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

2023 — Année 2 après recharge

biome
laboratoire d'écologie et de biodiversité aquatique
Université Laval

1er mars 2024

UNIVERSITÉ LAVAL

Équipe de terrain 2023 :
Maude Arseneault
Donovan Cantin
Emilie Dallaire
Martin De Langy
Cindy Grant
Louis Guyon
Sonia Pagé
Alexis Pelletier Côté
Xavier Pratte
Evan Quessy
Kellyanne Rousseau
Michael Tremblay
Jessica Verreault

Conception des protocoles :
Cindy Grant

Traitement des échantillons et saisie de données :
Martin De Langy
Valérie Deshaies
Diane Gagnon
Sonia Pagé

Taxonomiste de référence :
Lisa Treau de Coeli

Mise en forme, validation des bases de données et statistiques :
Vincent Bellavance
Gabrièle Deslongchamps
Cindy Grant

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 1

1.1 Mise en contexte 1
1.2 Objectifs et hypothèses 1

2 MATÉRIEL ET MÉTHODE 2

2.1 Site d'étude 2
2.2 Prélèvements 3
2.3 Traitement en laboratoire 4
2.3.1 Caractérisation des sédiments 4
2.3.2 Caractérisation de la faune benthique 5
2.4 Approche statistique 5

3 RÉSULTATS 2023 – ANNÉE 2 APRÈS RECHARGE 7

3.1 Caractérisation des sédiments 7
3.2 Caractérisation des assemblages benthiques 12
3.2.1 Analyses univariées 16
3.2.2 Analyses multivariées 25

4 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ANNÉE 2 APRÈS LES TRAVAUX DE RECHARGE 33

5 COMPILATION DES PRINCIPAUX DES RÉSULATS DU SUIVI BIOLOGIQUE 34

6 RÉFÉRENCES 37

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). 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). 7

Figure 3. Contenu en matière organique des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour l'interaction entre les facteurs années (2021 en ■, 2022 en ■ et 2023 en ■) et sites : référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE). 8

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 2023. 9

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 2023. 9
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 2023. 10
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 2023. 10
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 2023. 11
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 2023. 11
Figure 10. Abondance relative (%) des invertébrés benthiques prélevés à Pointe-aux-Outardes en 2021 (■), 2022 (■) et 2023 (■). 14
Figure 11. Biomasse relative (%) des invertébrés benthiques prélevés à Pointe-aux-Outardes en 2021 (■), 2022 (■) et 2023 (■). 15
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 (–), en 2021 et 2022 combinés (–) et en 2021, 2022 et 2023 combinés (–). 16
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 et 2023 pour les profils près de la rive (**bleu**, n = 15/profil/site), à l'équilibre (**orange**, n = 15/ profil/site) et vers le large (**gris**, n = 15/ profil/site). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey. 20
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 et 2023 pour les profils près de la rive (**bleu**, n = 15/profil/site), à l'équilibre (**orange**, n = 15/ profil/site) et vers le large (**gris**, n = 15/ profil/site). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey. 21
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 et 2023 pour les profils près de la rive (**bleu**, n = 15/profil/site), à l'équilibre (**orange**, n = 15/ profil/site) et vers le large (**gris**, n = 15/ profil/site). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey. 22
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 et 2023 pour les profils près de la rive (**bleu**, n

= 15/profil/site), à l'équilibre (**orange**, n = 15/ profil/site) et vers le large (**gris**, n = 15/ profil/site). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey. 23
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 et 2023 pour les profils près de la rive (**bleu**, n = 15/profil/site), à l'équilibre (**orange**, n = 15/ profil/site) et vers le large (**gris**, n = 15/ profil/site). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey. 24

Liste des tableaux

Tableau 1. Identifiants et descriptions des sites choisis pour le suivi environnemental à la plage de Pointe-aux-Outardes. 3
Tableau 2. Paramètres échantillonnés ainsi que l'unité et la méthode d'échantillonnage utilisée. 4
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'). 17
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 et 2023. 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. 25
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 et 2023. 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. 26
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 et 2023. 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. 27
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 et 2023. 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. 28

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 et 2023. 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. 29
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 et 2023. 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. 30
Tableau 10. Résultats de l'analyse 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 est (RfE) de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022 et 2023. 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. 31
Tableau 11. Résultats des 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 et 2023. 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. 32
Tableau 12. Synthèse des principaux résultats pour chacune des années 2021 à 2023 du suivi biologique de Pointe-aux-Outardes. 35

Liste d'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 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.

[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.

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.
- 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 deux 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.

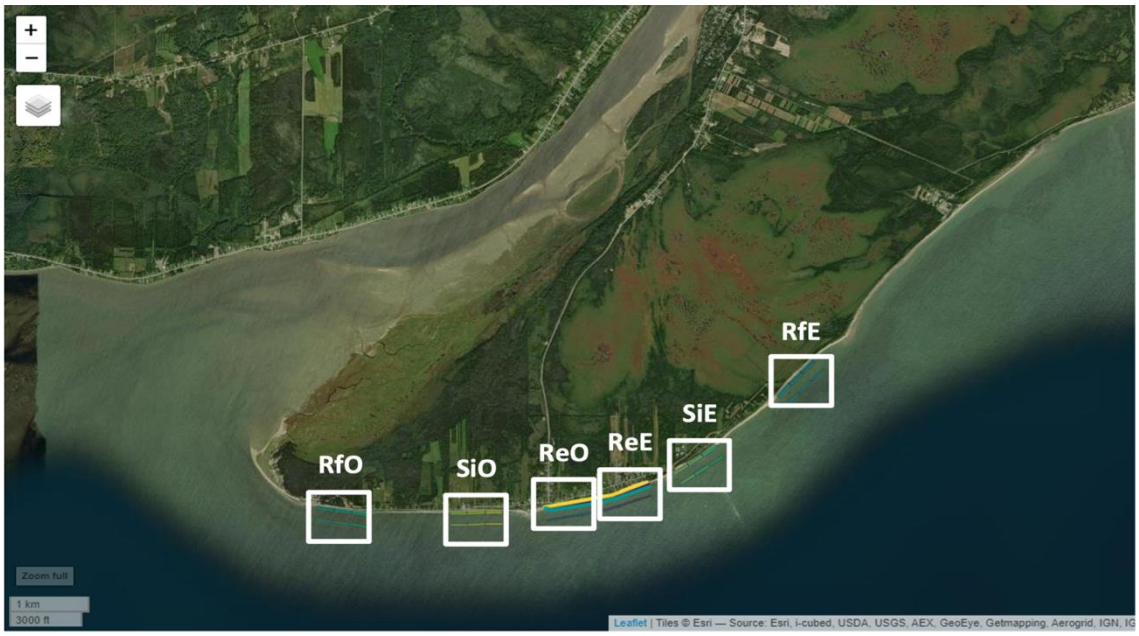


Figure 1. Localisation des 6 sites étudiés à Pointe-aux-Outardes dans le cadre du projet de suivi biologique du site de recharge de plage : référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE).

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 et 2023. En 2023, l'échantillonnage s'est déroulé du 5 au 10 juin 2023. 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
Classes 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 taxon/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 50×50 cm, tamisage ≥ 2 mm) ont été ramenées par mètre carré puis additionnées.

2.4 Approche statistique

Le plan d'échantillonnage pour l'année 2 du projet compte 3 facteurs : le facteur *Année* compte 3 niveaux (2021, 2022, 2023), 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), 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 2023 – Année 2 après recharge

3.1 Caractérisation des sédiments

Le contenu en matière organique des sédiments est très faible atteignant un maximum de 2,52% (valeur moyenne de 0,51 ± 0,02 %; **Figure 2**). Ces valeurs sont similaires a ce qui a été observé en 2021 et 2022, à l'exception des sites ReO et ReE qui montrent des contenus légèrement plus élevés en 2023 (**Figure 3**).

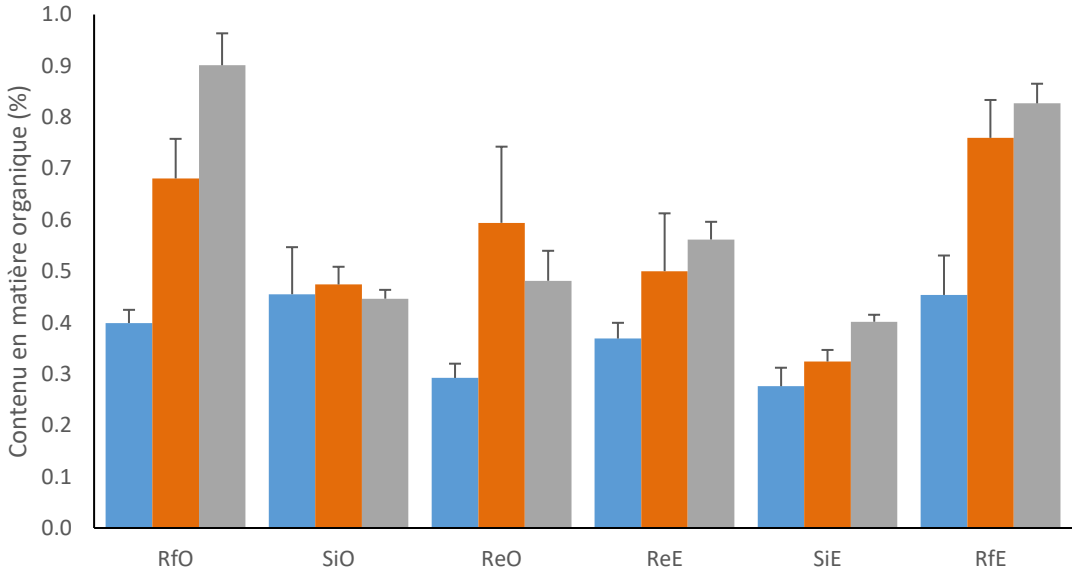


Figure 2. Contenu en matière organique des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour l'interaction entre les facteurs profil (= rive, = équilibre et = large) et sites : référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est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

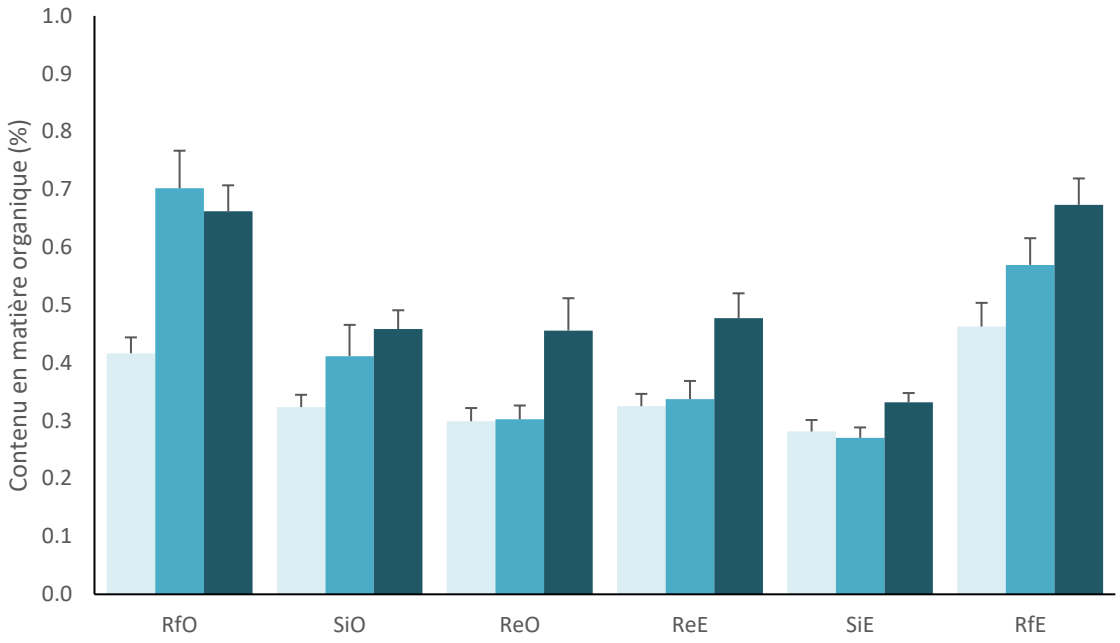


Figure 3. Contenu en matière organique des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour l'interaction entre les facteurs années (2021 en , 2022 en et 2023 en) et sites : référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (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'exeption des sites ReO et ReE qui présentent également une proportion importante de gravier (2000 – 4000 µm; Wentworth 1922;). On remarque aussi, qu'à l'intérieur d'un même site, les sédiments varient peu suivant le profil.

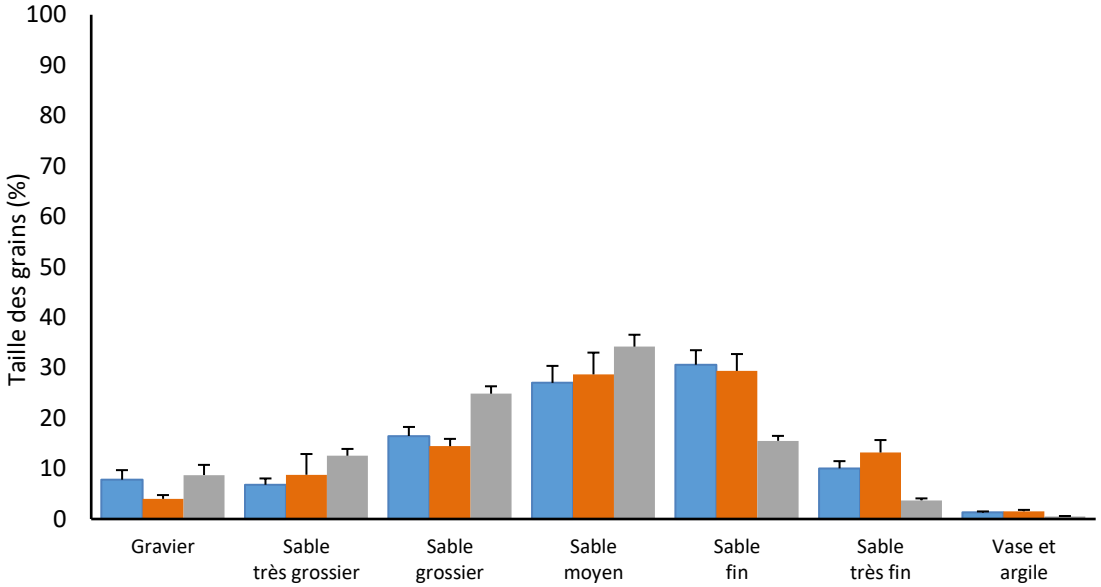


Figure 4. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (= rive, = équilibre et = large) au site référence ouest (RfO) de Pointe-aux-Outardes en 2023.

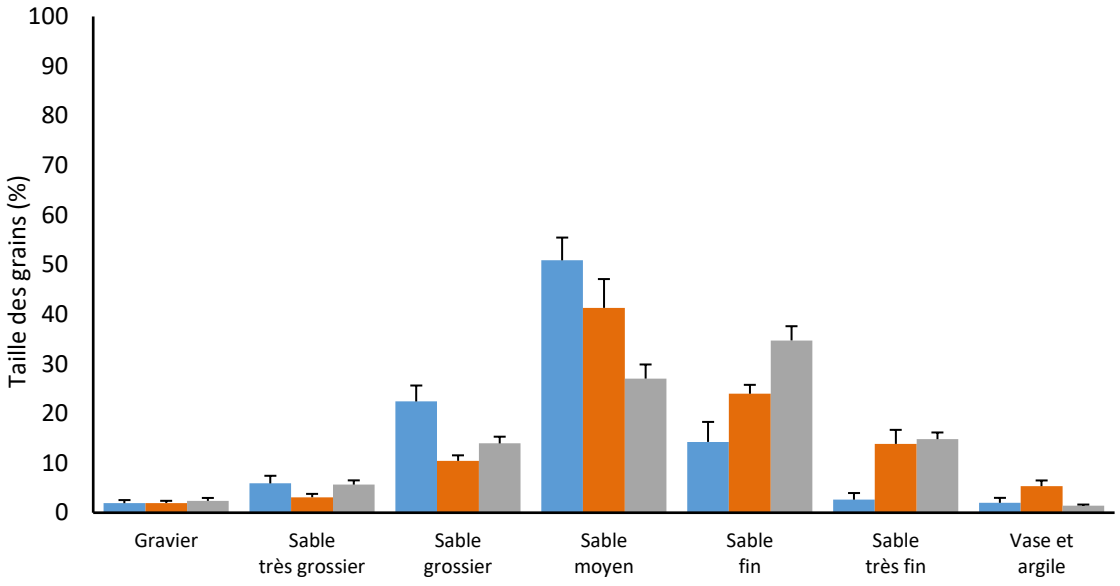


Figure 5. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (= rive, = équilibre et = large) au site sous influence ouest (SiO) de Pointe-aux-Outardes en 2023.

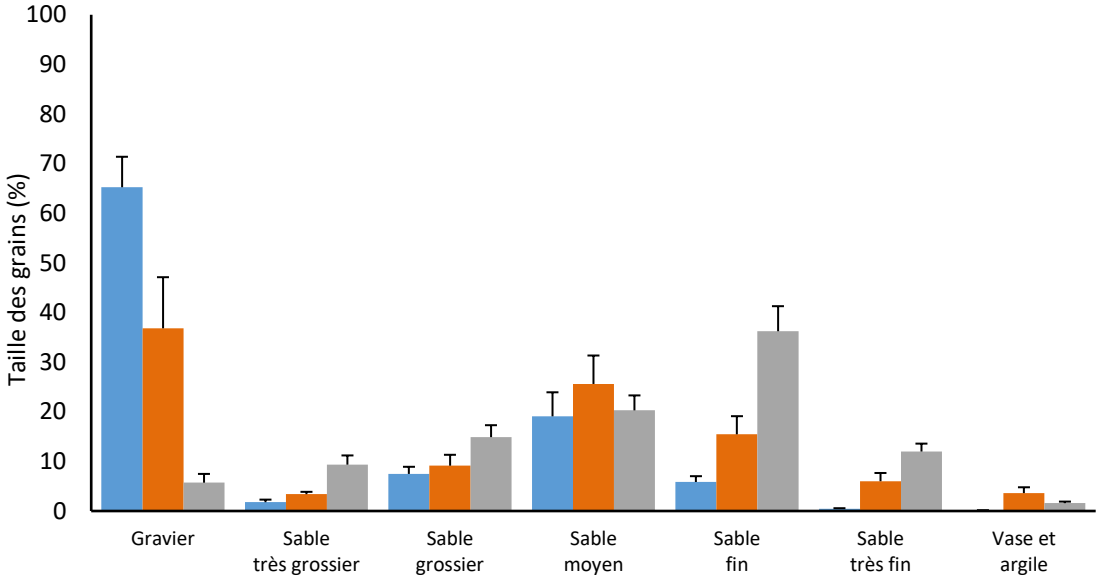


Figure 6. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (= rive, = équilibre et = large) au site recharge ouest (ReO) de Pointe-aux-Outardes en 2023.

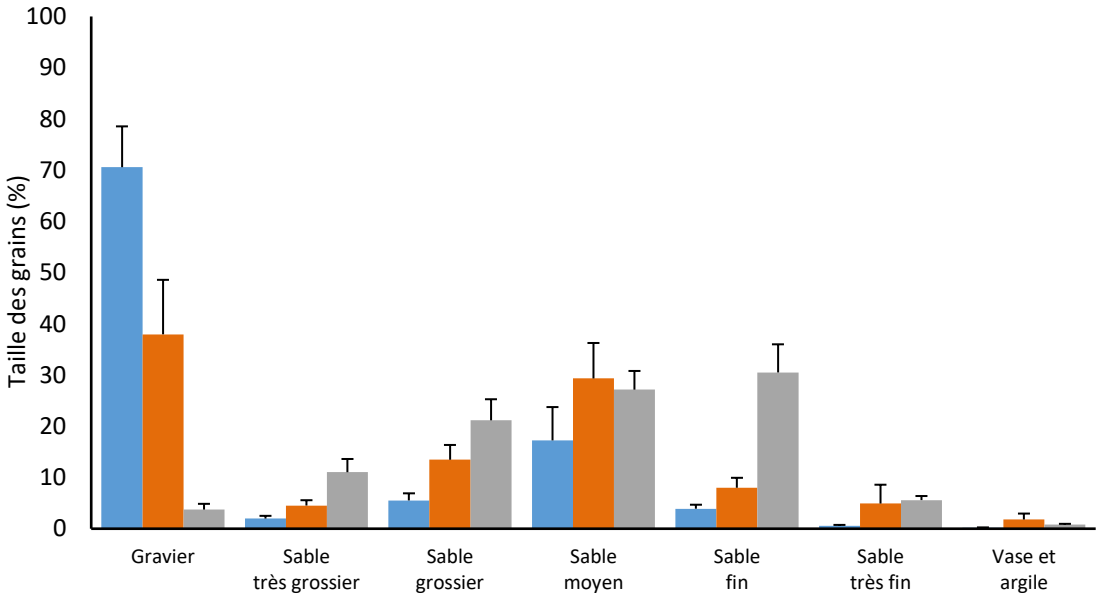


Figure 7. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (= rive, = équilibre et = large) au site recharge est (ReE) de Pointe-aux-Outardes en 2023.

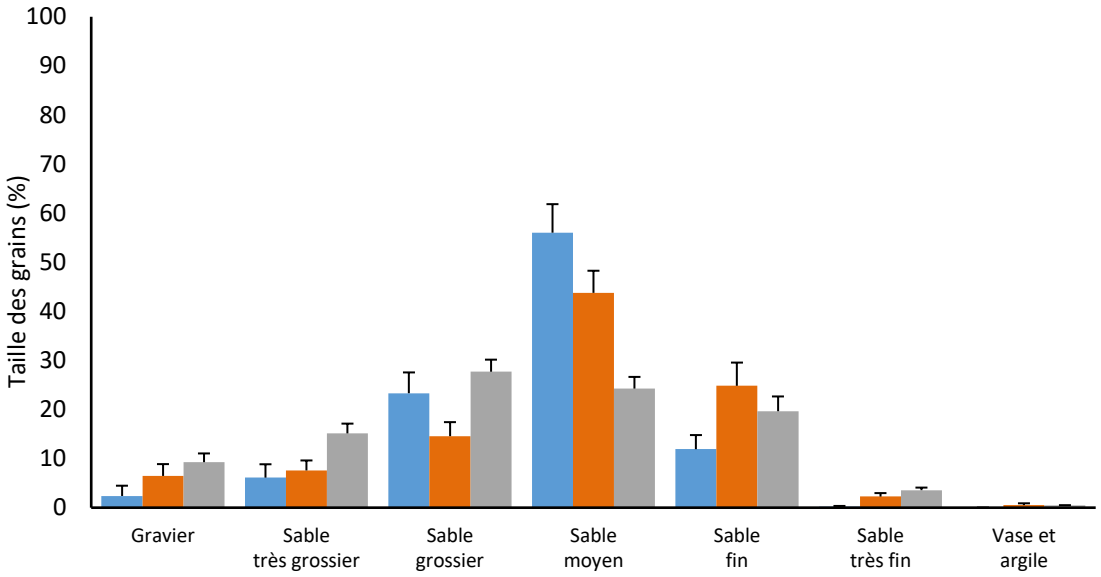


Figure 8. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (= rive, = équilibre et = large) au site sous influence est (SiE) de Pointe-aux-Outardes en 2023.

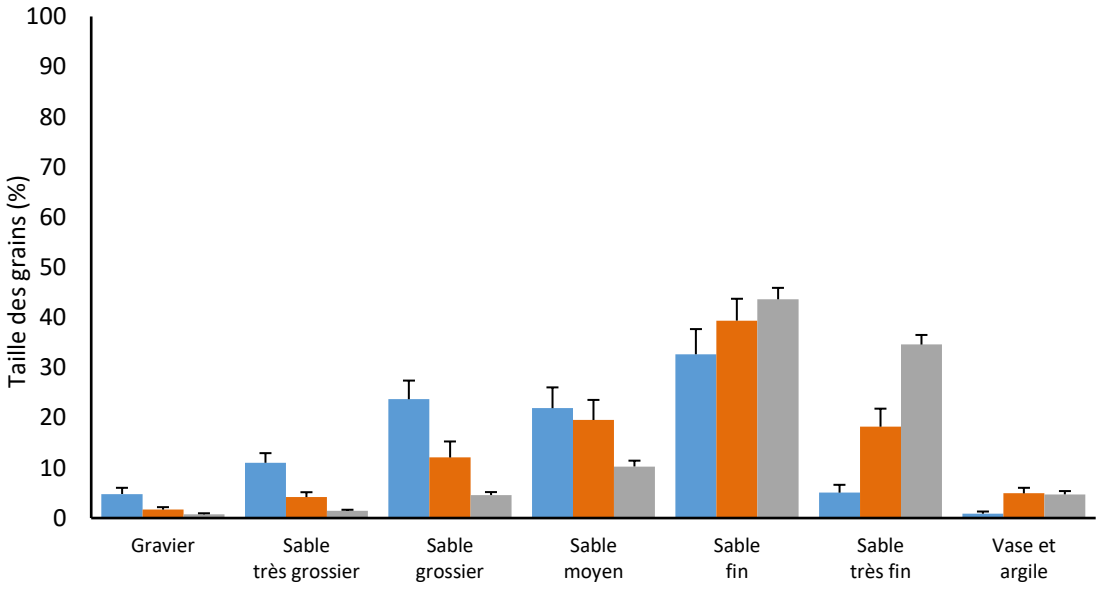


Figure 9. Proportion des différentes classes de taille des sédiments (%, moyenne ± erreur-type) pour les profils (= rive, = équilibre et = large) au site référence est (RfE) de Pointe-aux-Outardes en 2023.

3.2 Caractérisation des assemblages benthiques

Au total, 53 taxons ont été inventoriés lors de l'échantillonnage des 6 sites de Pointe-aux-Outardes en juin 2023 : 21 taxons sont des annélides, 21 sont des arthropodes et 9 sont des mollusques. Des individus des phylum Nematoda et Nemertea 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 14 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 2023, c'est le cumacé *Pseudoleptocuma minus* qui domine en termes d'abondance relative, suivi de près de l'amphipode *Gammarus* sp., des individus impossibles à identifier à l'espèce parce que juvéniles (**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 2023, c'est le bivalve *Macoma balthica* qui domine, suivi de près par *Mya arenaria* (**Figure 11**). Ce sont ces deux espèces qui dominaient aussi en termes de biomasse relative en 2021 et en 2022.

En 2023, 6 taxons sont présents dans plus de 50% des stations (coefficient de fréquence $\geq$ 50, taxons dits fréquents, **Annexe 1**) : *Gammarus* sp., *Macoma balthica*, Oligochaeta, Nematoda, *Pseudoleptocuma minus* et *Mya arenaria*. Quinze taxons sont dits communs et possèdent un coefficient de fréquence de 11 à 49 % : Harpacticoida, Polychaeta, *Hediste diversicolor*, *Pygospio elegans*, Oedicerotidae, *Wecomedon nobilis*, *Parexogone hebes*, *Spio theeli*, Nereidae, *Gammarus lawrencianus*, *Mesodesma arctatum*, Nemertea, Amphipoda, *Mytilus edulis* et Ostracoda. Les 38 autres taxons inventoriés en 2023 étaient présents à $\leq$ 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 moins prononcées et bien

qu'un plateau ne soit toujours pas atteint, il semble y avoir moins de nouveaux taxons à inventoriés sur le site d'étude.

En 2023 la richesse spécifique atteint 19 taxons/échantillon, avec une moyenne de 7,2 ± 4,2 taxons/échantillon. L'abondance d'organismes, toutes espèces confondues, atteint 373 823 individus/m^2 (moyenne de 20 360 ± 46 008 individus/m^2), alors que la biomasse totale atteint 33 570 g/m^2 (moyenne de 474 ± 2151 g/m^2). L'indice d'équitabilité de Pielou (J') moyen est de 0,61 ± 0,20 et l'indice de diversité de Shannon-Wiener (H') est de 1,06 ± 0,56.

Il est à noter qu'aucun organisme n'a été dénombré à 21 stations de Pointe-aux-Outardes en 2023 : 12 stations du site recharge est (ReE) et 9 stations du site recharge ouest (ReO).

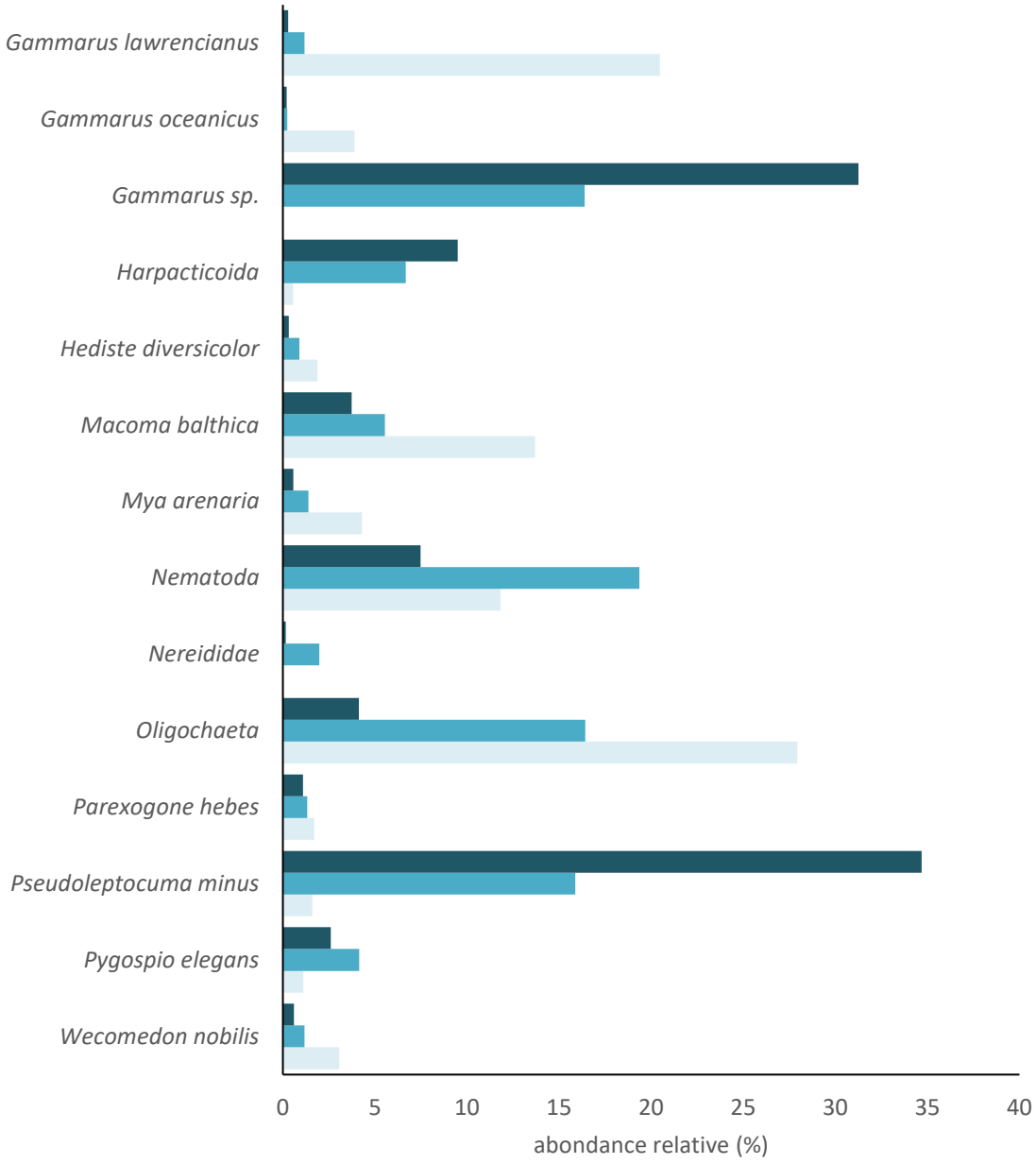


Figure 10. Abondance relative (%) des invertébrés benthiques prélevés à Pointe-aux-Outardes en 2021 ( ), 2022 ( ) et 2023 ( ).

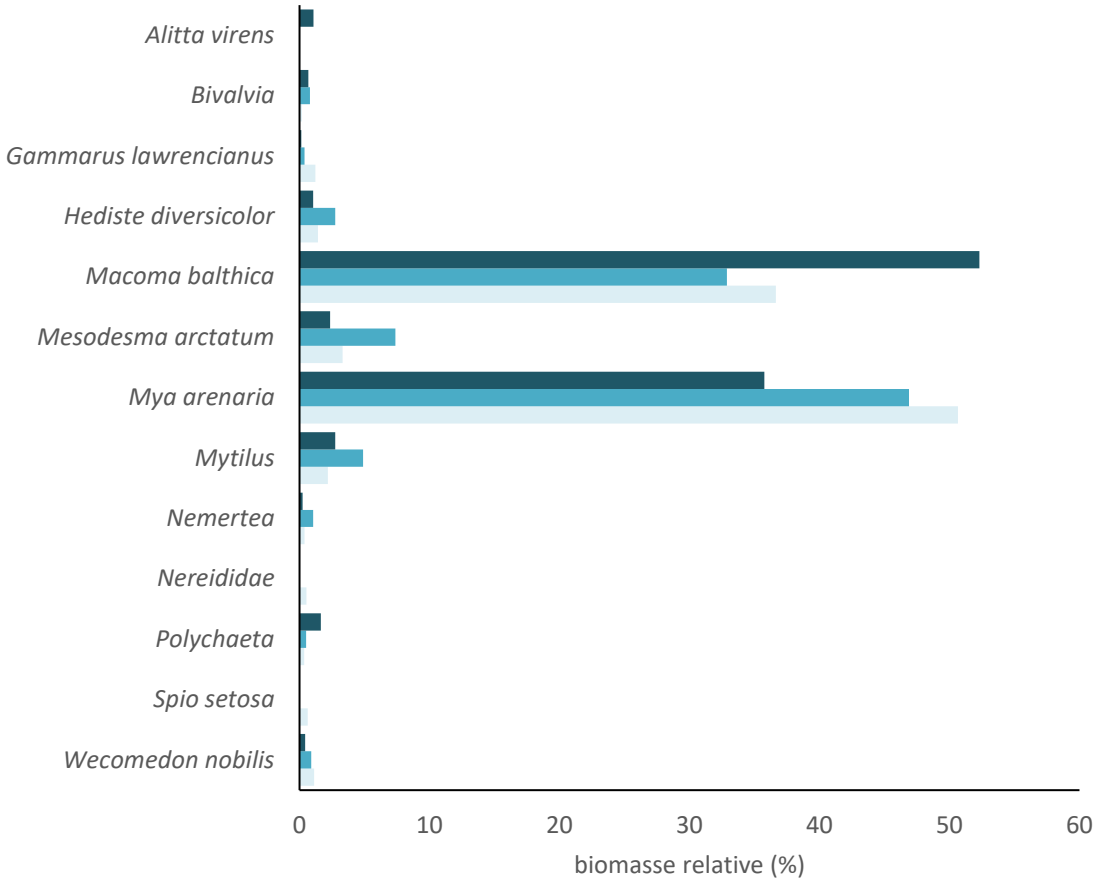


Figure 11. Biomasse relative (%) des invertébrés benthiques prélevés à Pointe-aux-Outardes en 2021 ( ), 2022 ( ) et 2023 ( ).

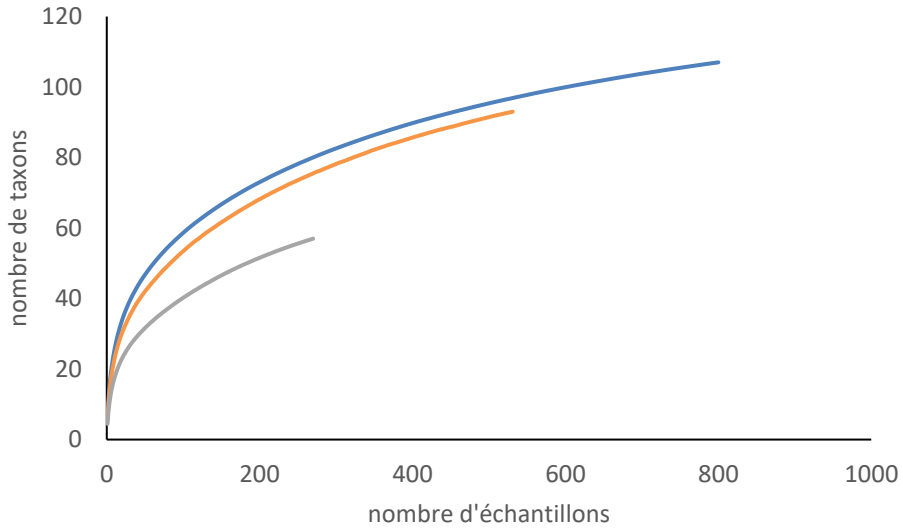


Figure 12. Courbes d'accumulation d'espèces – nombre de taxons inventoriés en fonction du nombre d'échantillons pour les travaux faits à Pointe-aux-Outardes en 2021 (–), en 2021 et 2022 combinés (–) et en 2021, 2022 et 2023 combinés (–).

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 SC	*F-ratio*	*p*	dl	Indice d'équitabilité (J') SC	*F-ratio*	*p*
Année	2	1007	63,1831	**<0,0001**	2	15,9663	249,8545	**<0,0001**
Site	5	715	17,9500	**<0,0001**	5	0,5779	3,6175	**0,0031**
Profil	2	7456	467,6704	**<0,0001**	2	0,7299	11,4213	**<0,0001**
An × Si	10	379	4,7531	**<0,0001**	10	1,0631	3,3272	**0,0003**
An × Pr	4	230	7,2238	**<0,0001**	4	1,3149	10,2885	**<0,0001**
Si × Pr	10	1304	16,3612	**<0,0001**	10	1,2894	4,0354	**<0,0001**
An × Si × Pr	20	410	2,5738	**0,0002**	20	1,1094	1,7361	**0,0243**
Résidus	745	5938			629			
Total	798	17511			682			

Sources de variation	dl	Log_{10} (Abondance + 1) SC	*F-ratio*	*p*	dl	Indice de diversité (H') SC	*F-ratio*	*p*
Année	2	844	729,7947	**<0,0001**	2	33,7745	102,8386	**<0,0001**
Site	5	70	24,0820	**<0,0001**	5	6,0439	7,3611	**<0,0001**
Profil	2	236	204,1108	**<0,0001**	2	65,7420	200,1753	**<0,0001**
An × Si	10	56	9,6299	**<0,0001**	10	3,8985	2,3741	**0,0091**
An × Pr	4	18	7,6195	**<0,0001**	4	13,9438	21,2284	**<0,0001**
Si × Pr	10	47	8,1214	**<0,0001**	10	13,3013	8,1001	**<0,0001**
An × Si × Pr	20	64	5,5640	**<0,0001**	20	10,8958	3,3176	**<0,0001**
Résidus	745	431			745			
Total	798	1773			798			

Sources de variation	dl	Log_{10} (Biomasse + 1) SC	*F-ratio*	*p*
Année	2	2,6437	3,3237	**0,0366**
Site	5	168,0445	84,5047	**<0,0001**
Profil	2	500,9730	629,8118	**<0,0001**
An × Si	10	18,5015	4,6519	**<0,0001**
An × Pr	4	5,8267	3,6626	**0,0058**
Si × Pr	10	59,3599	14,9252	**<0,0001**
An × Si × Pr	20	25,7940	3,2428	**<0,0001**
Résidus	744	295,9010		
Total	797	1088,3309		

dl = degré de liberté
SC = somme des carrés

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**) :

- Au site RfO, la richesse spécifique est moindre sur la rive en 2021 et 2022, comparativement à 2023. Elle est aussi moindre sur la rive comparativement aux profils équilibre et large et ce, pour les années 2021 et 2022.
- Au site SiO, la richesse augmente avec les années, de 2021 à 2023. Elle augmente aussi de la rive vers le large.
- Au site ReO, la richesse spécifique augmente de la rive vers le large en 2022 et en 2023. Elle est aussi significativement moindre en 2021, comparativement à 2022 et 2023, sur la rive.
- Au site ReE, la richesse spécifique augmente de la rive vers le large en 2022 et en 2023. Elle est aussi significativement moindre en 2021, comparativement à 2022 et 2023, sur la rive.
- Au site SiE, la richesse en 2021 est moindre qu'en 2022 ou 2023. Elle est aussi plus grande au large, comparativement au profil équilibre ou encore à la rive.
- Au site RfE, la richesse spécifique de la rive est moindre qu'au large pour toutes les années. Sur la rive, la richesse est plus grande en 2023 comparativement à 2021.

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**) :

- Au site RfO, l'abondance est moindre sur la rive en 2021 et 2022, comparativement à 2023. Elle est aussi moindre sur la rive comparativement aux profils équilibre et large et ce, pour les années 2021 et 2022.
- Au site SiO, l'abondance de la rive est moindre en 2021, comparativement à 2022 et 2023. 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. Aux stations rive, c'est en 2021 qu'elle était la plus importante.
- Au site ReE, l'abondance est moindre sur la rive comparativement aux profils équilibre et large pour toutes les années. Aux stations rive, c'est en 2021 qu'elle était la plus importante.
- Au site SiE, l'abondance augmente avec les années. Elle est aussi plus grande aux stations large comparativement à celles de la rive.
- Au site RfE, l'abondance augmente de la rive vers le large pour toutes les années. Elle est aussi significativement plus faible aux stations rive en 2021 comparativement à 2022 et 2023.

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**) :

- Au site RfO, la biomasse est moindre sur la rive en 2021 et 2022, comparativement à 2023. Elle est aussi moindre sur la rive comparativement aux profils équilibre et large et ce, pour toutes les années.
- Au site SiO, la biomasse de la rive est moindre que celles aux profils équilibre et large.
- Au site ReO, la biomasse augmente de la rive vers le large. Elle est aussi plus grande en 2021 comparativement à 2022 et 2023.
- Au site ReE, la biomasse augmente de la rive vers le large. Elle est aussi plus grande en 2021 comparativement à 2022 et 2023.
- 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.

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**) :

- Au site RfO, l'équitabilité en 2022 est plus grande qu'en 2023, et elle est plus grande au large comparativement à la rive.
- Au site SiO, l'équitabilité diminue avec les années. Elle est relativement stable entre les profils en 2021 et 2022, mais en 2023, elle est plus grande au large comparativement à la rive.
- Au site ReO, l'équitabilité de la rive est plus grande que celle à l'équilibre.
- Au site ReE, l'équitabilité varie peu dans le temps, mais elle chute significativement de la rive vers l'équilibre en 2021.
- Au site SiE, l'équitabilité de la rive est plus grande que celle du large.
- Au site RfE, l'équitabilité en 2021 est plus grande qu'en 2023, et elle est plus grande sur la rive.

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**) :

- Au site RfO, la diversité est moindre sur la rive en 2021 et 2022. Sur la rive, elle est plus grande en 2023 comparativement à 2021.
- Au site SiO, la diversité au large et à l'équilibre sont plus grandes que celle sur la rive.
- Au site ReO, la diversité augmente de la rive vers le large.
- Au site ReE, la diversité sur la rive est significativement moindre que celle au large pour toutes les années et elle augment au profil équilibre de 2021 à 2022.
- Au site SiE, la diversité augmente de 2021 à 2022 au profil équilibre et elle est significativement plus grande au large, comparativement à la rive, pour toutes les années.
- Au site RfE, la diversité au large est plus grande que celle de la rive pour toutes les années.

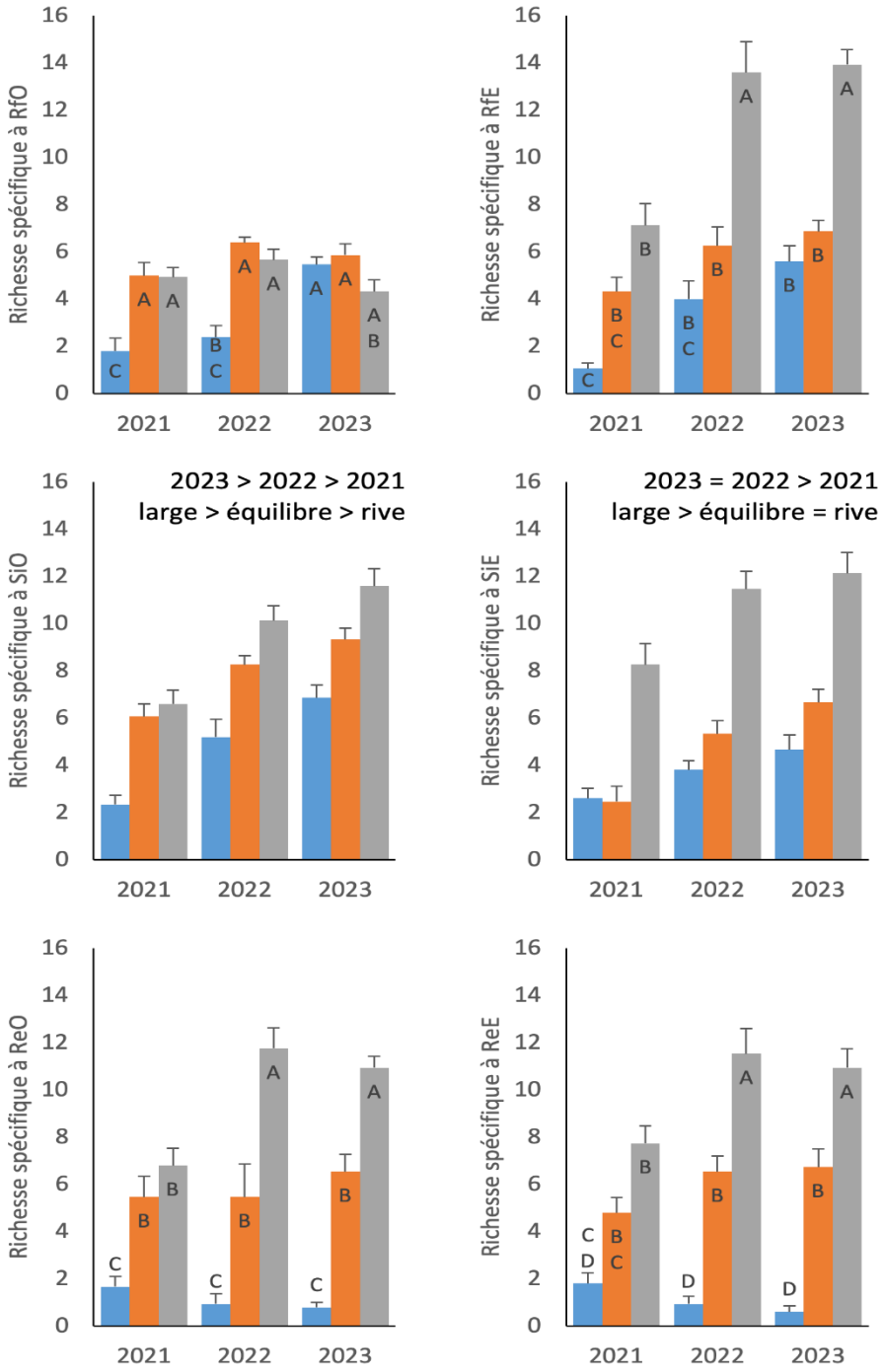


Figure 13. Richesse spécifique des assemblages benthiques (nombre de taxons/station, moyenne ± erreur-type) aux sites référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE) en 2021, 2022 et 2023 pour les profils près de la rive (**bleu**, n = 15/profil/site), à l'équilibre (**orange**, n = 15/ profil/site) et vers le large (**gris**, n = 15/ profil/site). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey.

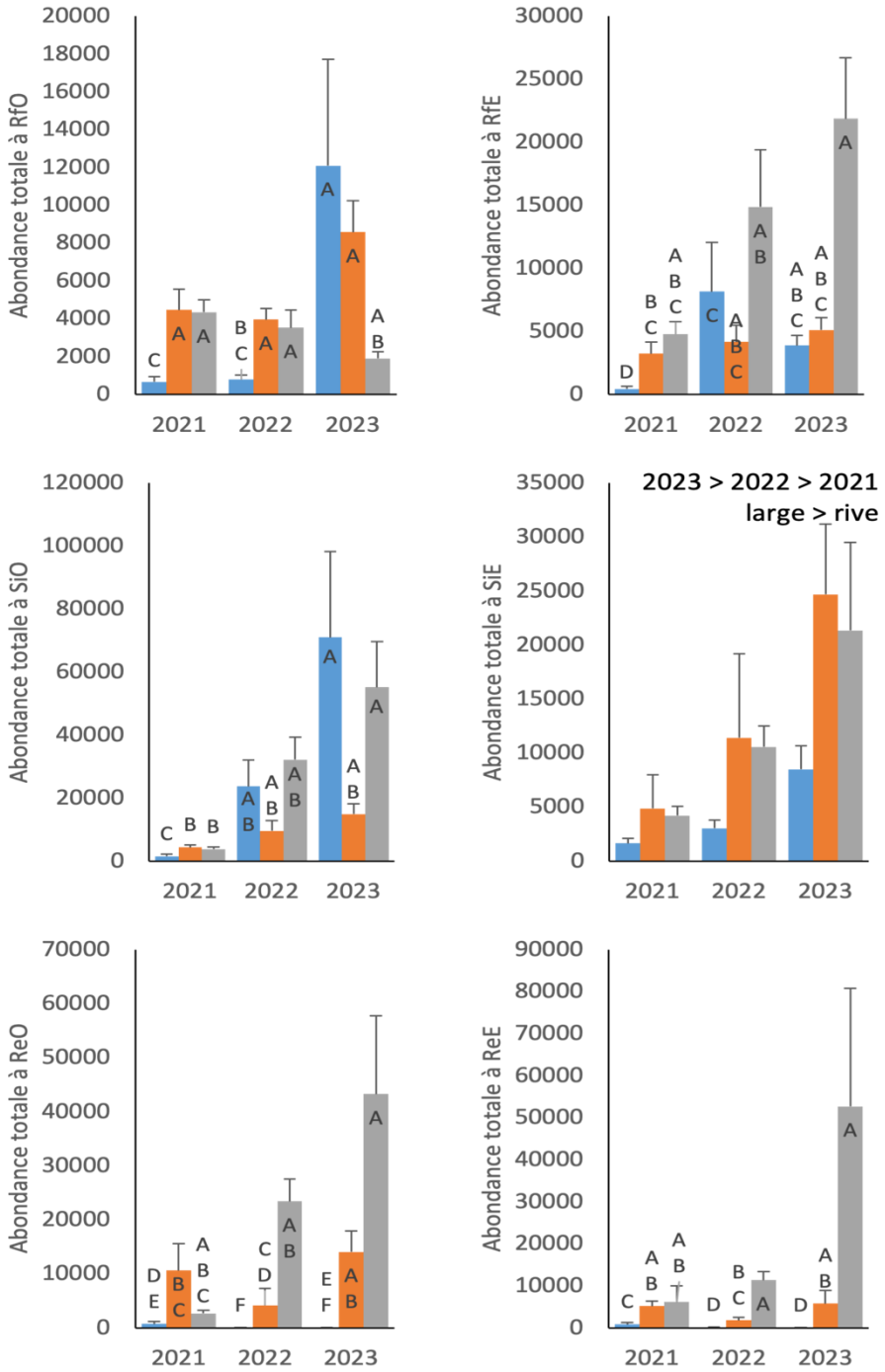


Figure 14. Abondance totale (nombre total d'individus/m^2, moyenne ± erreur-type) aux sites référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE) en 2021, 2022 et 2023 pour les profils près de la rive (**bleu**, n = 15/profil/site), à l'équilibre (**orange**, n = 15/ profil/site) et vers le large (**gris**, n = 15/ profil/site). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey.

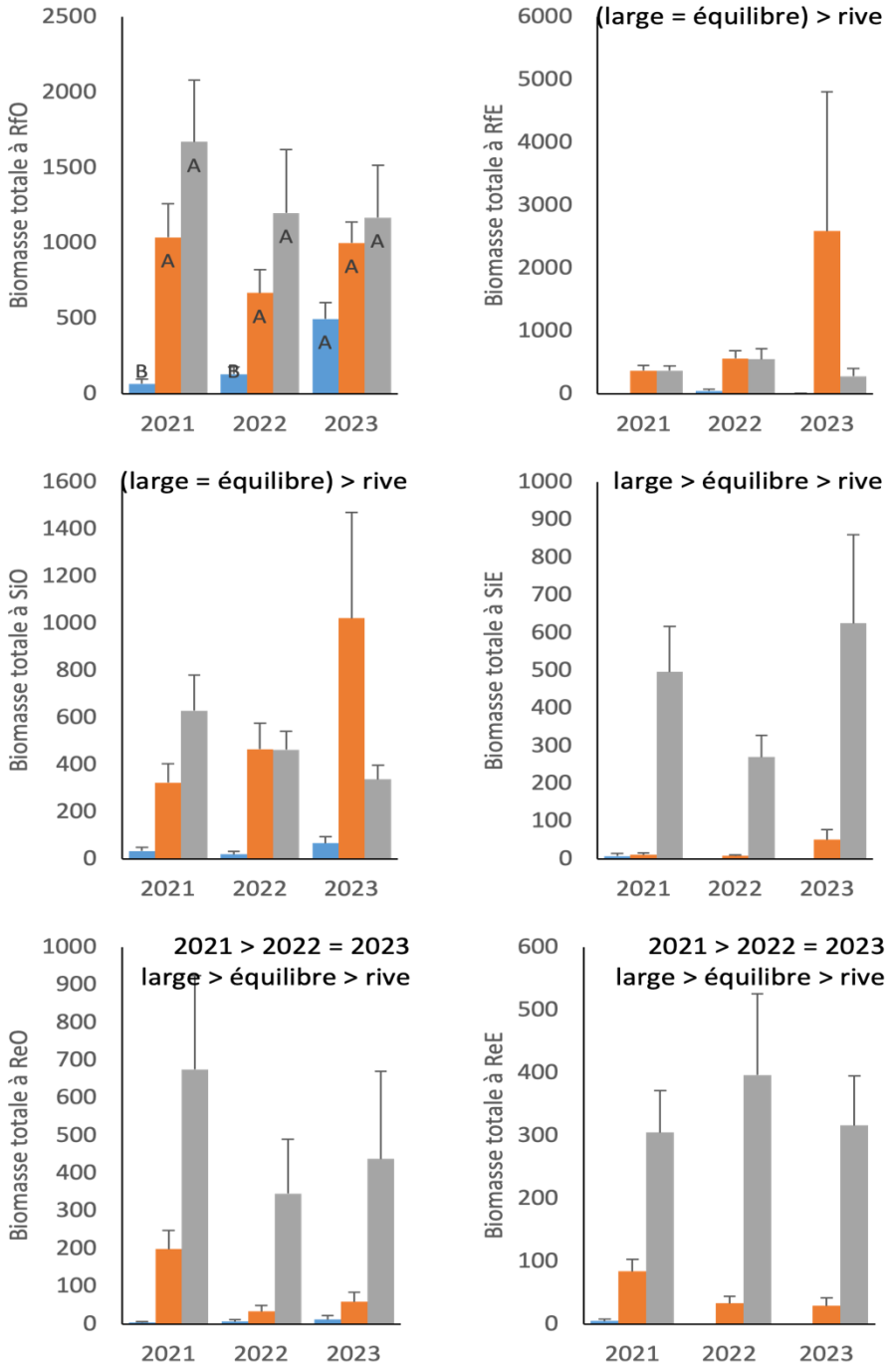


Figure 15. Biomasse totale (g/m^2, moyenne ± erreur-type) aux sites référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE) en 2021, 2022 et 2023 pour les profils près de la rive (**bleu**, n = 15/profil/site), à l'équilibre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

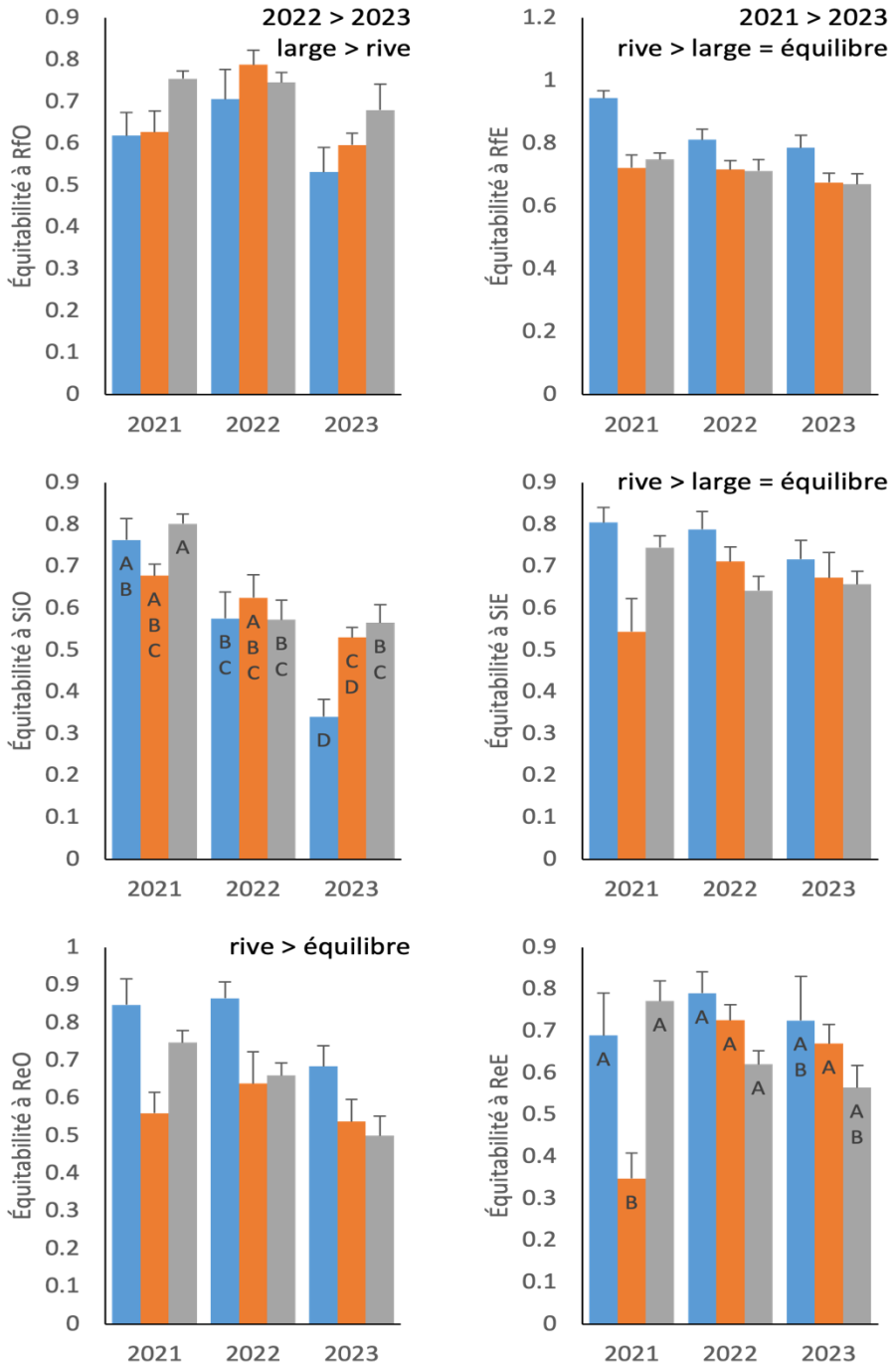


Figure 16. Indice d'équitabilité de Pielou (moyenne ± erreur-type) aux sites référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE) en 2021, 2022 et 2023 pour les profils près de la rive (**bleu**, n = 15/profil/site), à l'équilibre (**orange**, n = 15/ profil/site) et vers le large (**gris**, n = 15/ profil/site). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey.

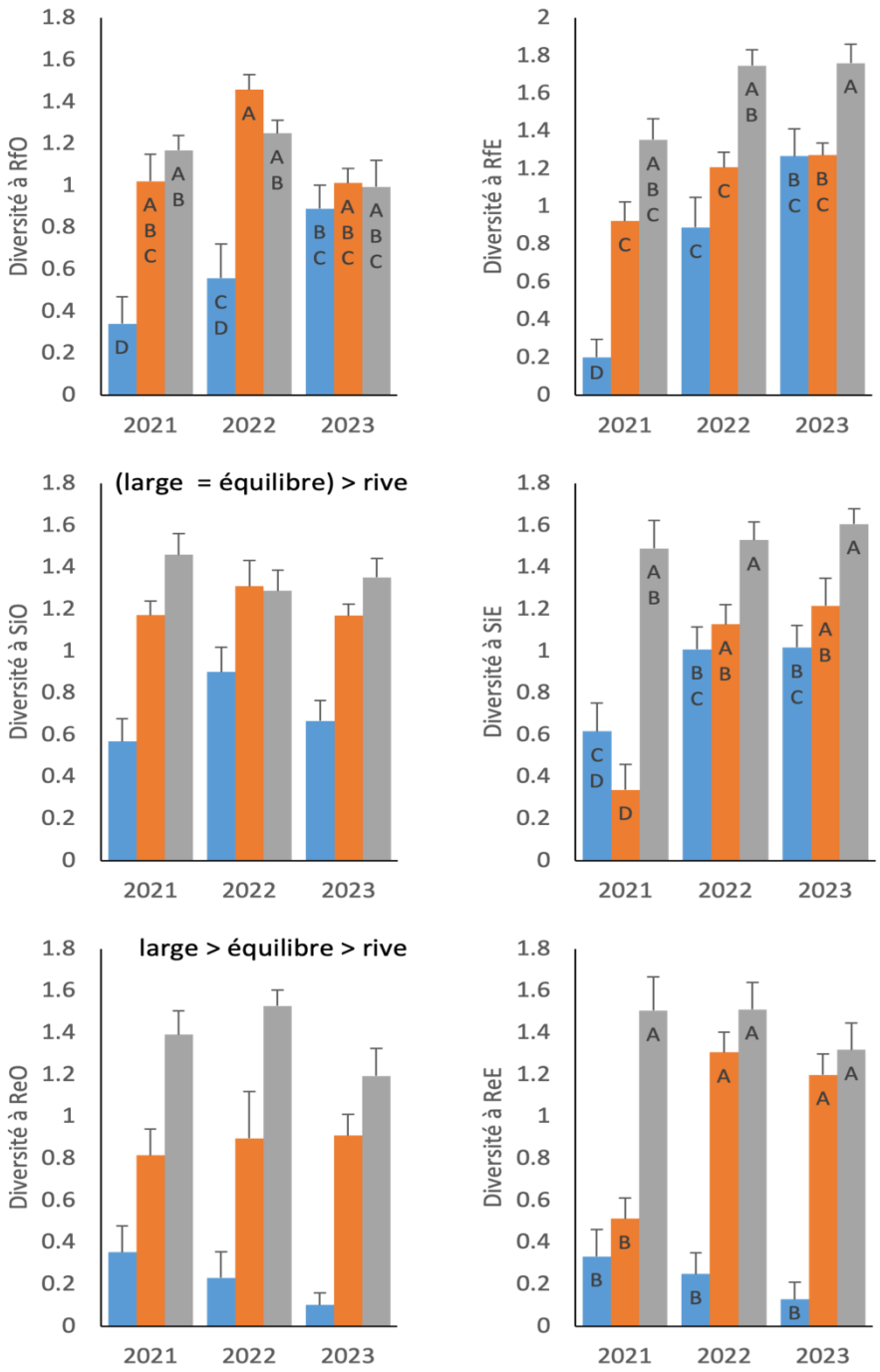


Figure 17. Indice de diversité de Shannon-Wiener (moyenne ± erreur-type) aux sites référence ouest (ReO), sous influence ouest (SiO), recharge ouest (ReO), recharge est (ReE), sous influence est (SiE) et référence est (RfE) en 2021, 2022 et 2023 pour les profils près de la rive (**bleu**, n = 15/profil/site), à l'équilibre (**orange**, n = 15/ profil/site) et vers le large (**gris**, n = 15/ profil/site). Les différentes lettres représentent les différences significatives entre les facteurs, telles que révélées par le test de comparaisons multiples de Tukey.

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 retiré 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 et 2023. 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	2	149380	26,4530	**0,0001**	155000	47,5180	**0,0001**
Site	5	264780	18,7550	**0,0001**	227450	27,8920	**0,0001**
Profil	2	199160	35,2690	**0,0001**	274420	84,1300	**0,0001**
An × Si	10	84867	3,0057	**0,0001**	40622	2,4907	**0,0001**
An × Pr	4	74841	6,6266	**0,0001**	28647	4,3911	**0,0001**
Si × Pr	10	188310	6,6693	**0,0001**	156420	9,5908	**0,0001**
An × Si × Pr	20	148620	2,6319	**0,0001**	87344	2,6777	**0,0001**
Résidus	745	2103500			1215000		
Total	798	3222300			2194900		

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 et 2023. 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	2	88534	22,3270	**0,0001**
Site	5	238270	24,0360	**0,0001**
Profil	2	364520	91,9290	**0,0001**
An × Si	10	51888	2,6171	**0,0001**
An × Pr	4	33862	4,2698	**0,0001**
Si × Pr	10	191260	9,6467	**0,0001**
An × Si × Pr	20	98060	2,4730	**0,0001**
Résidus	745	1477100		
Total	798	2556100		

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.
- Il n'y a pas de différence significative des assemblages benthiques de la rive entre 2021 et 2022, ni entre 2022 et 2023.

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 et 2023. 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	2	33094	7,5206	**0,0001**
Profil	2	116960	26,5790	**0,0001**
An × Pr	4	36677	4,1675	**0,0001**
Résidus	126	277220		
Total	134	463950		

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

	t	*p(perm)*		*t*	*p(perm)*
Rive			2021		
2021-2022	1,4966	0,0649	Rive – Équilibre	2,3686	**0,0003**
2021-2023	1,6767	**0,0458**	Rive – Large	2,6354	**0,0001**
2022-2023	0,4406	0,9845	Équilibre – Large	3,0666	**0,0001**
Équilibre			2022		
2021-2022	2,7667	**0,0001**	Rive – Équilibre	3,2890	**0,0001**
2021-2023	4,2397	**0,0001**	Rive – Large	4,1985	**0,0001**
2022-2023	2,4102	**0,0001**	Équilibre – Large	2,7809	**0,0001**
Large			2023		
2021-2022	2,8053	**0,0001**	Rive – Équilibre	4,2895	**0,0001**
2021-2023	2,7694	**0,0001**	Rive – Large	4,7481	**0,0001**
2022-2023	1,6783	**0,0063**	Équilibre – Large	3,0782	**0,0001**

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.
- Il n'y a pas de différence significative des assemblages benthiques de la rive entre 2021 et 2023, ni entre 2022 et 2023.

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 et 2023. 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	2	36773	8,3767	**0,0001**
Profil	2	106680	24,3010	**0,0001**
An × Pr	4	37529	4,2744	**0,0001**
Résidus	124	272170		
Total	132	453700		

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

	t	*p(perm)*
Rive		
2021-2022	1,9916	**0,0132**
2021-2023	1,5510	0,0745
2022-2023	1,6060	0,0900
Équilibre		
2021-2022	1,7017	**0,0021**
2021-2023	3,2531	**0,0001**
2022-2023	2,2750	**0,0001**
Large		
2021-2022	3,8329	**0,0001**
2021-2023	3,9806	**0,0001**
2022-2023	2,0627	**0,0001**

	t	*p(perm)*
2021		
Rive – Équilibre	2,1252	**0,0008**
Rive – Large	3,2791	**0,0001**
Équilibre – Large	1,6122	**0,0047**
2022		
Rive – Équilibre	2,6238	**0,0007**
Rive – Large	4,9769	**0,0001**
Équilibre – Large	2,8452	**0,0001**
2023		
Rive – Équilibre	3,7567	**0,0001**
Rive – Large	4,9559	**0,0001**
Équilibre – Large	3,3054	**0,0001**

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 et en 2023.
- 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 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 une différence significative des assemblages benthiques de la rive entre 2021 et 2022 et entre 2021 et 2023.
- Il n'y a pas de différence significative de la rive entre 2022 et 2023.

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 et 2023. 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	2	38976	9,8434	**0,0001**
Profil	2	46296	11,6920	**0,0001**
An × Pr	4	15754	1,9893	**0,0001**
Résidus	127	251440		
Total	135	352580		

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

	t	*p(perm)*
Rive		
2021-2022	1,6584	**0,0068**
2021-2023	1,9410	**0,0012**
2022-2023	1,1825	0,2245
Équilibre		
2021-2022	2,4155	**0,0001**
2021-2023	2,9338	**0,0001**
2022-2023	1,7179	**0,0155**
Large		
2021-2022	2,1568	**0,0001**
2021-2023	2,5211	**0,0001**
2022-2023	1,8065	**0,0002**

	t	*p(perm)*
2021		
Rive – Équilibre	0,9554	0,4913
Rive – Large	2,2776	**0,0001**
Équilibre – Large	1,9925	**0,0001**
2022		
Rive – Équilibre	2,2098	**0,0004**
Rive – Large	3,2080	**0,0001**
Équilibre – Large	2,6005	**0,0001**
2023		
Rive – Équilibre	2,2877	**0,0009**
Rive – Large	2,9854	**0,0001**
Équilibre – Large	2,9401	**0,0001**

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 et en 2023.
- 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.

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 et 2023. 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	2	48502	18,1780	**0,0001**
Profil	2	44696	16,751	**0,0001**
An × Pr	4	15524	2,9091	**0,0001**
Résidus	126	168100		
Total	134	276820		

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

	t	*p(perm)*
Rive		
2021-2022	2,0516	**0,0003**
2021-2023	3,2438	**0,0001**
2022-2023	3,4079	**0,0001**
Équilibre		
2021-2022	2,3721	**0,0001**
2021-2023	3,4347	**0,0001**
2022-2023	1,6655	**0,0048**
Large		
2021-2022	3,0911	**0,0001**
2021-2023	3,5985	**0,0001**
2022-2023	1,6158	**0,0170**

	t	*p(perm)*
2021		
Rive – Équilibre	2,3859	**0,0002**
Rive – Large	2,8141	**0,0001**
Équilibre – Large	1,1677	0,2342
2022		
Rive – Équilibre	3,4304	**0,0001**
Rive – Large	3,4401	**0,0001**
Équilibre – Large	2,1475	**0,0001**
2023		
Rive – Équilibre	2,9349	**0,0001**
Rive – Large	2,9011	**0,0001**
Équilibre – Large	3,2735	**0,0001**

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 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.
- Il n'y a pas de différence significative de l'équilibre et du large en 2021.
- Il y a des différences significatives entre toutes les années au large.
- Au profil équilibre, les assemblages benthiques de 2021 sont significativement différents de ceux de 2022 et de ceux de 2023.
- Au profil rive, les assemblages benthiques de 2023 sont significativement différents de ceux de 2021 et de ceux de 2022.
- Il n'y a pas de différence significative de la rive entre 2021 et 2022.

Tableau 10. Résultats de l'analyse 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 est (RfE) de Pointe-aux-Outardes en 2021, 2022 et 2023. 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	2	37461	9,0205	**0,0001**
Profil	2	92188	22,1990	**0,0001**
An × Pr	4	20449	2,4621	**0,0001**
Résidus	126	261630		
Total	134	411730		

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

	t	*p(perm)*
Rive		
2021-2022	1,2589	0,1343
2021-2023	2,6693	**0,0001**
2022-2023	1,7779	**0,0028**
Équilibre		
2021-2022	1,7525	**0,0062**
2021-2023	2,3411	**0,0001**
2022-2023	1,1144	0,2638
Large		
2021-2022	2,6434	**0,0001**
2021-2023	3,2278	**0,0001**
2022-2023	2,4956	**0,0001**

	t	*p(perm)*
2021		
Rive – Équilibre	2,6718	**0,0005**
Rive – Large	3,1471	**0,0001**
Équilibre – Large	1,5494	0,0291
2022		
Rive – Équilibre	2,5698	**0,0002**
Rive – Large	2,6685	**0,0001**
Équilibre – Large	3,6876	**0,0001**
2023		
Rive – Équilibre	3,5460	**0,0001**
Rive – Large	4,1127	**0,0001**
Équilibre – Large	3,7662	**0,0001**

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.
- Il n'y a pas de différence significative de l'équilibre et du large en 2021.
- Il y a des différences significatives entre toutes les années au profil équilibre.
- Au large, les assemblages benthiques de 2021 sont significativement différents de ceux de 2022 et de ceux de 2023.
- Sur la rive, les assemblages benthiques de 2023 sont significativement différents de ceux de 2021 et de ceux de 2022.
- Il n'y a pas de différence significative des assemblages benthiques de la rive entre 2021 et 2022, ni au large entre 2022 et 2023.

Tableau 11. Résultats des 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 et 2023. 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	2	27066	9,7188	**0,0001**
Profil	2	30799	11,0590	**0,0001**
An × Pr	4	22932	4,1171	**0,0001**
Résidus	116	161530		
Total	124	243950		

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

	t	*p(perm)*		*t*	*p(perm)*
Rive			2021		
2021-2022	1,3821	0,1093	Rive – Équilibre	2,9796	**0,0001**
2021-2023	3,2032	**0,0001**	Rive – Large	3,5728	**0,0001**
2022-2023	2,2787	**0,0003**	Équilibre – Large	1,4809	0,0703
Équilibre			2022		
2021-2022	2,3015	**0,0003**	Rive – Équilibre	1,8723	**0,0058**
2021-2023	2,9441	**0,0001**	Rive – Large	1,9777	**0,0015**
2022-2023	1,7594	**0,0148**	Équilibre – Large	1,6281	**0,0253**
Large			2023		
2021-2022	3,2267	**0,0001**	Rive – Équilibre	1,6512	**0,0292**
2021-2023	3,2211	**0,0001**	Rive – Large	3,1415	**0,0001**

2022-2023	1,5011	0,0602	Équilibre – Large	2,4848	**0,0005**

4 Synthèse des résultats de l'année 2 après les travaux de recharge

- Le contenu en matière organique des sédiments est faible.

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

- 55 taxons d'invertébrés benthiques ont été inventorié.

- L'espèce végétale *Zostera marina* a été obersée à 14 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, c'est le cumacé *Pseudoleptocuma minus* qui domine, suivi de près par l'amphipode *Gammarus* sp.

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

- Six taxons sont dits fréquents (*Macoma balthica*, Oligochaeta, Nematoda, *Gammarus* sp. et *Mya arenaria*), 15 taxons sont dits communs et 38 sont dits rares.

- Aucun organisme n'a été dénombré à 21 stations dont 12 étaient dans le site ReE et 9 dans le site ReO.

- Après 3 ans de prélèvement, la courbe d'accumulation d'espèce n'atteint toujours pas de palteau, mais devient moins prononcée, indiquant qu'il reste moins de nouveaux taxons à inventoriés.

- 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. En résumé, les résultats indiquent :

- Sites ReE et ReO : Différences significatives des assemblages benthiques entre les profils de plage peu importe l'année, mais aucune différence significative des assemblages de la rive entre 2021-2022 et 2022-2023.
- SiE : Différences significatives des assemblages entre tous les profils de plage en 2022 et en 2023, avec une variation notable entre toutes les années au profil équilibre et large.
- SiO: Différences significatives des assemblages entre tous les profils de plage en 2022 et en 2023, avec une variation notable entre toutes les années, indépendamment du profil.
- RfE : Différences significatives des assemblages entre tous les profils de plage en 2022 et en 2023, avec une variation notable entre toutes les années au profil large.
- RfO: Différences significatives des assemblages entre tous les profils de plage en 2022 et en 2023, avec une variation notable entre toutes les années au profil équilibre.

5 Compilation des principaux des résulats du suivi biologique

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

Tableau 12. Synthèse des principaux résultats pour chacune des années 2021 à 2023 du suivi biologique de Pointe-aux-Outardes.
AR = Abondance relative ; BR = Biomasse relative

	Avant recharge	**Année 1 après recharge**	**Année 2 après recharge**
Portrait des sédiments			
Contenu en MO	Très faible	Très faible	Très faible
Type de sédiments	Majoritairement du sable fins	Majoritairement du sable fins	Majoritairement du sable fins et moyens
Portrait des algues			
Espèces d'algues	Aucune plante observée	Présence de zostères à 15 stations	Présence de zostères à 14 stations
Portrait des assemblages benthiques			
Nombre de taxons	57 taxons	71 taxons	53 taxons
Espèces envahissantes	Aucune	Aucune	Aucune
Nouvelles mentions	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*
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*
Espèces communes (11%-49% des stations)	10 taxons	12 taxons	15 taxons
Espèces rares (≤10% des stations)	45 taxons	51 taxons	38 taxons
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
Abondance	Max 71 494 individus/m^2	Max119 939 individus/m^2	Max 373 823 individus/m^2

	Moy 3592 ± 430 individus/m^2	Moy 9614 ± 17261 individus/m^2	Moy 20 360 ± 46 008 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
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 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
Analyses multivarées	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

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 2023 avec leur abondance relative (Ab rel, %), leur biomasse relative (Bio rel, %) et leur coefficient de fréquence (CF, %).

aphia	phylum	classe	ordre	nom	Ab rel	Bio rel	CF
2036	Annelida	Clitellata		Oligochaeta	4.14	0.04	65.19
234851	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	*Alitta virens*	0.09	1.07	7.04
130616	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	*Eteone longa*	0.08	0.04	10.37
152302	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	*Hediste diversicolor*	0.32	1.04	25.93
130168	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	*Microphthalmus aberrans*	0.01	0.00	1.48
130355	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	*Nephtys caeca*	0.00	0.04	2.22
22496	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	Nereididae	0.15	0.02	15.19
757970	Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	*Parexogone hebes*	1.09	0.01	18.89
129611	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Dipolydora*	0.91	0.02	5.93
131121	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Dipolydora quadrilobata*	0.12	0.00	1.85
131135	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Marenzelleria viridis*	0.07	0.21	7.78
131143	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Polydora cornuta*	0.04	0.00	3.33
131170	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Pygospio elegans*	2.60	0.10	21.11
157573	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Spio setosa*	0.00	0.00	0.37
334828	Annelida	Polychaeta	Spionida	*Spio theeli*	0.22	0.03	15.56
913	Annelida	Polychaeta	Spionida	Spionidae	0.07	0.02	5.56
238377	Annelida	Polychaeta	Terebellida	*Cistenides granulata*	0.00	0.00	0.37
921	Annelida	Polychaeta		Capitellidae	0.01	0.00	1.11
130490	Annelida	Polychaeta		*Ophelia bicornis*	0.05	0.01	3.70
129472	Annelida	Polychaeta		*Polygordius*	0.08	0.00	1.48
882	Annelida			Annelida	0.05	0.00	1.85
1300	Arthropoda	Arachnida		Arachnida	0.00	0.00	0.37
1102	Arthropoda	Copepoda	Harpacticoida	Harpacticoida	9.49	0.00	39.26
547000	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Ameroculodes edwardsi*	0.01	0.00	1.11
1135	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	Amphipoda	0.01	0.01	11.11
102178	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Calliopius laeviusculus*	0.12	0.01	4.07
101537	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Gammarus*	31.25	0.19	76.30
158093	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Gammarus lawrencianus*	0.29	0.14	14.81
102285	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Gammarus oceanicus*	0.21	0.17	9.63
101400	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	Oedicerotidae	0.48	0.00	21.11

Annexe 1 (suite). Taxons inventoriés à Pointe-aux-Outardes en 2023 avec leur abondance relative (Ab rel, %), leur biomasse relative (Bio rel, %) et leur coefficient de fréquence (CF, %).

aphia	phylum	classe	ordre	nom	Ab rel	Bio rel	CF
102989	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Phoxocephalus holbolli*	0.22	0.05	7.04
1255501	Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	*Wecomedon nobilis*	0.61	0.44	20.74
1137	Arthropoda	Malacostraca	Cumacea	Cumacea	0.00	0.00	3.33
157836	Arthropoda	Malacostraca	Cumacea	*Pseudoleptocuma minus*	34.68	0.15	59.26
158057	Arthropoda	Malacostraca	Decapoda	*Cancer irroratus*	0.00	0.05	0.37
157884	Arthropoda	Malacostraca	Isopoda	*Edotia montosa*	0.01	0.00	0.74
157891	Arthropoda	Malacostraca	Isopoda	*Idotea phosphorea*	0.00	0.00	0.37
1131	Arthropoda	Malacostraca	Isopoda	Isopoda	0.00	0.00	0.37
264171	Arthropoda	Malacostraca	Isopoda	*Jaera (Jaera) albifrons*	0.01	0.00	2.59
149668	Arthropoda	Malacostraca	Mysida	Mysida	0.01	0.00	1.48
1078	Arthropoda	Ostracoda		Ostracoda	0.50	0.00	10.74
106215	Arthropoda	Thecostraca	Balanomorpha	*Balanus crenatus*	0.01	0.05	1.11
141579	Mollusca	Bivalvia	Cardiida	*Macoma balthica*	3.73	52.29	70.37
140430	Mollusca	Bivalvia	Myida	*Mya arenaria*	0.56	35.76	55.19
138228	Mollusca	Bivalvia	Mytilida	*Mytilus*	0.02	2.75	11.11
156805	Mollusca	Bivalvia	Venerida	*Mesodesma arctatum*	0.03	2.35	14.81
105	Mollusca	Bivalvia		Bivalvia	0.01	0.67	4.07
140263	Mollusca	Gastropoda	Littorinimorpha	*Littorina obtusata*	0.00	0.01	0.37
140264	Mollusca	Gastropoda	Littorinimorpha	*Littorina saxatilis*	0.02	0.03	2.59
141308	Mollusca	Gastropoda	Littorinimorpha	*Onoba aculeus*	0.01	0.00	1.11
101	Mollusca	Gastropoda		Gastropoda	0.02	0.00	2.22
799	Nematoda			Nematoda	7.48	0.01	61.11
152391	Nemertea			Nemertea	0.11	0.24	12.59