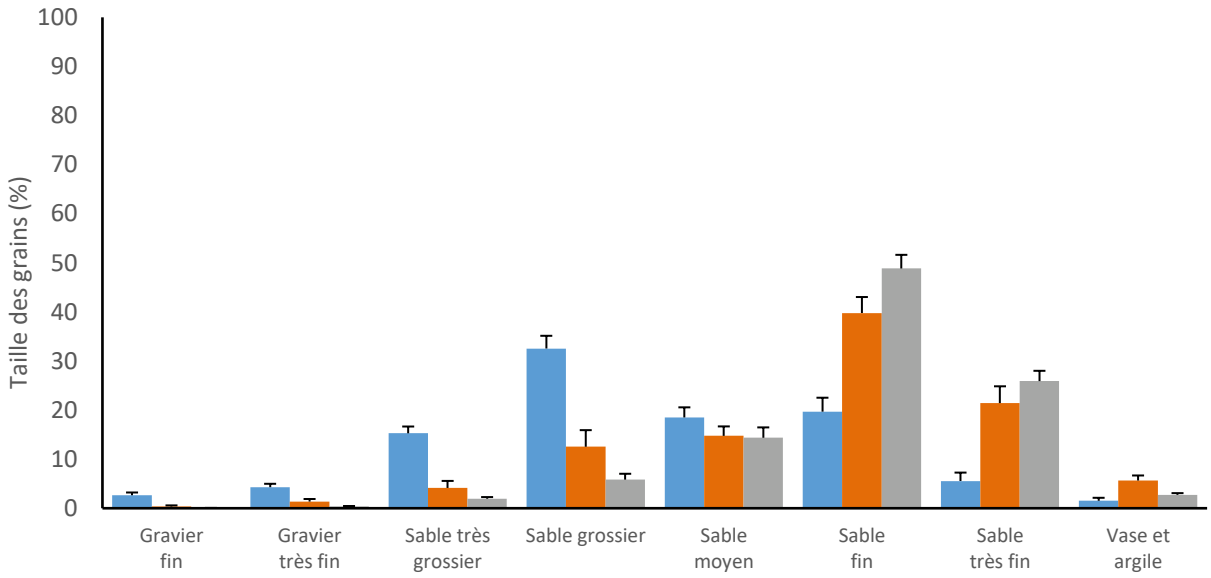


Figure 9. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (= rive, = équilibre et = large) au site référence est (RfE) de Pointe-aux-Outardes en 2024.

3.2 Caractérisation des assemblages benthiques

Au total, 71 taxons ont été inventoriés lors de l'échantillonnage des 6 sites de Pointe-aux-Outardes en juin 2024 (**Annexe 1**) : 27 taxons sont des annélides, 27 sont des arthropodes et 14 sont des mollusques. Des individus des phylum Nematoda, Nemertea et Platyhelminthes ont aussi été inventoriés.

Le niveau taxonomique d'identification peut être limité par :

- la décalcification des coquilles, lorsque les individus sont très petits ;
- des caractéristiques déterminantes impossibles à observer parce que les organismes sont incomplets et/ou abimés ;
- la préservation non adaptée à certains groupes spécifiques, notamment Nematoda et Nemertea.

Aucune espèce aquatique envahissante n'a été répertoriée, ni aucune nouvelle espèce ou nouvelle mention pour le Saint-Laurent.

Parmi les stations inventoriées, aucune espèce végétale n'a été observée à l'exception d'une espèce végétale de zostère (*Zostera marina*) dont la présence a été notée à 19 stations.

La **Figure 10** présente les abondances relatives de tous les taxons ayant un minimum de 2% d'abondance relative pour l'une ou l'autre des années à l'étude. En 2024, ce sont les nématodes qui dominent en termes d'abondance relative (36,8%), suivi des oligochètes (17,6%) et des copépodes harpacticoïdes (15,4%; **Figure 10**).

La **Figure 11** présente les biomasses relatives de tous les taxons ayant un minimum de 1% de biomasse relative pour l'une ou l'autre des années à l'étude. En 2024, ce sont les bivalves *Mya arenaria* et *Macoma balthica* qui dominent (respectivement 49,7% et 34,1%; **Figure 11**). Ce sont ces deux espèces qui dominaient aussi en termes de biomasse relative en 2021, 2022 et 2023.

En 2024, 5 taxons sont présents dans plus de 50% des stations (coefficient de fréquence ≥ 50, taxons dits fréquents; **Annexe 1**) : Nematoda, Oligochaeta, *Macoma balthica*, *Mya arenaria* et Harpacticoida. Seize taxons sont dits communs et possèdent un coefficient de fréquence de 11 à 49 % : Nereididae, Polychaeta, *Hediste diversicolor*, *Pseudolectocuma minus*, *Pygospio elegans*, *Wecomedon nobilis*, Nemertea, *Parexogone hebes*, Oedicerotidae, *Mytilus* sp., *Eteone longa*, *Mesodesma arctatum*, *Spio theeli*, Amphipoda, Bivalvia et Spionidae. Les 50 autres taxons inventoriés en 2024 étaient présents à ≤ 10 % des stations ; ces taxons sont dits rares (**Annexe 1**).

La **Figure 12** montre les courbes d'accumulation d'espèces. Avec les années et l'augmentation du nombre d'échantillons, les courbes sont vraiment moins prononcées et, avec les échantillons prélevés en 2024, on semble atteindre un plateau, ce qu'il signifie qu'il y a maintenant vraiment moins de nouvelles espèces à identifier pour ce site d'étude.

En 2024 la richesse spécifique atteint 29 taxons/échantillon, avec une moyenne de 8,7 ± 0,3 taxons/échantillon. L'abondance d'organismes, toutes espèces confondues, atteint 175 545 individus/m^2 (moyenne de 15 576 ± 1 413 individus/m^2), alors que la biomasse totale atteint 4 448 g/m^2 (moyenne de 364 ± 38 g/m^2). L'indice d'équitabilité de Pielou (J') moyen est de 0,68 ± 0,01 et l'indice de diversité de Shannon-Wiener (H') est de 1,33 ± 0,03.

Il est à noter qu'aucun organisme n'a été dénombré à 12 stations de Pointe-aux-Outardes en 2024 : 8 stations du site recharge est (ReE) et 4 stations du site recharge ouest (ReO).

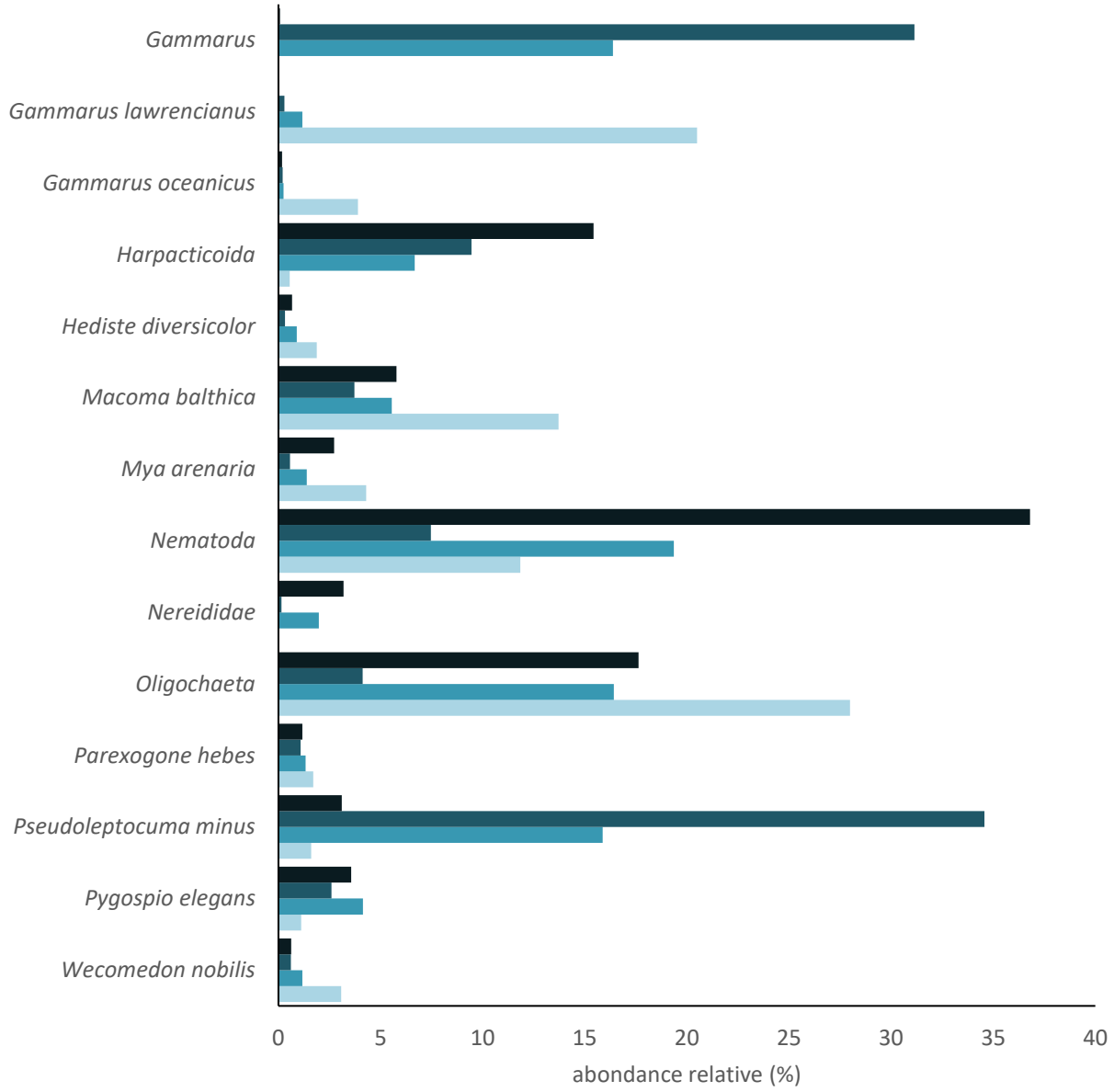


Figure 10. Abondance relative (%) des invertébrés benthiques prélevés à Pointe-aux-Outardes en 2021 ( ), 2022 ( ), 2023 ( ) et 2024 ( ).

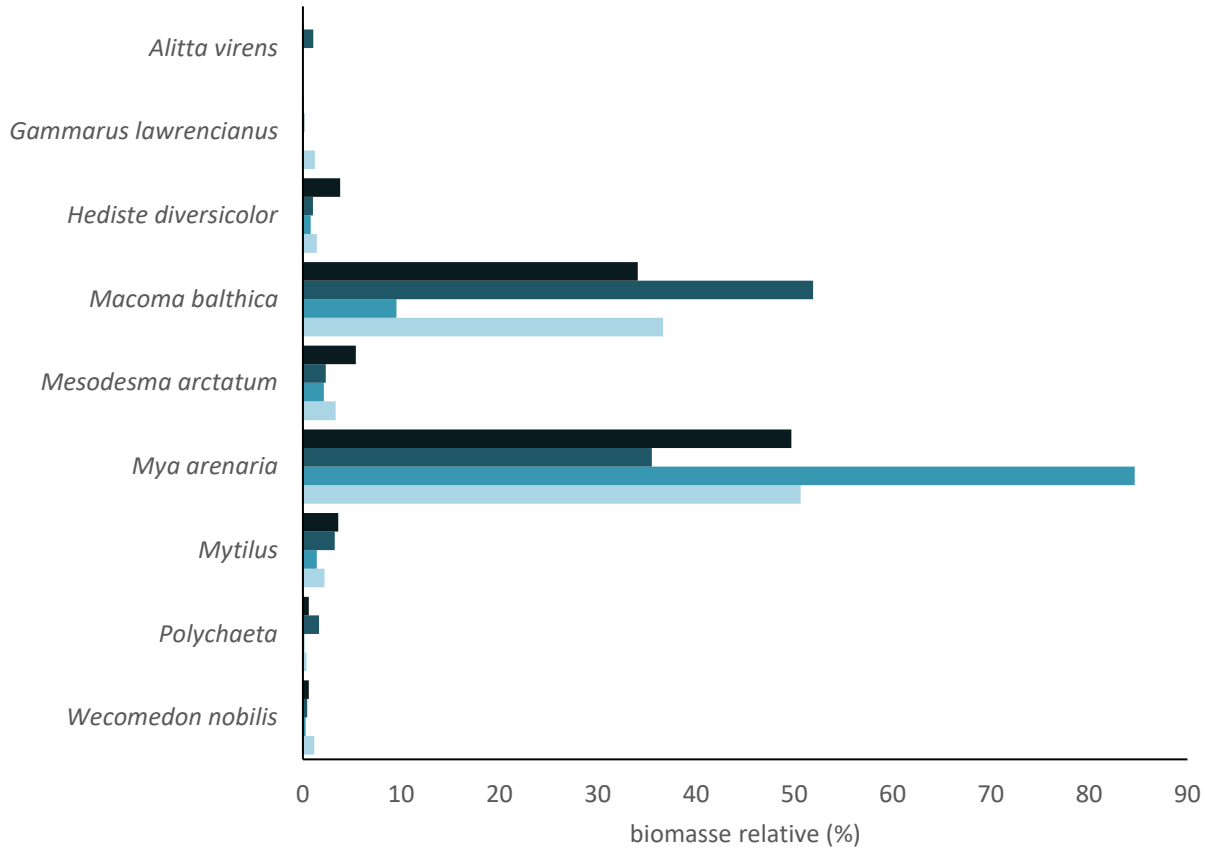


Figure 11. Biomasse relative (%) des invertébrés benthiques prélevés à Pointe-aux-Outardes en 2021 ( ), 2022 ( ), 2023 ( ) et 2024 ( ).

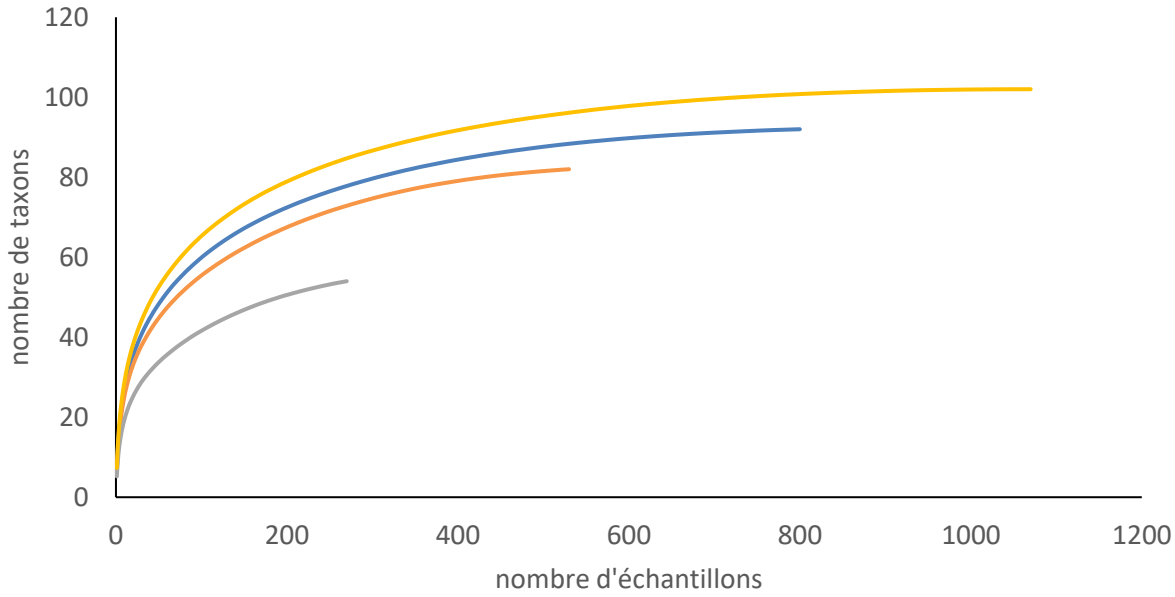


Figure 12. Courbes d'accumulation d'espèces – nombre de taxons inventoriés en fonction du nombre d'échantillons pour les travaux faits à Pointe-aux-Outardes en 2021 (gris), 2021-2022 (orange), 2021-2022-2023 (bleu) et 2021-2022-2023-2024 (jaune).

3.2.1 Analyses univariées

Des analyses univariées ont été réalisées sur les caractéristiques des communautés : richesse spécifique (nombre de taxons/station), abondance totale (nombre d'individus/m^2) biomasse totale (g/m^2), indice d'équitabilité de Pielou et indice de diversité de Shannon-Wiener. Les analyses de variance montrent un effet significatif pour toutes les sources de variation, incluant l'interaction entre les facteurs *année*, *site* et *profil* et ce, pour toutes les caractéristiques univariées (**Tableau 3**).

Pour y voir plus clairement, les analyses ont été refaites distinctement pour chaque site.

Tableau 3. Résultats des analyses de variance (ANOVA) testant l'effet de l'année, du site, du profil et leurs interactions sur les caractéristiques univariées des assemblages benthiques soit la richesse spécifique, l'abondance, la biomasse, l'indice d'équitabilité de Pielou (J') et l'indice de diversité de Shannon-Wiener (H').

Sources de variation	dl	Richesse spécifique			dl	Indice d'équitabilité (J')		
		SC	*F-ratio*	*p*		SC	*F-ratio*	*p*
Année	3	1844	70,4911	**< 0,0001**	3	1,0382	12,3618	**< 0,0001**
Site	5	1125	25,8031	**< 0,0001**	5	1,4629	10,4510	**< 0,0001**
Profil	2	10045	575,8408	**< 0,0001**	2	0,4497	8,0317	**0,0003**
An × Si	15	475	3,6308	**< 0,0001**	15	1,7798	4,2381	**< 0,0001**
An × Pr	6	274	5,2351	**< 0,0001**	6	1,6545	9,8495	**< 0,0001**
Si × Pr	10	1990	22,8186	**< 0,0001**	10	1,2712	4,5405	**< 0,0001**
An × Si × Pr	30	626	2,3917	**< 0,0001**	30	1,6822	2,0029	**0,0012**
Résidus	998	8704			998	24,2166		
Total	1069	25155			1069	33,7649		

Sources de variation	dl	Log_{10} (Abondance + 1)			dl	Indice de diversité (H')		
		SC	*F-ratio*	*p*		SC	*F-ratio*	*p*
Année	3	108	59,1153	**< 0,0001**	3	29,1827	55,1177	**< 0,0001**
Site	5	143	46,8572	**< 0,0001**	5	19,2170	21,7772	**< 0,0001**
Profil	2	286	234,9214	**< 0,0001**	2	114,6100	324,6982	**< 0,0001**
An × Si	15	43	4,7461	**< 0,0001**	15	12,3606	4,6691	**< 0,0001**
An × Pr	6	27	7,3297	**< 0,0001**	6	5,1174	4,8327	**< 0,0001**
Si × Pr	10	175	28,7732	**< 0,0001**	10	18,3256	10,3835	**< 0,0001**
An × Si × Pr	30	89	4,8478	**< 0,0001**	30	16,6746	3,1493	**< 0,0001**
Résidus	998	608			998	176,1341		
Total	1069	1479			1069	391,3205		

Sources de variation	dl	Log_{10} (Biomasse + 1)		
		SC	*F-ratio*	*p*
Année	3	3	2,7582	**0,0412**
Site	5	257	125,5075	**< 0,0001**
Profil	2	650	794,9047	**< 0,0001**
An × Si	15	22	3,6109	**< 0,0001**
An × Pr	6	8	3,2323	**0,0038**
Si × Pr	10	84	20,5654	**< 0,0001**
An × Si × Pr	30	33	2,6907	**< 0,0001**
Résidus	998	408		
Total	1069	1479		

dl = degré de liberté
SC = somme des carrés

3.2.1.1 Richesse spécifique

La **richesse spécifique** varie significativement suivant toutes les sources de variation (**Tableau 3**). Par contre, lorsque les analyses sont faites par site, quelques différences sont notables (**Figure 13**) :

1. Il y a une interaction significative entre les facteurs année et profil aux sites RfO, ReO et ReE, ce qui signifie que le nombre d'espèces varie différemment d'un profil à l'autre et d'une année à l'autre.
   - Au site RfO, la richesse spécifique est moindre sur la rive en 2021 et 2022, comparativement à 2023 et 2024. Elle est aussi moindre sur la rive comparativement aux profils équilibre et large et ce, pour les années 2021 et 2022. Il n'y a pas de différence significative de la richesse spécifique sur la rive entre 2021 et 2022.
   - Au site ReO, la richesse spécifique augmente de la rive vers le large en 2022, 2023 et 2024, chaque profil étant significativement différent des autres pour une année donnée. La richesse spécifique sur la rive en 2021 est aussi moindre que celle à l'équilibre et que celle au large. Il n'y a pas de différence significative de la richesse spécifique sur la rive d'une année à l'autre.
   - Au site ReE, la richesse spécifique augmente de la rive vers le large en 2022, 2023 et 2024. Elle est aussi significativement moindre en 2021, comparativement à 2022 et 2023, sur la rive. Il n'y a pas de différence significative de la richesse spécifique sur la rive d'une année à l'autre.

2. La richesse spécifique varie significativement selon les facteurs année et profil aux sites SiO, SiE et RfE. Les tendances sont exactement les mêmes pour les trois sites.
   - La richesse spécifique en 2021 est moindre qu'en 2022, 2023 et 2024; il n'y a pas de différence entre les années 2022, 2023 et 2024.
   - La richesse spécifique augmente aussi significativement de la rive vers l'équilibre puis vers le large.

3.2.1.2 Abondance totale

L'**abondance totale** d'organismes varie significativement suivant toutes les sources de variation (**Tableau 3**). Par contre, lorsque les analyses sont faites par site, quelques différences sont notables (**Figure 14**) :

1. Il y a une interaction significative entre les facteurs année et profil aux sites RfO, SiO, ReO, ReE et RfE, ce qui signifie que l'abondance varie différemment d'un profil à l'autre et d'une année à l'autre :
   - Aux sites RfO et RfE, l'abondance sur la rive, en 2021 et 2022, est moindre que celle à l'équilibre ou au large; il n'y a pas de différence d'abondance d'un profil de plage à l'autre en 2023 et 2024. Sur la rive, l'abondance est la plus faible en 2021 et elle augmente significativement en 2022.
   - Au site SiO, l'abondance de la rive est moindre en 2021, comparativement à 2022, 2023 et 2024. Elle est aussi moindre sur la rive, comparativement aux profils équilibre et large en 2021.
   - Au site ReO, l'abondance augmente de la rive vers le large pour toutes les années. L'abondance a significativement diminué entre 2021 et 2022 aux stations de la rive; il n'y a pas de différence entre 2022 et 2023, puis l'abondance augmente significativement en 2024. Il n'y a alors pas de différence significative d'abondance aux stations de la rive entre 2021 et 2024.
   - Au site ReE, l'abondance augmente de la rive vers le large pour toutes les années. L'abondance n'a pas significativement diminué entre 2021 et 2022 aux stations de la rive; il n'y a effectivement pas de différence significative d'abondance aux stations de la rive entre les années.

2. L'abondance totale varie significativement selon les facteurs année et profil au site SiE :
    - L'abondance augmente avec les années, mais il n'y a pas de différence significative entre 2023 et 2024.
    - L'abondance est significativement plus grande aux stations large comparativement à celles de la rive.

3.2.1.3 Biomasse totale

La **biomasse totale** d'organismes varie significativement suivant toutes les sources de variation (**Tableau 3**). Par contre, lorsque les analyses sont faites par site, quelques différences sont notables (**Figure 15**) :

1. Il y a une interaction significative entre les facteurs année et profil aux sites RfO, ReO et ReE, ce qui signifie que la biomasse varie différemment d'un profil à l'autre et d'une année à l'autre.
    - Au site RfO, la biomasse sur la rive, en 2021 et 2022, est moindre que celle à l'équilibre ou au large; il n'y a pas de différence de biomasse d'un profil de plage à l'autre en 2023 et la biomasse de la rive est significativement moindre que celle au large en 2024.
    - Aux sites ReO et ReE, la biomasse augmente de la rive vers le large. Il n'y a pas de différence significative de la biomasse aux stations de la rive d'une année à l'autre.

2. La biomasse totale varie significativement selon le facteur profil aux sites SiO, SiE et RfE.
    - Au site SiO, la biomasse de la rive est moindre que celles aux profils équilibre et large.
    - Au site SiE, la biomasse augmente de la rive vers le large.
    - Au site RfE, la biomasse de la rive est moindre que celle à l'équilibre ou au large.

3.2.1.4 Équitabilité

L'indice d'**équitabilité de Pielou** varie significativement suivant toutes les sources de variation (**Tableau 3**). Par contre, lorsque les analyses sont faites par site, quelques différences sont notables (**Figure 16**) :

1. Il y a une interaction significative entre les facteurs année et profil aux sites SiO, SiE et ReE, ce qui signifie que l'équitabilité varie différemment d'un profil à l'autre et d'une année à l'autre.
    - Au site SiO, il n'y a pas de différence significative d'équitabilité entre les profils de plage pour les années 2021, 2022 et 2024. En 2023, l'équitabilité aux stations rive est significativement plus faible qu'à l'équilibre et qu'au large. Il n'y a pas de différence significative non plus entre les années 2021, 2022 et 2024.
    - Au site SiE, la seule différence significative est que l'équitabilité de la rive en 2021 et 2022 est significativement plus grande que celle au large en 2024.
    - Au site ReE, l'équitabilité varie peu dans le temps, mais elle chute significativement de la rive vers l'équilibre en 2021.

2. L'indice d'équitabilité varie significativement selon les facteurs année et profil aux sites RfO et RfE :
    - Au site RfO, l'équitabilité en 2023 est significativement plus petite qu'en 2021, 2022 et 2024. Aussi, l'équitabilité aux stations de la rive est significativement plus petite que celle à l'équilibre et au large.

- Au site RfE, l'équitabilité en 2023 est significativement plus petite que celle en 2021. Aussi, l'équitabilité aux stations de la rive est significativement plus grande que celle à l'équilibre et au large.

3. L'indice d'équitabilité varie significativement selon le facteur profil au site ReO :
   - L'équitabilité de la rive est plus grande que celle à l'équilibre et que celle au large.

3.2.1.5 Diversité

L'indice de d**iversité de Shannon-Wiener** varie significativement suivant toutes les sources de variation (**Tableau 3**). Par contre, lorsque les analyses sont faites par site, quelques différences sont notables (**Figure 17**) :

1. Il y a une interaction significative entre les facteurs année et profil aux sites RfO, RfE, SiE et ReE, ce qui signifie que la diversité varie différemment d'un profil à l'autre et d'une année à l'autre.
   - Au site RfO, la diversité de la rive est moindre que celle au large en 2021 et 2022. Sur la rive, elle est plus grande en 2023 et en 2024, comparativement à 2021.
   - Au site RfE, la diversité au large est plus grande que celle de la rive pour toutes les années. La diversité de la rive est aussi moindre en 2021, comparativement aux autres années.
   - Au site SiE, la diversité à l'équilibre en 2021 est plus faible que toutes les autres valeurs, année et profil confondus, sauf qu'elle est similaire à la diversité des stations de la rive en 2021. Il n'y a pas de différence significative entre 2021 et 2022 pour la rive.
   - Au site ReE, la diversité sur la rive est significativement moindre que celle au large pour toutes les années. Il n'y a pas de différence de la diversité entre les années pour les stations de la rive. Par contre, elle augmente entre 2021 et 2022, puis se maintient, pour les stations à l'équilibre.

2. La diversité varie significativement selon les facteurs année et profil aux sites SiO et ReO :
   - Aux sites SiO et ReO, la diversité est significativement plus grande en 2024. Aussi, elle augmente de la rive vers le large.

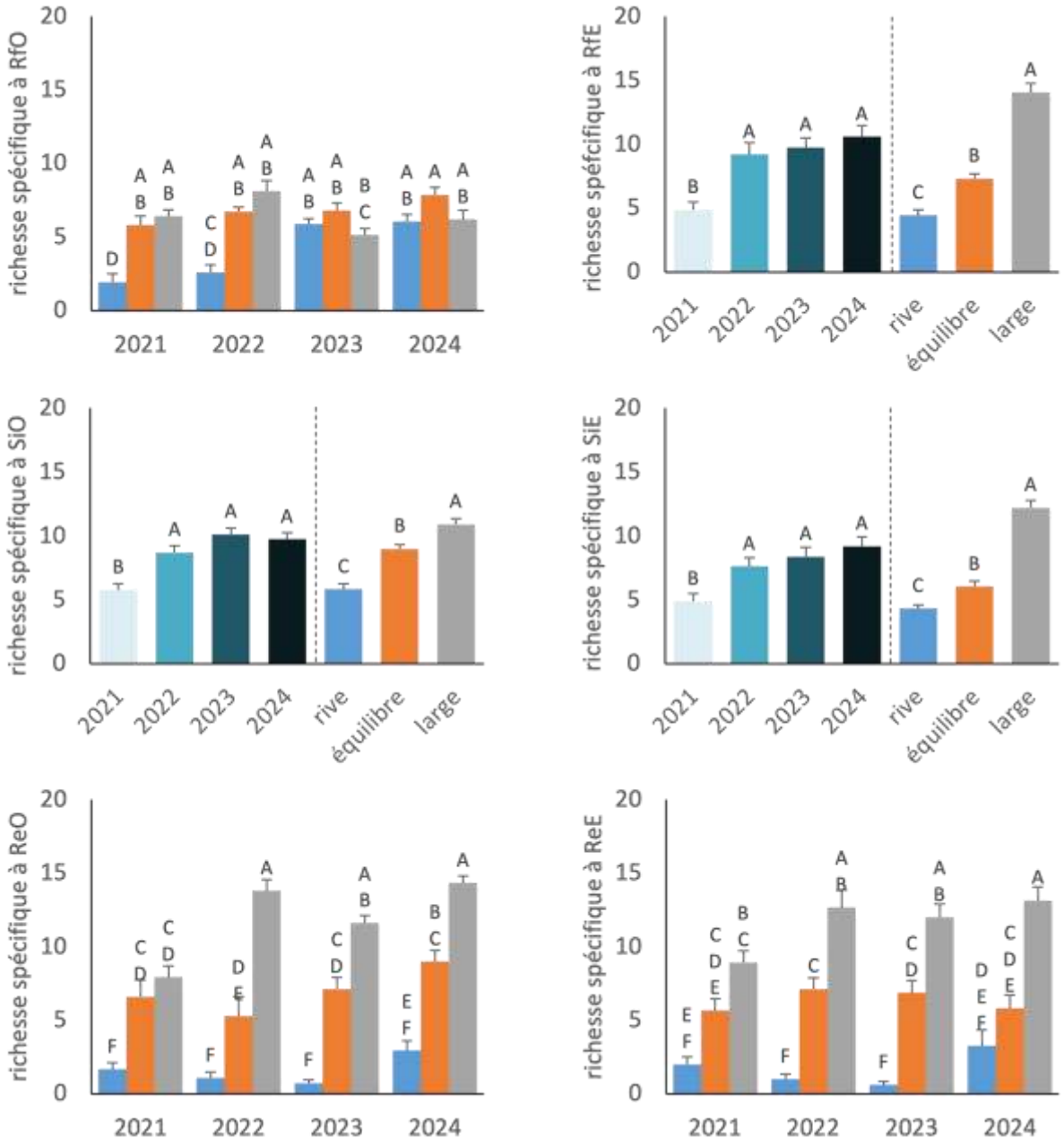


Figure 13. Richesse spécifique des assemblages benthiques (nombre de taxons/station, moyenne ± erreur-type) aux sites référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE) en 2021 ( ), 2022 ( ), 2023 ( ) et 2024 ( ) pour les profils près de la rive ( ), à l'équilibre ( ) et vers le large ( ). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey pour l'interaction entre les facteurs année et profil aux sites RfO, ReO et ReE, pour les facteurs année et profil distinctement aux sites SiO, SiE et RfO.

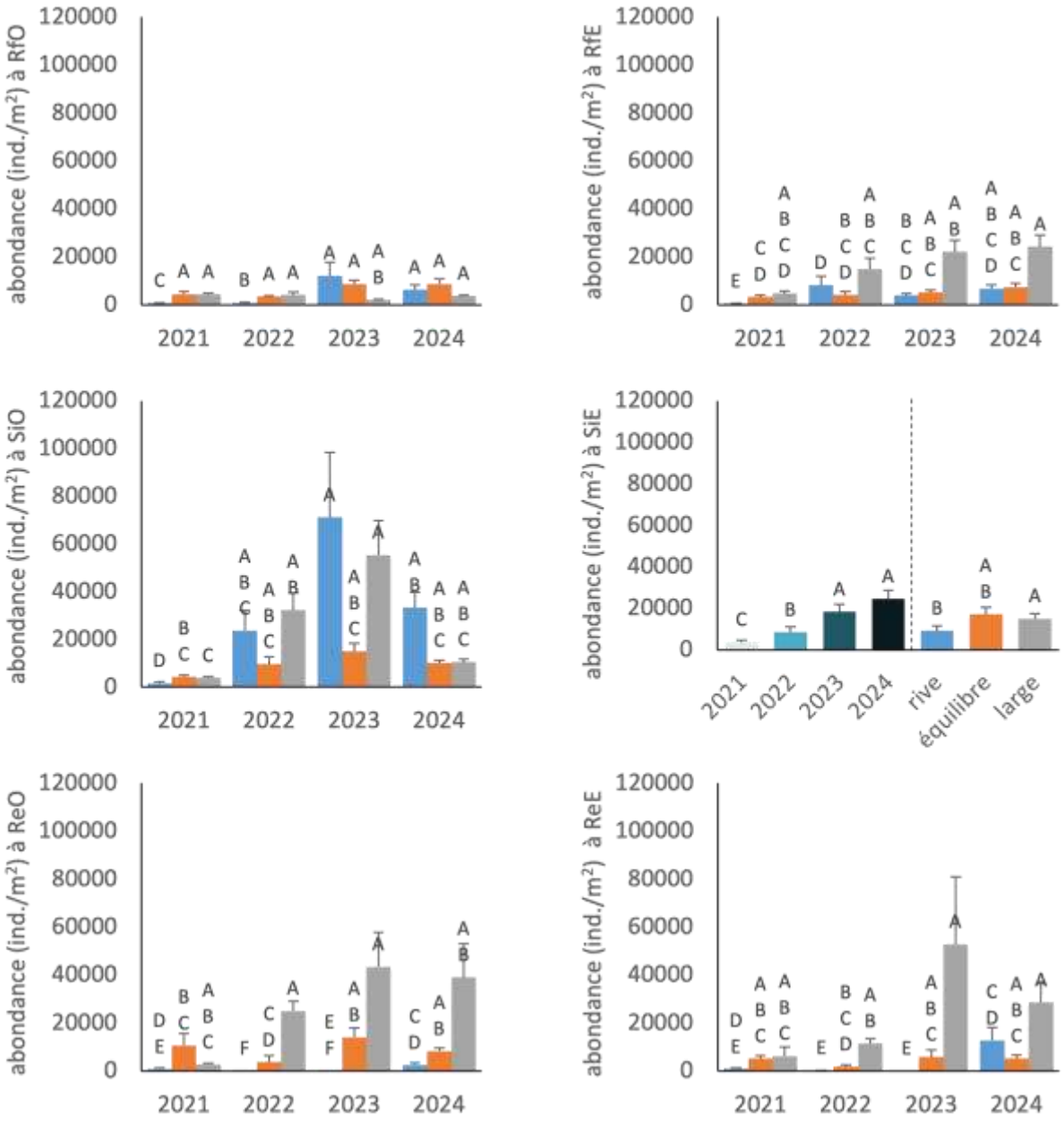


Figure 14. Abondance totale (nombre total d'individus/m^2, moyenne ± erreur-type) aux sites référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE) en 2021 ( ), 2022 ( ), 2023 ( ) et 2024 ( ) pour les profils près de la rive ( ), à l'équilibre ( ) et vers le large ( ). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey pour l'interaction entre les facteurs année et profil aux sites RfO, SiO, ReO, ReE et RfE, pour les facteurs année et profil distinctement au site SiE.

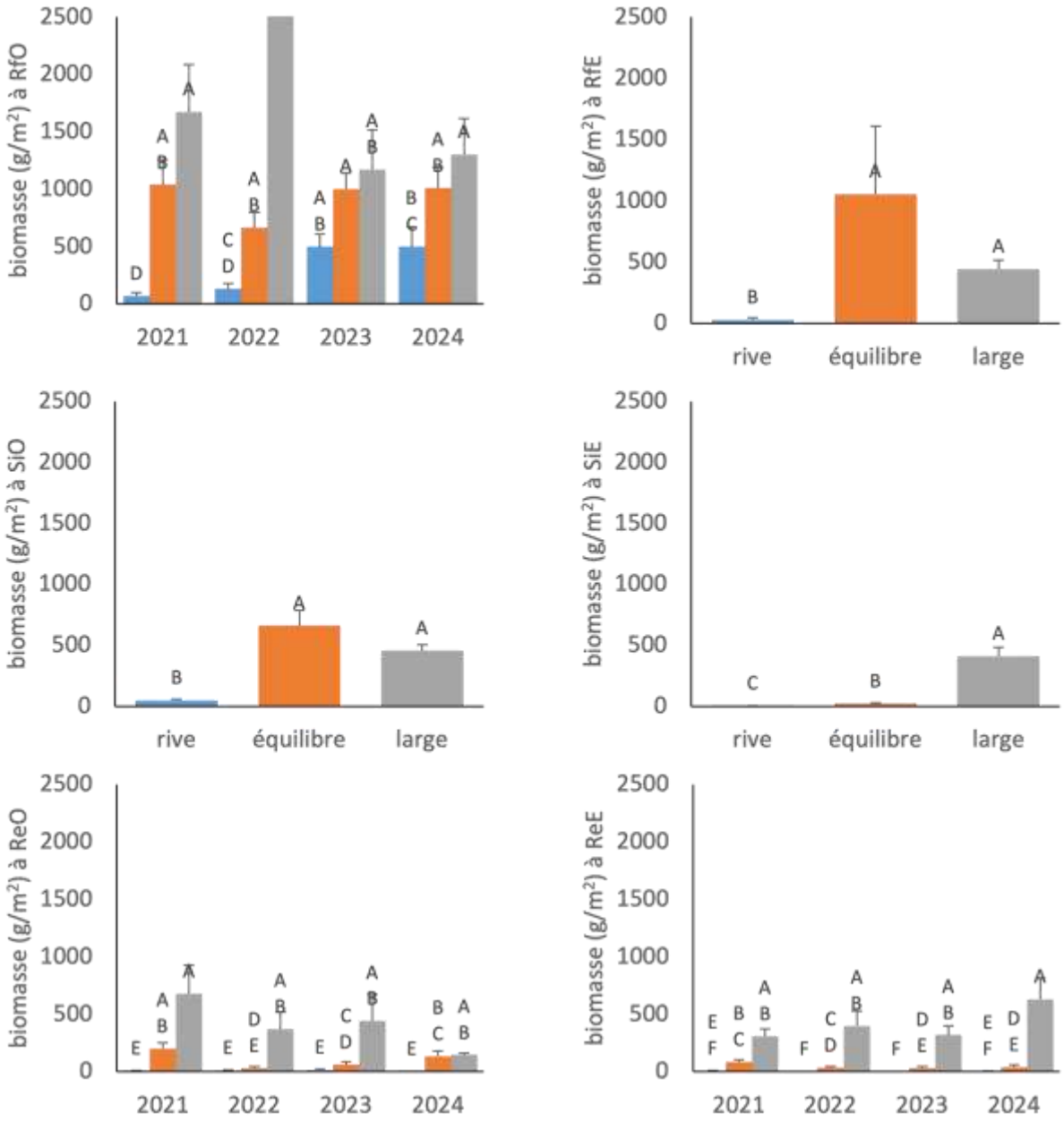


Figure 15. Biomasse totale (g/m^2, moyenne ± erreur-type) aux sites référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE) en 2021 ( ), 2022 ( ), 2023 ( ) et 2024 ( )pour les profils près de la rive ( ), à l'équilibre ( ) et vers le large ( ). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey pour l'interaction entre les facteurs année et profil aux sites RfO, ReO et ReE, pour le facteur profil aux sites SiO, SiE et RfE.

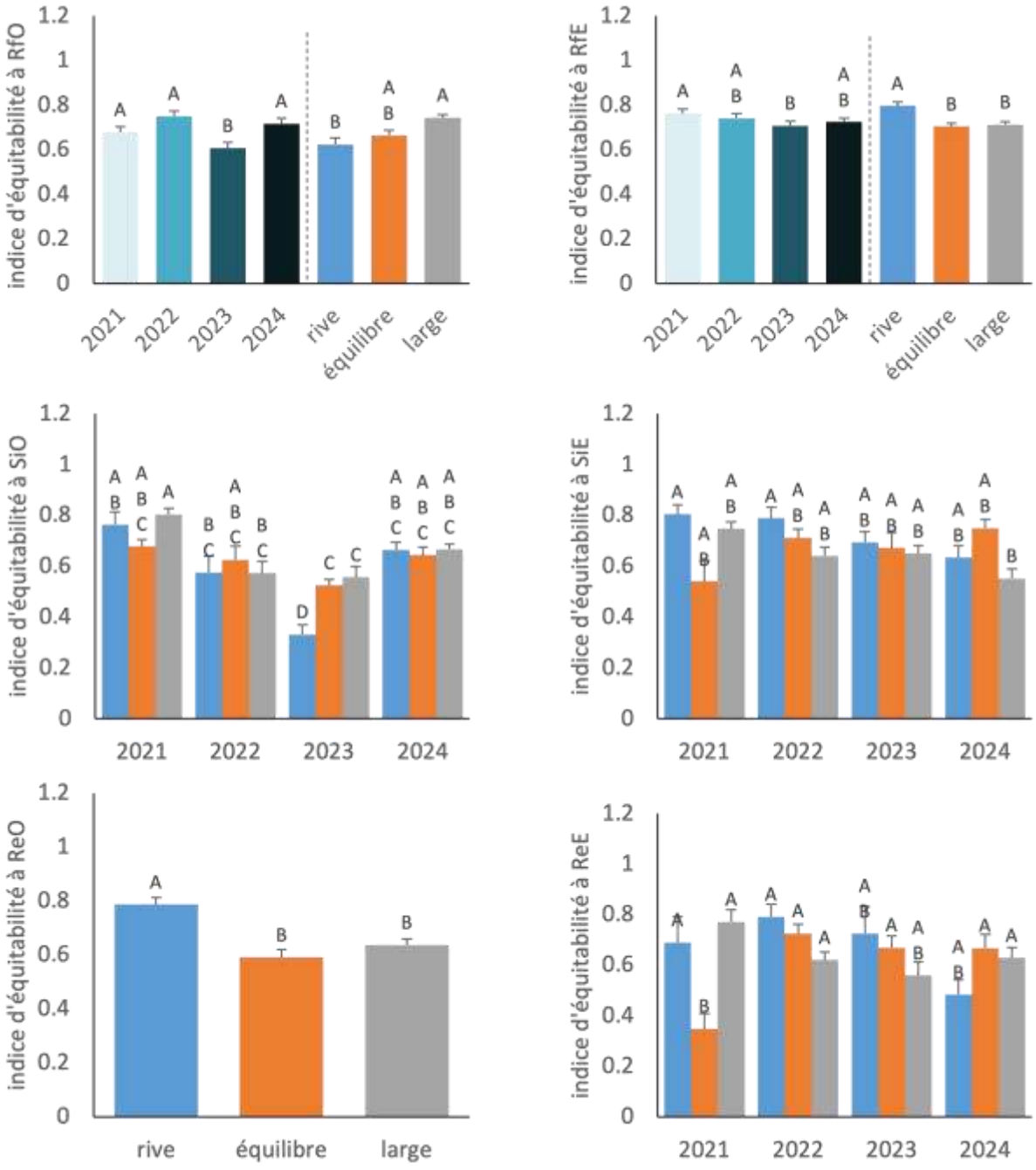


Figure 16. Indice d'équitabilité de Pielou (moyenne ± erreur-type) aux sites référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE) en 2021 ( ), 2022 ( ), 2023 ( ) et 2024 ( ) pour les profils près de la rive ( ), à l'équilibre ( ) et vers le large ( ). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey pour l'interaction entre les facteurs année et profil aux sites SiO, SiE et ReE, pour les facteurs année et profil distinctement aux sites RfO et RfE, puis pour le facteur profil au site ReO.

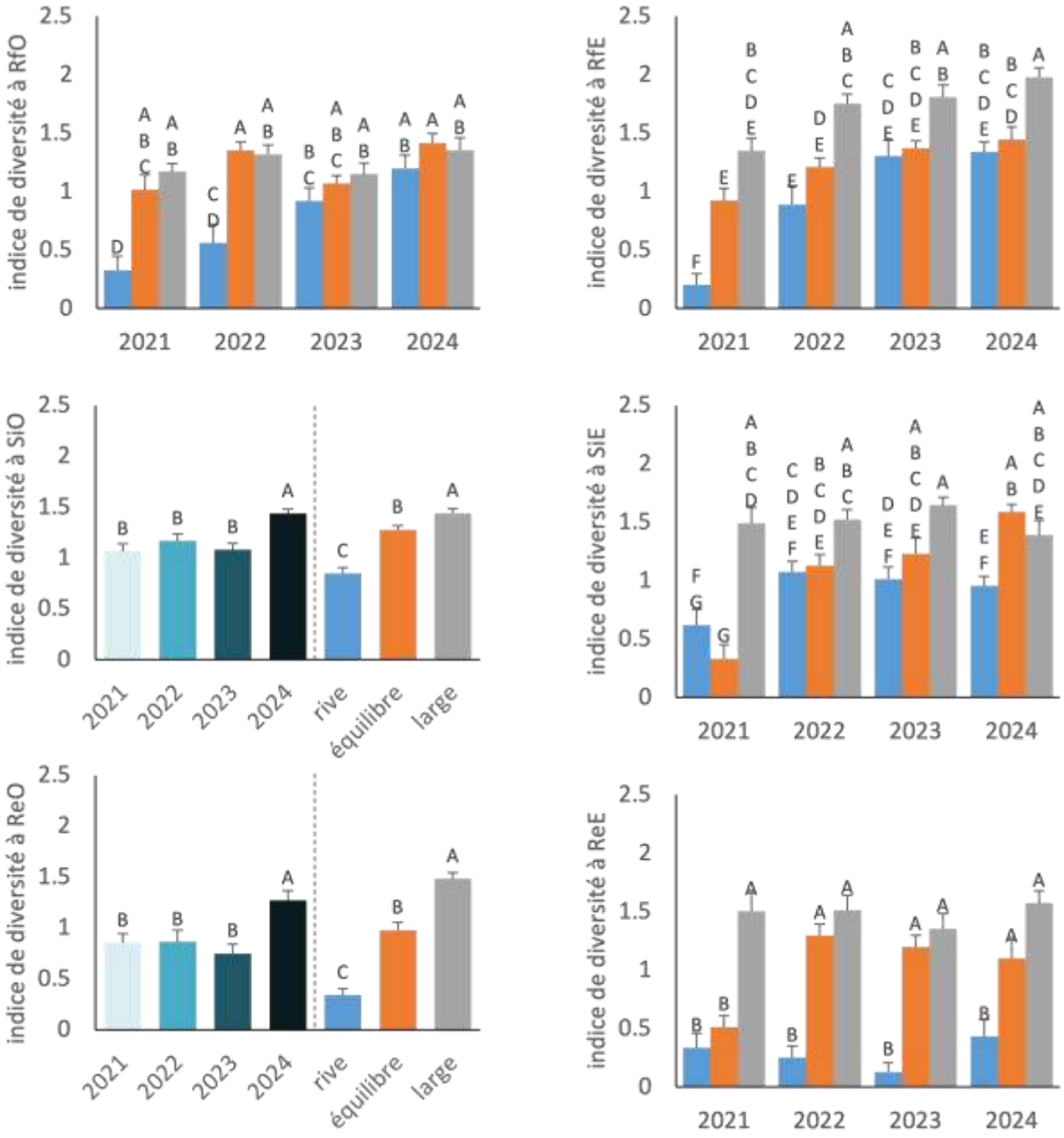


Figure 17. Indice de diversité de Shannon-Wiener (moyenne ± erreur-type) aux sites référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE) en 2021 ( ), 2022 ( ), 2023 ( ) et 2024 ( ) pour les profils près de la rive ( ), à l'équilibre ( ) et vers le large ( ). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey pour l'interaction entre les facteurs année et profil aux sites RfO, RfE, SiE et ReE, pour les facteurs année et profil distinctement aux sites SiO et ReO.

3.2.2 Analyses multivariées

Les analyses de variance par permutation ont été faites sur les bases de données d'abondances d'organismes puis sur les bases de données de biomasse. Dans les deux cas, les taxons présents dans une seule station ont d'abord été retirés des bases de données pour limiter l'effet engendré par les espèces rares.

Les analyses multivariées ont révélé des différences significatives des assemblages d'organismes benthiques pour toutes les sources de variation et leurs interactions, et ce, lorsque les analyses sont faites sur les données brutes d'abondances et sur les données transformées en présence/absence (**Tableau 4**), tout comme lorsqu'elles sont faites sur les données de biomasse (**Tableau 5**).

Tableau 4. Résultats des analyses de variance multivariées par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du site, du profil et leurs interactions sur les abondances des assemblages d'invertébrés benthiques de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données d'abondance brutes et sur des données transformées en présence/absence.

Sources de variation	dl	Données brutes			Présence/absence		
		SC	*pseudo-F*	*p(perm)*	SC	*pseudo-F*	*p(perm)*
Année	3	280110	34,3150	**0,0001**	245800	51,1260	**0,0001**
Site	5	338630	24,8900	**0,0001**	277330	34,6100	**0,0001**
Profil	2	221210	40,6500	**0,0001**	332490	103,7400	**0,0001**
An × Si	15	142220	3,4845	**0,0001**	62675	2,6073	**0,0001**
An × Pr	6	98287	6,0203	**0,0001**	42076	4,3759	**0,0001**
Si × Pr	10	237430	8,7258	**0,0001**	193190	12,0550	**0,0001**
An × Si × Pr	30	204960	2,5109	**0,0001**	113340	2,3574	**0,0001**
Résidus	998	2715500			1599400		
Total	1069	4245500			2873700		

Tableau 5. Résultats des analyses de variance multivariées par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du site, du profil et leurs interactions sur les biomasses des assemblages d'invertébrés benthiques de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données de biomasse transformées en racine quatrième.

Sources de variation	dl	SC	*pseudo-F*	*p(perm)*
Année	3	148700	25,8280	**0,0001**
Site	5	323700	33,7340	**0,0001**
Profil	2	460160	119,8900	**0,0001**
An × Si	15	74778	2,5976	**0,0001**
An × Pr	6	49561	4,3041	**0,0001**
Si × Pr	10	243350	12,6800	**0,0001**
An × Si × Pr	30	131560	2,2851	**0,0001**
Résidus	998	1915300		
Total	1069	3360000		

Pour y voir un peu plus clair, les analyses ont été refaites, mais distinctement pour chacun des sites étudiés.

Au site recharge est (ReE), les analyses multivariées ont révélé des différences significatives des assemblages d'organismes benthiques pour toutes les sources de variation (**Tableau 6**). Les analyses *a posteriori* montrent que :

- Il y a des différences significatives des assemblages benthiques entre tous les profils de plage, peu importe l'année.
- Il y a des différences significatives des assemblages benthiques entre toutes les années aux stations à l'équilibre et au large.
- Il y a une différence significative des assemblages benthiques de la rive entre 2021 et 2023.

Au site recharge ouest (ReO), les analyses multivariées ont révélé des différences significatives des assemblages d'organismes benthiques pour toutes les sources de variation (**Tableau 7**). Les analyses *a posteriori* montrent que :

- Il y a des différences significatives des assemblages benthiques entre tous les profils de plage, peu importe l'année.
- Il y a des différences significatives des assemblages benthiques entre toutes les années aux stations à l'équilibre et au large.
- Il y a une différence significative des assemblages benthiques de la rive entre 2021 et 2022.
- Pour la rive, les assemblages benthiques de 2024 sont significativement différents de ceux de 2021, 2022 et 2023.

Au site sous influence est (SiE), les analyses multivariées ont révélé des différences significatives des assemblages d'organismes benthiques pour toutes les sources de variation (**Tableau 8**). Les analyses *a posteriori* montrent que :

- Il y a des différences significatives des assemblages benthiques entre tous les profils de plage en 2022, 2023 et 2024.
- En 2021, les assemblages benthiques du large sont significativement différents de ceux de la rive et de ceux de l'équilibre.
- Il n'y a pas de différence significative des assemblages de la rive et de l'équilibre en 2021.
- Il y a des différences significatives des assemblages benthiques entre toutes les années aux stations à l'équilibre et au large.
- Il y a des différences significatives des assemblages benthiques de la rive d'une année à l'autre, sauf entre 2022 et 2023.

Au site sous influence ouest (SiO), les analyses multivariées ont révélé des différences significatives des assemblages d'organismes benthiques pour toutes les sources de variation (**Tableau 9**). Les analyses *a posteriori* montrent que :

- Il y a des différences significatives des assemblages benthiques entre tous les profils de plage en 2022, 2023 et 2024.
- En 2021, les assemblages benthiques de la rive sont significativement différents de ceux de l'équilibre et de ceux du large.
- Il n'y a pas de différence significative des assemblages benthiques de l'équilibre et du large en 2021.
- Il y a des différences significatives des assemblages benthiques entre toutes les années, peu importe le profil.

Au site référence est (RfE), les analyses multivariées ont révélé des différences significatives des assemblages d'organismes benthiques pour toutes les sources de variation (**Tableau 10**). Les analyses *a posteriori* montrent que :

- Il y a des différences significatives des assemblages benthiques entre tous les profils de plage, peu importe l'année.
- Il y a des différences significatives des assemblages benthiques entre toutes les années à l'équilibre et au large.
- Il y a des différences significatives des assemblages benthiques entre toutes les années sur la rive sauf les assembles de 2021 et 2022 qui ne sont pas significativement différents.

Au site référence ouest (RfO), les analyses multivariées ont révélé des différences significatives des assemblages d'organismes benthiques pour toutes les sources de variation (**Tableau 11**). Les analyses *a posteriori* montrent que :

- Il y a des différences significatives des assemblages benthiques entre tous les profils de plage en 2022 et en 2023.
- En 2021, les assemblages benthiques de la rive sont significativement différents de ceux de l'équilibre et de ceux du large.
- En 2024, les assemblages benthiques du large sont significativement différents de ceux de la rive et de ceux de l'équilibre.
- Il n'y a pas de différence significative des assemblages benthiques de l'équilibre et du large en 2021.
- Il y a des différences significatives des assemblages benthiques entre toutes les années aux profils équilibre et large.
- Il y a des différences significatives des assemblages benthiques entre toutes les années sur la rive sauf les assemblages de 2021 et 2022 qui ne sont pas significativement différents.

Tableau 6. Résultats des analyses de variance multivariées par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du profil et leur interaction sur les abondances des assemblages d'invertébrés benthiques du site recharge est (ReE) de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données d'abondance transformées en racine quatrième.

Sources de variation	dl	SC	*pseudo-F*	*p(perm)*
Année	3	52581	7,9319	**0,0001**
Profil	2	139010	31,4540	**0,0001**
An × Pr	6	48086	3,6269	**0,0001**
Résidus	168	371230		
Total	179	610900		

Résultats des tests *a posteriori* pour l'interaction *An × Pr* au site ReE

	t	*p(perm)*
Rive		
2021-2022	1,4966	0,0635
2021-2023	1,6767	**0,0454**
2021-2024	1,5288	0,0612
2022-2023	0,4406	0,9853
2022-2024	1,3642	0,1181
2023-2024	1,5859	0,0829
Équilibre		
2021-2022	2,7667	**0,0001**
2021-2023	4,2337	**0,0001**
2021-2024	3,2420	**0,0001**
2022-2023	2,4081	**0,0001**
2022-2024	1,9155	**0,0001**
2023-2024	2,8137	**0,0001**
Large		
2021-2022	2,8018	**0,0001**
2021-2023	2,8489	**0,0001**
2021-2024	2,7386	**0,0001**
2022-2023	1,8332	**0,0020**
2022-2024	2,6145	**0,0001**
2023-2024	2,2419	**0,0001**

	t	*p(perm)*
2021		
Rive – Équilibre	2,3686	**0,0003**
Rive – Large	2,6354	**0,0001**
Équilibre – Large	3,0666	**0,0001**
2022		
Rive – Équilibre	3,2890	**0,0001**
Rive – Large	4,1896	**0,0001**
Équilibre – Large	2,7790	**0,0001**
2023		
Rive – Équilibre	4,2835	**0,0001**
Rive – Large	4,7314	**0,0001**
Équilibre – Large	3,1608	**0,0001**
2024		
Rive – Équilibre	2,1305	**0,0076**
Rive – Large	3,3604	**0,0001**
Équilibre – Large	2,6862	**0,0001**

Tableau 7. Résultats des analyses de variance multivariées par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du profil et leur interaction sur les abondances des assemblages d'invertébrés benthiques du site recharge ouest (ReO) de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données d'abondance transformées en racine quatrième.

Sources de variation	dl	SC	*pseudo-F*	*p(perm)*
Année	3	68918	11,0850	**0,0001**
Profil	2	125000	30,1570	**0,0001**
An × Pr	6	49398	3,9725	**0,0001**
Résidus	168	348180		
Total	179	591500		

Résultats des tests *a posteriori* pour l'interaction *An × Pr* au site ReO

	t	*p(perm)*
Rive		
2021-2022	1,9916	**0,0141**
2021-2023	1,5831	0,0791
2021-2024	1,6450	**0,0468**
2022-2023	1,4489	0,1450
2022-2024	2,3212	**0,0109**
2023-2024	2,1584	**0,0180**
Équilibre		
2021-2022	1,7963	**0,0004**
2021-2023	3,2104	**0,0001**
2021-2024	3,0108	**0,0001**
2022-2023	2,2992	**0,0001**
2022-2024	2,4539	**0,0001**
2023-2024	3,3459	**0,0001**
Large		
2021-2022	4,4259	**0,0001**
2021-2023	3,9419	**0,0001**
2021-2024	4,0722	**0,0001**
2022-2023	2,3398	**0,0001**
2022-2024	3,0482	**0,0001**
2023-2024	3,3838	**0,0001**

	t	*p(perm)*
2021		
Rive – Équilibre	2,1252	**0,0015**
Rive – Large	3,2791	**0,0001**
Équilibre – Large	1,6122	**0,0048**
2022		
Rive – Équilibre	2,5973	**0,0005**
Rive – Large	5,3028	**0,0001**
Équilibre – Large	3,1401	**0,0001**
2023		
Rive – Équilibre	3,7979	**0,0001**
Rive – Large	4,9193	**0,0001**
Équilibre – Large	3,1609	**0,0001**
2024		
Rive – Équilibre	2,3164	**0,0001**
Rive – Large	3,3675	**0,0001**
Équilibre – Large	2,5484	**0,0001**

Tableau 8. Résultats des analyses de variance multivariées par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du profil et leur interaction sur les abondances des assemblages d'invertébrés benthiques du site sous influence est (SiE) de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données d'abondance transformées en racine quatrième.

Sources de variation	dl	SC	*pseudo-F*	*p(perm)*
Année	3	66623	12,1410	**0,0001**
Profil	2	58929	16,1090	**0,0001**
An × Pr	6	22713	2,0696	**0,0001**
Résidus	168	307290		
Total	179	455560		

Résultats des tests *a posteriori* pour l'interaction *An × Pr* au site SiE

	t	*p(perm)*
Rive		
2021-2022	1,8534	**0,0007**
2021-2023	1,9494	**0,0006**
2021-2024	2,3359	**0,0001**
2022-2023	1,2951	0,1710
2022-2024	2,3945	**0,0002**
2023-2024	2,1667	**0,0005**
Équilibre		
2021-2022	2,4155	**0,0001**
2021-2023	2,9062	**0,0001**
2021-2024	2,6578	**0,0001**
2022-2023	1,7265	**0,0124**
2022-2024	2,9462	**0,0001**
2023-2024	3,0632	**0,0001**
Large		
2021-2022	2,1561	**0,0001**
2021-2023	2,5975	**0,0001**
2021-2024	2,3011	**0,0001**
2022-2023	2,0458	**0,0001**
2022-2024	2,0006	**0,0001**
2023-2024	1,9515	**0,0001**

	t	*p(perm)*
2021		
Rive – Équilibre	0,9554	0,4911
Rive – Large	2,2783	**0,0001**
Équilibre – Large	1,9934	**0,0007**
2022		
Rive – Équilibre	2,4243	**0,0004**
Rive – Large	3,5571	**0,0001**
Équilibre – Large	2,5987	**0,0001**
2023		
Rive – Équilibre	2,3186	**0,0001**
Rive – Large	2,9950	**0,0001**
Équilibre – Large	2,9722	**0,0001**
2024		
Rive – Équilibre	2,1291	**0,0005**
Rive – Large	2,6707	**0,0001**
Équilibre – Large	2,5363	**0,0001**

Tableau 9. Résultats des analyses de variance multivariées par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du profil et leur interaction sur les abondances des assemblages d'invertébrés benthiques du site sous influence ouest (SiO) de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données d'abondance transformées en racine quatrième.

Sources de variation	dl	SC	*pseudo-F*	*p(perm)*
Année	3	74519	19,8060	**0,0001**
Profil	2	56400	22,4850	**0,0001**
An × Pr	6	19247	2,5578	**0,0001**
Résidus	168	210700		
Total	179	360870		

Résultats des tests *a posteriori* pour l'interaction *An × Pr* au site SiO

	t	*p(perm)*
Rive		
2021-2022	2,0516	**0,0002**
2021-2023	3,2227	**0,0001**
2021-2024	2,7511	**0,0001**
2022-2023	3,3957	**0,0001**
2022-2024	1,8263	**0,0030**
2023-2024	3,6503	**0,0001**
Équilibre		
2021-2022	2,3721	**0,0001**
2021-2023	3,4219	**0,0001**
2021-2024	2,8375	**0,0001**
2022-2023	1,6942	**0,0036**
2022-2024	2,8533	**0,0001**
2023-2024	3,8499	**0,0001**
Large		
2021-2022	3,0911	**0,0001**
2021-2023	3,5708	**0,0001**
2021-2024	2,9434	**0,0001**
2022-2023	1,6868	**0,0079**
2022-2024	2,9800	**0,0001**
2023-2024	3,3546	**0,0001**

	t	*p(perm)*
2021		
Rive – Équilibre	2,3859	**0,0006**
Rive – Large	2,8141	**0,0001**
Équilibre – Large	1,1677	0,2372
2022		
Rive – Équilibre	3,4304	**0,0001**
Rive – Large	3,4401	**0,0001**
Équilibre – Large	2,1475	**0,0001**
2023		
Rive – Équilibre	2,8318	**0,0001**
Rive – Large	2,7550	**0,0001**
Équilibre – Large	3,1596	**0,0001**
2024		
Rive – Équilibre	3,2073	**0,0001**
Rive – Large	3,0253	**0,0001**
Équilibre – Large	1,9188	**0,0013**

Tableau 10. Résultats de l'analyse de variance multivariée par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du profil et leur interaction sur les abondances des assemblages d'invertébrés benthiques du site référence est (RfE) de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données d'abondance transformées en racine quatrième.

Sources de variation	dl	SC	*pseudo-F*	*p(perm)*
Année	3	65526	11,1760	**0,0001**
Profil	2	117450	30,0470	**0,0001**
An × Pr	6	33802	2,8826	**0,0001**
Résidus	168	328340		
Total	179	545120		

Résultats des tests *a posteriori* pour l'interaction *An × Pr* au site RfE

	t	*p(perm)*
Rive		
2021-2022	1,2589	0,1346
2021-2023	2,6338	**0,0001**
2021-2024	2,7525	**0,0001**
2022-2023	1,7504	**0,0036**
2022-2024	2,1271	**0,0002**
2023-2024	3,0010	**0,0001**
Équilibre		
2021-2022	1,7517	**0,0074**
2021-2023	2,4110	**0,0001**
2021-2024	2,1792	**0,0002**
2022-2023	1,4753	**0,0285**
2022-2024	2,6010	**0,0001**
2023-2024	2,3237	**0,0001**
Large		
2021-2022	2,6477	**0,0001**
2021-2023	3,3957	**0,0001**
2021-2024	2,8353	**0,0001**
2022-2023	2,7395	**0,0001**
2022-2024	2,5636	**0,0001**
2023-2024	2,7667	**0,0001**

	t	*p(perm)*
2021		
Rive – Équilibre	2,6676	**0,0001**
Rive – Large	3,1471	**0,0001**
Équilibre – Large	1,5505	**0,0267**
2022		
Rive – Équilibre	2,5698	**0,0001**
Rive – Large	2,6631	**0,0001**
Équilibre – Large	3,6852	**0,0001**
2023		
Rive – Équilibre	3,4643	**0,0001**
Rive – Large	4,1598	**0,0001**
Équilibre – Large	3,5922	**0,0001**
2024		
Rive – Équilibre	3,5778	**0,0001**
Rive – Large	4,6127	**0,0001**
Équilibre – Large	2,2943	**0,0001**

Tableau 11. Résultats des analyses de variance multivariées par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de l'année, du profil et leur interaction sur les abondances des assemblages d'invertébrés benthiques du site référence ouest (RfO) de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022, 2023 et 2024. La distribution des assemblages a été calculée à partir de la matrice de similarité de Bray-Curtis, sur des données d'abondance transformées en racine quatrième.

Sources de variation	dl	SC	*pseudo-F*	*p(perm)*
Année	3	53446	13,3600	**0,0001**
Profil	2	32626	12,2330	**0,0001**
An × Pr	6	27351	3,4184	**0,0001**
Résidus	158	210700		
Total	169	325240		

Résultats des tests *a posteriori* pour l'interaction *An × Pr* au site RfO

	t	*p(perm)*
Rive		
2021-2022	1,3821	0,1013
2021-2023	3,1927	**0,0001**
2021-2024	2,5478	**0,0002**
2022-2023	2,2879	**0,0001**
2022-2024	1,9420	**0,0031**
2023-2024	2,8912	**0,0001**
Équilibre		
2021-2022	2,2747	**0,0002**
2021-2023	3,0456	**0,0001**
2021-2024	3,1413	**0,0001**
2022-2023	1,8992	**0,0049**
2022-2024	3,4116	**0,0001**
2023-2024	2,9622	**0,0001**
Large		
2021-2022	3,2267	**0,0001**
2021-2023	3,3581	**0,0001**
2021-2024	3,1869	**0,0001**
2022-2023	1,8876	**0,0043**
2022-2024	2,6137	**0,0003**
2023-2024	2,5039	**0,0001**

	t	*p(perm)*
2021		
Rive – Équilibre	2,9669	**0,0001**
Rive – Large	3,5728	**0,0001**
Équilibre – Large	1,4685	0,0818
2022		
Rive – Équilibre	1,8654	**0,0056**
Rive – Large	1,9777	**0,0017**
Équilibre – Large	1,6306	**0,0223**
2023		
Rive – Équilibre	1,6220	**0,0235**
Rive – Large	2,8742	**0,0001**
Équilibre – Large	2,1972	**0,0008**
2024		
Rive – Équilibre	1,3463	0,1062
Rive – Large	1,9947	**0,0048**
Équilibre – Large	2,0202	**0,0004**

4 Synthèse des résultats de l'année 3 après les travaux de recharge

- Le contenu en matière organique des sédiments est très faible.

- Les sédiments sont majoritairement des sables fins et moyens pour tous les sites, à l'exception des sites ReE et ReO qui montrent également une forte proportion de gravier.

- 71 taxons d'invertébrés benthiques ont été inventoriés.

- L'espèce végétale *Zostera marina* a été observée à 19 stations. Aucune espèce aquatique envahissante n'a été répertoriée, ni aucune nouvelle espèce ou nouvelle mention pour le Saint-Laurent.

- En termes d'abondance relative, ce sont les nématodes qui dominent, suivi des oligochètes et des copépodes harpacticoïdes.

- En termes de biomasse relative, ce sont les bivalves *Mya arenaria* et *Macoma balthica* qui dominent, comme c'était le cas en 2021, 2022 et 2023.

- 5 taxons sont dits fréquents (Nematoda, Oligochaeta, *Macoma balthica*, *Mya arenaria* et Harpacticoida), 16 taxons sont dits communs et 50 sont dits rares.

- Aucun organisme n'a été dénombré à 12 stations dont 8 étaient dans le site ReE et 4 dans le site ReO.

- Après 4 ans de prélèvement, les courbes d'accumulation d'espèces sont vraiment moins prononcées et on semble atteindre un plateau en 2024, ce qu'il signifie qu'il y a maintenant vraiment moins de nouvelles espèces à identifier pour ce site d'étude.

- Les analyses de variance ont montré des interactions significatives pour toutes les sources de variation, incluant l'interaction entre les facteurs *année*, *site* et *profil* et ce, pour toutes les caractéristiques des communautés (richesse spécifique, abondance totale, biomasse totale, indice d'équitabilité de Pielou et indice de diversité de Shannon-Wiener).

- Les analyses multivariées ont révélé des différences significatives des assemblages d'organismes benthiques pour toutes les sources de variation et leurs interactions. Les points importants sont résumés à la section 3.2.2.

5 Compilation des principaux des résultats du suivi biologique

Les principaux pour les trois années d'étude (avant recharge, années 1, 2 et 3 après recharge) sont synthétisés au **Tableau 12**.

Tableau 12. Synthèse des principaux résultats pour chacune des années 2021 à 2024 du suivi biologique de Pointe-aux-Outardes.
AR = Abondance relative ; BR = Biomasse relative

	Avant recharge (2021)	**Année 1 après recharge (2022)**	**Année 2 après recharge (2023)**	**Année 3 après recharge (2024)**
Portrait des sédiments				
Contenu en MO	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible
Type de sédiments	Majoritairement des sables fins	Majoritairement des sables fins	Majoritairement des sables fins et moyens, sauf pour les sites Re	Majoritairement des sables fins et moyens, sauf pour les sites recharge
Portrait des algues				
Espèces d'algues	NA	Présence de zostères à 15 stations	Présence de zostères à 14 stations	Présence de zostères à 19 stations
Portrait des assemblages benthiques				
Nombre de taxons	57 taxons	71 taxons	53 taxons	71 taxons
Espèces envahissantes	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
Nouvelles mentions	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
Abondance relative **Biomasse relative**	AR : Oligochètes, *Gammarus lawrencianus*, *Macoma balthica* et nématodes BR : *Mya arenaria* et *Macoma balthica*	AR : Nématodes, oligochètes, *Gammarus* sp. et *Pseudoleptocuma minus* BR : *Mya arenaria* et *Macoma balthica*	AR : *Pseudoleptocuma minus* et *Gammarus* sp. BR *: Mya arenaria* et *Macoma balthica*	AR : Nématodes, oligochètes, et copépodes harpacticoïdes. BR *: Mya arenaria* et *Macoma balthica*
Espèces fréquentes (> 50% des stations)	2 taxons; *Macoma balthica* et *Mya arenaria*	5 taxons; *Macoma balthica*, Oligochaeta, Nematoda, *Gammarus* sp. et *Mya arenaria*	6 taxons; *Macoma balthica*, Oligochaeta, Nematoda, *Gammarus* sp. et *Mya arenaria*	5 taxons : Nematoda, Oligochaeta, *Macoma balthica*, *Mya arenaria* et Harpacticoida
Espèces communes (11%-49% des stations)	10 taxons	12 taxons	15 taxons	16 taxons
Espèces rares (≤10% des stations)	45 taxons	51 taxons	38 taxons	50 taxons

Tableau 12 (suite). Synthèse des principaux résultats pour chacune des années 2021 à 2024 du suivi biologique de Pointe-aux-Outardes.
AR = Abondance relative ; BR = Biomasse relative

	Avant recharge (2021)	**Année 1 après recharge (2022)**	**Année 2 après recharge (2023)**	**Année 3 après recharge (2024)**
Portrait des assemblages benthiques				
Richesse spécifique	Max 14 taxons/station Moy 4,5 ± 0,2 taxons/station	Max 24 taxons/station Moy 6,7 ± 4,6 taxons/station	Max 19 taxons/échantillon Moy 7,2 ± 4,2 taxons/échantillon	Max 29 taxons/échantillon Moy 8,7 ± 0,3 taxons/échantillon
Abondance	Max 71 494 individus/m^2 Moy 3592 ± 430 individus/m^2	Max119 939 individus/m^2 Moy 9614 ± 17261 individus/m^2	Max 373 823 individus/m^2 Moy 20 360 ± 46 008 individus/m^2	Max 175 545 individus/m^2 Moy 15 576 ± 1 413 individus/m^2
Biomasse	Max 5696 g/m^2 Moy 349 ± 41 g/m^2	Max 187 226 g/m^2 Moy 987 ± 11606 g/m^2	Max 33 570 g/m^2 Moy 474 ± 2151 g/m^2	Max 4 448 g/m^2 Moy de 364 ± 38 g/m^2
Indice d'équitabilité de Pielou	Indice moyen de 0,55 ± 0,02	Indice moyen de 0,69 ± 0,18	Indice moyen de 0,61 ± 0,20	Indice moyen de 0,68 ± 0,01
Indice de diversité de Shannon-Wiener	Indice moyen de 0,87 ± 0,04	Indice moyen de 1,12 ± 0,59	Indice moyen de 1,06 ± 0,56	Indice moyen de 1,33 ± 0,03
Analyses multivariées	Différences significatives selon l'interaction entre les facteurs site et profil	Différences significatives des assemblages d'organismes benthiques pour toutes les sources de variation et leurs interactions	Différences significatives des assemblages d'organismes benthiques pour toutes les sources de variation et leurs interactions	Différences significatives des assemblages d'organismes benthiques pour toutes les sources de variation et leurs interactions

6 Références

Anderson MJ (2001) A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. Austral Ecology 26: 32-46.

Archambault P, Banwell K, Underwood AJ (2001) Temporal variation in the structure of intertidal assemblages following the removal of sewage. Marine Ecology Progress Series 222: 51-62.

Baca BJ, Lankford TE (1988) Myrtle beach nourishment project: biological monitoring. Report to City of Myrtle Beach, South Carolina.

Baptist MJ, Tamis JE, Borsje BW, van der Werf JJ et Holzhauer H (2009) Review of the geomorphological, benthic ecological and biogeomorphological effects of nourishments on the shoreface and surf zone of the Dutch coast. Wageningen IMARES report C113/08, Deltares report Z4582.50: 68 p.

Bergquist DC, Crowe SE (2009) Using historical data and meta-analyses to improve monitoring and management of beach nourishment in South Carolina. Final report prepared by the South Carolina Department of Natural Resources, Marine Resources Research Institute. SC Department of Health and Environmental Control (SCDHEC), Charleston, SC. 99 pp.

Bernatchez P, Dubois JM (2004) Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. Géographie physique et Quaternaire, 58(1), 45-71.

Bernatchez P, Drejza S, Dugas S (2012) Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des îles de la Madeleine. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, juillet 2012, 71 p. + annexes.

Bernatchez P, Dugas S, Fraser C, Da Silva L (2015) Évaluation économique des impacts potentiels de l'érosion des côtes du Québec maritime dans un contexte de changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Remis à Ouranos, mai 2015, 53 p. + annexes.

Bird E, Lewis N (2015) Beach Renourishment. Springer Briefs in Earth Sciences. 137 p.

Carley JT, Cox RJ (2017) Guidelines for Sand Nourishment Science and Synthesis for NSW. NSW Office of Environment and Heritage's Coastal Processes and Responses Node -Technical Report 263. 54 p.

Clarke DG, Wilber DH (2000) Assessment of potential impacts of dredging operations due to sediment resuspension. DOER Technical Note Collection (ERDCTN-DOER-E9), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg.

Clarke KR, Gorley RN (2006) PRIMER v6: User Manual/Tutorial. PRIMER-E, Plymouth, UK, 190 p.

Clarke KR, Warwick RM (1994) Changes in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation. Plymouth Marine Laboratory. Plymouth, UK, 141 pp.

Clarke KR, Warwick RM (2001) Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation, 2nd edition. PRIMER-E, Plymouth, UK.

Corriveau M, Bernatchez P, Belzile M, Senneville S (2018) Influence de la réduction du couvert de glace sur l'érosion côtière en bordure des infrastructures routières de l'Est du Québec dans un contexte de changements climatiques (CC04.1) : Rapport final. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Remis au ministère des Transports du Québec, avril 2019, 457 p. + annexes

Defeo O, McLachlan A, Schoeman DS, Schlacher TA and others (2009) Threats to sandy beach ecosystems: a review. Estuar Coast Shelf Sci 81: 1−12.

Downes BJ, Barmuta LA, Fairweather PG, Faith DP, Keough MJ, Lake PS, Mapstone BD, Quinn GP (2002) Monitoring ecological impacts: concepts and practices in flowing waters. Cambridge University Press, Cambridge, 434 pp.

DREAL Languedoc-Roussillon (2011) Document de cadrage préalable des études d'impact relatives aux opérations côtières de protection du littoral sableux du Languedoc-Roussillon. 209 p.

Drejza S, Friesinger S, Bernatchez P (2014) Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est du Québec, Volume I, Projet X008.1. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Remis au ministère des Transports du Québec, mars 2014, 226 p. + annexes.

DesJarlais C, Allard M, Blondot A, Bourque A, Chaumont D, Gosselin P, Houle D, Larrivée C, Lease N, Roy R, Savard JP, Turcotte R, Villeneuve C (2010) Savoir s'adapter aux changements climatiques. (En ligne). Ouranos, Montréal, Québec. 128 p.
Fraschetti S, Bianchi CN, Terlizzi A, Fanelli G, Morri C, Boer F (2001) Spatial variability and human disturbance in shallow subtidal hard substrate assemblages: a regional approach. Marine Ecology Progress Series 212: 1-12.

Forbes DL, Parkes GS, Manson GK, Ketch LA (2004) Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. Marine Geology, 210(1-4): 169-204.

Glasby TM (1997) Analysing data from post-impact studies using asymmetrical analyses of variance: a case study of epibiota on marinas. Australian Journal of Ecology 22: 448-459.

Greene, K (2002) Beach nourishment a review of the biological and physical impacts. ASMFC, Habitat Management Series no. 7. Atlantic States Marine Fisheries Commission, Washington, DC. 179 p.

Groupe-conseil LaSalle, "Pointe-aux-Outardes – Modélisation numérique des vagues, des courants littoraux et du transport sédimentaire », Mars 2013, Rapport GCL R.1832, Rapport présenté à DESSAU

Hackney CT, Posey MH, Ross SW, Norris AR (1996) A Review and Synthesis Of Data: Surf Zone Fishes and Invertebrates in the South Atlantic Bight and the Potential Impacts from Beach Nourishment. Prepared for the U.S. Army Corps of Engineers, Wilmington District, Wilmington, NC.

Hébert S (2005) Le Saint-Laurent - La qualité des eaux du fleuve 1990-2003, Québec, Ministère de l'Environnement, 25 p.

Jutte PC, Van Dolah FR, Gayes TP (2002) Recovery of benthic communities following offshore dredging, Myrtle Beach, South Carolina. Shore and Beach, 70: 25-30.

Lasalle|NHC (2020) Projet de protection du littoral de Pointe-aux-Outardes. Modélisation numérique des conditions hydro-sédimentaires. Rapport R.0235, projet 08003855.

Leclerc M, Dupuis P (2008) Recherche d'une solution économique et durable à la problématique d'érosion littorale à Pointe-aux-Outardes, Pour le compte de la Ville de Pointe-aux-Outardes et du Ministère de la Sécurité publique, en collaboration avec OURANOS et divers partenaires. Rapport de recherche INRS-ÉTÉ R990 et Aquapraxis Inc. 10136-100.

Plan d'action Saint-Laurent (2014) Données générales sur le Saint-Laurent. Milieu marin. (En ligne). Plan d'action Saint-Laurent. [http://planstlaurent.qc.ca/fr/gestion_integree/forum_saint_laurent/octobre_2014/documentation/donnees_generales_sur_le_saint_laurent_milieu_marin.html]

Plan d'action Saint-Laurent (2019) Portrait global de l'état du Saint-Laurent 2019. Environnement et Changement climatique Canada, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Parcs Canada, Pêches et Océans Canada, Stratégie Saint-Laurent. 60 pages.

Pearson TH, Rosenberg R (1978) Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. Oceanography and Marine Biology. An Annual Review 16: 229-311.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2017) Direction de l'évaluation environnementale des projets hydriques et industriels. Rapport d'analyse environnementale de la demande de soustraction à la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement du projet de protection et de réhabilitation du littoral de l'Anse du Sud sur le territoire de la Ville de Percé. Dossier 3216-02-052. 43 p.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2015) Guide d'interprétation, Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, Direction des politiques de l'eau, 131 p.

Ministère de la Sécurité Publique (MSP) (2012) S'adapter au littoral maritime - Ouvrages de protection. Gouvernement du Québec. [https://www.securitepublique.gouv.qc.ca/fileadmin/Documents/securite_civile/publications/erosion/erosion-ouvrage_protection.pdf]

Naqvi SM, Pullen EJ (1982) Effects of Beach Nourishment and Borrowing on Marine Organisms. Coastal Engineering Research Center, Vicksburg MS. Miscellaneous rept. no. 82-14.

Nelson WG (1985) Physical and Biological Guidelines for Beach Restoration Projects. Part I. Biological Guidelines. Report No. 76. Florida Sea Grant College, Gainesville.

Peterson CH, Bishop MJ (2005) Assessing the environmental impacts of beach nourishment. BioScience, 55(10): 887-896.

Peterson CH, Bishop MJ, D'Anna LM, Johnson GA (2014) Multi-year persistence of beach habitat degradation from nourishment using coarse shelly sediments. Sci. Total Environ. 487: 481-492.

Quinn GP, Keough MJ (2002) Experimental design and data analysis for biologists. Cambridge University Press, Cambridge, 560 p.

Ropars Y (2020) « Érosion des berges – Réalisation de travaux de stabilisation – Pointe-aux-Outardes – Dossier P031725 », Mai 2013, Rapport remis à DESSAU.

Rosenberg R, Blomqvist M, Nilsson HC, Cederwall H, Dimming A (2004) Marine quality assessment by use of benthic species-abundance distributions: a proposed new protocol within the European Union water framework directive. Marine Pollution Bulletin 49: 728-739.

Rosov B, Bush S, Briggs TR, Elko N (2016) The state of understanding the impacts of beach nourishment activities on infaunal communities. Shore & Beach. Vol. 84, No. 3: 51-55.

Speybroeck J, Bonte D, Courtens W, Gheskiere T, Grootaert P, Maelfait JP, Mathys M, Provoost S, Sabbe K, Stienen E, Van Lancker V, Vincx M, Degraer S (2006) Beach nourishment: An ecologically sound coastal defence alternative? A review. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 16: 419 - 435.

Underwood AJ (1993a) How not to design an environmental monitoring program: a case study from the FAC (up in Botany Bay). Australian Biologist 6:194-197.

Underwood AJ (1993b) The mechanics of spatially replicated sampling programs to detect environmental impacts in a variable world. Australian Journal of Ecology 18: 99-116.

Underwood AJ (1994) Things environmental scientists (and statisticians) need to know to receive (and give) better statistical advice. In: Fletcher DJ, Manly BFJ (eds) Statistics in ecology and environmental monitoring. University of Otago Press, Dunedin, pp. 33-61.

Underwood AJ (2000a) Importance of experimental design in detecting and measuring stresses in marine populations. Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery 7: 3-24.

Underwood AJ (2000b) Trying to detect impacts in marine habitats: comparisons with suitable reference areas. In: Sparks T (ed) Statistics in Ecotoxicology. John Wiley & Sons, LTD, Toronto, pp. 279-308.

Underwood AJ, Chapman MG (2003) Power, precaution, Type II error and sampling design in assessment of environmental impacts. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 296: 49-70.

US Army Corps of Engineers (USACE) (2014) Final integrated feasability report and environmental impact statement; coastal storm damage reduction. Appendix I cumulative impacts. Bogue Banks, Carteret County, North Carolina. 28 p.

Wentworth CK (1922) A scale of grade and class terms for clastic sediments. J. Geol. 30: 377-392.

WoRMS Editorial Board (2021) World Register of Marine Species. [http://www.marinespecies.org] doi:10.14284/170.

Wooldridge T, Henter HJ, Kohn JR (2016) Effects of beach replenishment on intertidal invertebrates: a 15 month, eight beach study. Estuarine, Coastal and Shelf Science. Volume 175: 24-33.

Annexe 1. Taxons inventoriés à Pointe-aux-Outardes en 2024 avec leur abondance relative (Ab rel, %), leur biomasse relative (Bio rel, %) et leur coefficient de fréquence (CF, %).

aphia	phylum	classe	ordre	nom scientifique	ab rel	bio rel	CF
158019	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Americorchestia megalophthalma*	< 0.01	< 0.01	0.37
547000	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Ameroculodes edwardsi*	0.50	< 0.01	9.26
1135	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	Amphipoda	0.10	< 0.01	10.74
882	Annelida			Annelida	0.20	< 0.01	2.22
106215	Arthropoda	Thecostraca	Balanomorpha	*Balanus crenatus*	0.01	0.04	2.22
105	Mollusca	Bivalvia		Bivalvia	0.19	0.61	10.74
102178	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Calliopius laeviusculus*	0.20	< 0.01	8.89
158056	Arthropoda	Malacostraca	Decapoda	*Cancer borealis*	< 0.01	0.02	0.37
1066	Arthropoda			Crustacea	0.04	< 0.01	5.56
1137	Arthropoda	Malacostraca	Cumacea	Cumacea	0.02	< 0.01	2.59
1130	Arthropoda	Malacostraca	Decapoda	Decapoda	0.01	0.05	0.74
547044	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Deflexilodes intermedius*	0.29	< 0.01	3.70
129611	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Dipolydora* sp.	0.01	< 0.01	1.11
131121	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Dipolydora quadrilobata*	0.16	< 0.01	4.07
574096	Mollusca	Gastropoda	Littorinimorpha	*Ecrobia truncata*	0.10	0.01	1.48
157885	Arthropoda	Malacostraca	Isopoda	*Edotia triloba*	0.02	0.01	2.22
130616	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	*Eteone longa*	0.17	0.05	14.07
333456	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	*Exogone verugera*	0.07	< 0.01	2.59
101383	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	Gammaridae	0.03	< 0.01	1.85
101537	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Gammarus* sp.	0.08	< 0.01	3.70
158093	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Gammarus lawrencianus*	0.04	0.01	1.48
102285	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Gammarus oceanicus*	0.18	0.03	6.30
101	Mollusca	Gastropoda		Gastropoda	0.03	< 0.01	2.59
1102	Arthropoda	Copepoda	Harpacticoida	Harpacticoida	15.43	0.02	54.44
152302	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	*Hediste diversicolor*	0.67	3.78	35.56
120	Mollusca	Gastropoda	Littorinimorpha	Hydrobiidae	0.59	0.04	5.56
157891	Arthropoda	Malacostraca	Isopoda	*Idotea phosphorea*	0.02	0.02	1.11
264171	Arthropoda	Malacostraca	Isopoda	*Jaera (Jaera) albifrons*	0.06	< 0.01	3.33
138135	Mollusca	Gastropoda	Littorinimorpha	*Littorina* sp.	0.84	0.06	5.93
140262	Mollusca	Gastropoda	Littorinimorpha	*Littorina littorea*	0.00	0.04	0.37

Annexe 1 (suite). Taxons inventoriés à Pointe-aux-Outardes en 2024 avec leur abondance relative (ab rel, %), leur biomasse relative (bio rel, %) et leur coefficient de fréquence (CF, %).

aphia	phylum	classe	ordre	nom scientifique	ab rel	bio rel	CF
140263	Mollusca	Gastropoda	Littorinimorpha	*Littorina obtusata*	0.01	< 0.01	0.74
140264	Mollusca	Gastropoda	Littorinimorpha	*Littorina saxatilis*	0.26	0.17	7.41
141579	Mollusca	Bivalvia	Cardiida	*Macoma balthica*	5.79	34.07	68.15
131135	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Marenzelleria viridis*	0.07	0.04	5.93
156805	Mollusca	Bivalvia	Venerida	*Mesodesma arctatum*	0.09	5.39	14.07
130168	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	*Microphthalmus aberrans*	0.01	< 0.01	0.74
51	Mollusca			Mollusca	0.03	0.10	3.33
140430	Mollusca	Bivalvia	Myida	*Mya arenaria*	2.73	49.70	65.19
149668	Arthropoda	Malacostraca	Mysida	Mysida	0.01	< 0.01	1.11
138228	Mollusca	Bivalvia	Mytilida	*Mytilus* sp.	0.54	3.60	14.44
799	Nematoda			Nematoda	36.81	0.07	83.70
152391	Nemertea			Nemertea	0.90	0.31	25.19
129370	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	*Nephtys* sp.	0.01	0.10	0.74
130355	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	*Nephtys caeca*	< 0.01	0.03	1.11
22496	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	Nereididae	3.19	0.02	45.56
130404	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	*Nereis pelagica*	0.05	0.05	3.33
102906	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Oediceros borealis*	0.15	< 0.01	2.59
101400	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	Oedicerotidae	0.61	< 0.01	14.81
2036	Annelida	Clitellata		Oligochaeta	17.64	0.11	83.33
129413	Annelida	Polychaeta		*Ophelia* sp.	0.08	< 0.01	3.33
130490	Annelida	Polychaeta		*Ophelia bicornis*	0.13	0.02	4.44
130494	Annelida	Polychaeta		*Ophelia limacina*	0.01	< 0.01	0.74
1078	Arthropoda	Ostracoda		Ostracoda	0.11	< 0.01	2.59
757970	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	*Parexogone hebes*	1.17	0.01	15.56
130603	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	*Pholoe minuta*	0.02	< 0.01	1.85
101403	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	Phoxocephalidae	0.06	< 0.01	2.22
102989	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Phoxocephalus holbolli*	0.48	0.02	4.07
931	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	Phyllodocidae	0.00	< 0.01	0.37

Annexe 1 (suite). Taxons inventoriés à Pointe-aux-Outardes en 2024 avec leur abondance relative (ab rel, %), leur biomasse relative (bio rel, %) et leur coefficient de fréquence (CF, %).

aphia	phylum	classe	ordre	nom scientifique	ab rel	bio rel	CF
793	Platyhelminthes			Platyhelminthes	0.00	< 0.01	0.37
1091	Arthropoda	Ostracoda	Podocopida	Podocopida	0.51	< 0.01	9.63
883	Annelida	Polychaeta		Polychaeta	0.31	0.60	39.63
131143	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Polydora cornuta*	0.25	0.01	6.67
157836	Arthropoda	Malacostraca	Cumacea	*Pseudoleptocuma minus*	3.09	0.01	35.56
131170	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Pygospio elegans*	3.56	0.03	33.70
129625	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Spio* sp.	0.01	< 0.01	0.74
157573	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Spio setosa*	0.09	0.08	8.15
334828	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Spio theeli*	0.30	0.02	11.85
913	Annelida	Polychaeta	Spionida	Spionidae	0.23	0.05	10.74
131191	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Streblospio benedicti*	0.01	< 0.01	1.48
234208	Mollusca	Gastropoda		*Testudinalia testudinalis*	< 0.01	< 0.01	0.37
1255501	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Wecomedon nobilis*	0.63	0.59	31.85