



Université du Québec
à Rimouski

**DESCRIPTION DE L'INFLUENCE HUMAINE SUR LES
ÉCOSYSTÈMES BENTHIQUES D'UNE ZONE
INDUSTRIALO-PORTUAIRE SUBARCTIQUE**

**Application d'indicateurs de statut écologique et prédition de la structure
des communautés**

Thèse présentée
dans le cadre du Programme de doctorat en océanographie
en vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor

PAR

©ELLIOT DREUJOU

Décembre 2020

Composition du jury :

Christian Nozais, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Phillipe Archambault, directeur de recherche, Université Laval

Christopher William McKindsey, codirecteur de recherche, Ministère des Pêches et Océans

Fanny Noisette, examinateur interne, Université du Québec à Rimouski

QQ1, examinateur externe, QQpart

Dépôt initial le 21 décembre 2020

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

à qui tu veux,

REMERCIEMENTS

Si je suis ici, au Canada, à écrire une thèse de doctorat, c'est grâce au soutien de mes proches qui m'ont toujours poussé à réaliser mes projets et à me dépasser. Je n'aurais jamais pu accomplir ce travail, fruit de cinq années de recherche, sans votre présence, vos conseils, vos réflexions, et je souhaite vous en remercier.

Merci à mon équipe de direction. Phil, je t'ai contacté pour la première fois quand j'étais à la fin de ma maîtrise, à un moment où je ne savais pas si j'étais suffisamment bon pour la recherche, et tu m'as fait confiance. Ensemble, nous avons construit un beau projet, de Rimouski à Québec, et je suis fier d'avoir pu profiter de ton expertise pour éclairer ma voie. Tu m'as fait aller plus haut et plus loin que ce que je n'aurais jamais pu imaginer, et j'ai hâte de poursuivre mon envol à tes côtés. Chris, merci d'avoir accepté d'être mon codirecteur. Tes avis m'ont été particulièrement utiles, et ont permis de pousser mes reflexions toujours plus loin, tout comme la qualité de mes articles.

Merci aux réseaux de recherche et structures qui ont rendu ce projet possible par leur financement, leur aide et leur expertise : *Canadian Healthy Oceans Network II*, Québec-Océan, Institut Nordique de Recherche en Environnement et en Santé au Travail, Takuvik, Réseau Québec Maritime et Institut France-Québec Maritime. Les réunions scientifiques, ateliers de travail et écoles d'été auxquels j'ai pu participer m'ont apporté de nombreuses compétences inestimables, pour mener à bien mes projets mais aussi pour développer mon réseau. Je suis très fier d'avoir été élu aux comités étudiants, cela a été une expérience enrichissante et un plaisir de représenter les étudiants ainsi que de mettre en place de nouvelles activités. Je remercie aussi chaleureusement Natalie Ban, Nicolas Desroy et Aurélie Foveau de m'avoir accueilli lors de stages de recherche, m'apportant la possibilité d'agrandir la portée de ma recherche. Enfin, je remercie l',

Merci à mes amis et collègues, sans qui cette aventure aurait été bien moins belle. David, je ne te remercierai jamais assez pour ton mentorat, d'avoir pris le temps de me faire

découvrir de nouveaux outils qui me sont aujourd’hui indispensables, d’avoir répondu à mes (INNOMBRABLES) questions, et de m’avoir fait découvrir le bourbon, surtout après une bonne journée de terrain. Charlotte, tu es la joie incarnée et ton soutien a été exceptionnel. Je ne compte plus les *amaretto sour* que j’ai bu grace à toi (encore de l’alcool, décidément), et j’ai hâte de jouer à un nouveau jeu avec toi ! Marie, tu as apporté du bonheur dans mes journées de travail, je ne me lasserai jamais de l’envoi de sel (et de paquets de mayonnaise) à travers le bureau, et je suis heureux d’avoir découvert Québec à tes côtés (ainsi que Mushu). Laurie et Valérie, merci de m’avoir aidé à traverser ces épreuves et pour nos éclats de rire d’au moins trois “Elliot” ! Jesi, tu es la première personne qui m’a accueilli quand je suis arrivé à Rimouski par bus, avec mes valises à une heure beaucoup trop tardive. Merci pour tout (et je te dois toujours un alfajor en retour !). Enfin, je n’aurais jamais assez de temps pour remercier PO, Fanny, Gustavo, Jean-Luc, Inge, Sarah, Déborah, Rémi, Gwenaëlle, Marie, Jory, Clémence et Piero pour les moments inoubliables que nous avons partagé, ainsi que Cindy, Lisa, Laure, Julie, Claudy, Serge, Dany, Martine, Marièle et Dominique sans qui je me serais retrouvé bloqué à de nombreuses reprises.

Merci à mes collocs à Rimouski, dans la grande et belle Maison Jaune au bord du Saint-Laurent. Camille, Francis, Antoine, Léo, ainsi que Éric et Hélène, vous m’avez fait vivre des soirées incroyables (TUMMIES !!!) et je garderai un doux souvenir de ces belles journées de cuisine, de Mario Kart, Rocket League et surtout du *chill* au bord du fleuve. J’aimerais aussi remercier les créateurs qui m’ont fait rire, réfléchir, explorer, découvrir et garder une certaine santé mentale grâce à leurs productions : Frédéric Molas, Sébastien Rassiat, Mahyar Shakeri, Bob Lennon, Patrick Baud, Gull et son technicien, Léo Grasset, Bruce Benamran, Vivianne Lalande et les frères Breut.

Enfin, je voudrais remercier ma famille. Annick et Jean-Marie, mon papa et ma maman, vous m’avez toujours épaulé à chaque étape de ma vie, de mes études à Paris jusqu’à mon départ pour le Canada. Vous m’avez permis d’être qui je suis aujourd’hui, et je n’aurai jamais assez de mots pour vous dire à quel point je vous aime. Arthur, tu es

mon p’tit frérôt, mon sale type préféré, mon partenaire de jeu, de dessin, de zones, de construction, de tornades et de dances ridicules. Je ne serai pas aussi heureux et épanouit aujourd’hui sans avoir grandi à tes côtés. Sara. Mon amour, ma truffe, ma Schouffe adorée. “Marullette”. Je n’aurais jamais réussi à tenir le coup sans toi. Paris, Rimouski, Québec, Montréal, tu as toujours été ma complice. Tu m’as supporté dans mes pires moments, tu m’as rendu fier et fort, et tu m’as enrichi de ton intelligence, ton humour (*ech!*), tes carabistouilles et de ton amour. Je suis le plus heureux des hommes, depuis le jour où j’ai goûté ce **fantastique** risotto, et mes journées ne pourraient être plus belles qu’à tes côtés. Je t’aime ma Sara.

Je souhaite aussi adresser mes derniers mots à mon oncle Alex, qui nous a quitté bien trop tôt. Tu me manques.

AVANT-PROPOS

La j'ai fait des merci formels!

RÉSUMÉ

L'ensemble des environnements côtiers et océaniques de la planète est influencé par les activités humaines, dont les impacts peuvent modifier la structure et l'intégrité des écosystèmes de façon durable. Afin de protéger adéquatement le milieu naturel et de soutenir un développement anthropique durable, notamment dans des régions concentrant de multiples activités humaines, il est nécessaire de comprendre comment les écosystèmes marins sont influencés. Les communautés benthiques sont un compartiment particulièrement intéressant pour étudier ces problématiques, car de nombreuses espèces possèdent des capacités d'évitement limitées de par leur mode de vie majoritairement sessile ainsi qu'une espérance de vie élevée. Alors que travaux évaluant l'impact anthropique ont été effectués sur une large gamme d'écosystèmes à travers le monde, peu ont considéré spécifiquement des écosystèmes subarctiques, dont l'utilisation par l'homme est prévue d'augmenter en lien avec le changement climatique. C'est dans ce contexte que s'inscrit ma thèse, où l'objectif principal est de comprendre comment les écosystèmes benthiques d'une zone industrielo-portuaire subarctique sont influencés par les activités humaines. La zone d'étude considérée se trouve dans la région de Sept-Îles (Québec, Canada), plateforme économique importante pour le Québec, située dans le Golfe du Saint-Laurent. Pour répondre à ces problématiques, cette thèse est divisée en trois chapitres.

Le premier chapitre a pour but de caractériser la structure des écosystèmes côtiers considérés. Lors de campagnes de terrain et d'analyses en laboratoire, un total de 289 taxons a été échantillonné, dont la majorité, présentes dans le Golfe du Saint-Laurent, sont des nouvelles mentions dans cette région, et divers paramètres abiotiques du sédiment ont été évalués, telles que la concentration en matière organique, en métaux lourds et la distribution de fractions granulométriques. L'analyse de la similarité des assemblages d'invertébrés de taille supérieure à 0.5 mm a détecté des signes de perturbation dans certaines zones, avec un nombre accru d'espèces tolérant la pollution et d'espèces opportunistes. Des modèles de régression ont permis de mettre en évidence les variables de l'habitat qui impactent le plus la structure des communautés.

Le deuxième chapitre s'intéresse au statut écologique des écosystèmes en se basant sur la composition des communautés benthiques. Seize indicateurs du statut écologique ont été sélectionnés au moyen d'une revue de littérature, divisés en trois catégories selon leur méthodologie : mesures d'abondance, diversité des communautés et espèces indicatrices. Ces indicateurs ont été appliqués en utilisant les listes d'espèces obtenues lors du chapitre précédent, et la majorité ont détecté des communautés diversifiées sans signe évident de perturbation. De plus, plusieurs corrélations significatives ont été détectées entre les indicateurs et les paramètres de l'habitat, notamment avec les concentrations en métaux lourds. Chaque catégorie d'indicateur apporte des informations importantes sur l'état de l'écosystème tout en présentant des limitations, en particulier à propos des références

utilisées pour définir le statut écologique.

Le dernier chapitre a considéré les activités humaines influençant l'écosystème, afin de calculer une empreinte anthropique locale sur les communautés selon des gradients d'exposition. Un modèle de diffusion pour chaque activité considérée (aquaculture, dragage, influence industrielle, influence municipale, pêcheries, rejets d'égouts, transport maritime) a été développé grâce à la distance depuis leur(s) source(s) et des facteurs physiques. Plusieurs liens ont été découverts entre les indices d'expositions obtenus et la distribution des invertébrés benthiques, au moyen de modèles prédictifs *Hierarchical Modelling of Species Communities*. L'indice d'exposition cumulée a mis en évidence des zones de superposition d'activité humaine. Le profil des communautés présentes dans ces régions n'est pas particulièrement perturbé, ce qui corrobore les résultats des chapitres précédents sur le statut des écosystèmes considérés.

Cette thèse de doctorat contribue à l'amélioration des connaissances sur les écosystèmes côtiers subarctiques, notamment en présentant la première étude de biodiversité benthique dans la région de Sept-Îles. Des méthodes d'évaluation du statut écologique et de l'exposition anthropique ont été développées à l'échelle locale (< 100 km), qui constituent des outils particulièrement intéressants pour les gestionnaires afin de définir des objectifs de gestion et de soutenir des initiatives de conservation.

Mots clefs : écologie marine, écosystèmes côtiers subarctiques, invertébrés benthiques, biodiversité, prédiction des communautés, activités humaines, exposition anthropique, évaluation du statut écologique.

ABSTRACT

Coastal and ocean environments are influenced by human activities worldwide, the impacts of which can significantly modify the structure and integrity of ecosystems. In order to adequately protect the natural environment and support sustainable anthropogenic development, particularly in regions where multiple human activities cooccur, it is necessary to understand how marine ecosystems are influenced. Benthic communities are a particularly interesting compartment for studying these issues, because many species have a limited mobility due to their predominantly sessile lifestyle as well as a long life span. While studies assessing anthropogenic impact have been carried out on a wide range of ecosystems around the world, few have specifically considered sub-Arctic ecosystems, where human activity is expected to increase in connection with climate change. In this context, my thesis' main objective is to understand how the benthic ecosystems of a sub-Arctic industrial harbour area are influenced by human activities. The study area considered is located in the Sept-Îles region (Quebec, Canada), an important economic hub for Quebec, located in the Gulf of St. Lawrence. To address these issues, this thesis is divided into three chapters.

The first chapter aims to characterize the structure of the considered coastal ecosystems. During field campaigns and laboratory analyses, a total of 289 taxa were sampled, the majority of which, present in the Gulf of St.Lawrence, are new records in this region, and various abiotic parameters of the sediment were assessed, such as the concentration of organic matter, heavy metals and the distribution of particle size fractions. Similarity analysis of invertebrate assemblages larger than 0.5 mm detected signs of disturbance in some areas, with an increased number of pollution-tolerant and opportunistic species. Regression models highlighted which habitat variables have the most impact on the structure of communities.

The second chapter looks at the ecological status of ecosystems based on the composition of benthic communities. Sixteen indicators of ecological status were selected through a literature review, divided into three categories according to their methodology: measures of abundance, community diversity and indicator species. These indicators were applied using the species lists obtained in the previous chapter, and the majority detected diverse communities with no obvious sign of disturbance. In addition, several significant correlations were detected between indicators and habitat parameters, especially with heavy metal concentrations. Each category of indicator provides important information on the state of the ecosystem while presenting limitations, in particular about reference conditions used to define ecological status.

The last chapter considered human activities influencing the ecosystem, in order to calculate a local anthropogenic footprint on communities according to exposure gradients. A particle diffusion model for each activity considered (aquaculture, dredging, industrial

influence, city influence, fisheries, sewage discharges, shipping) was developed using the distance from their sources and physical factors. Several links were discovered between the exposure indices obtained and the distribution of benthic invertebrates, using predictive models *Hierarchical Modeling of Species Communities*. The cumulative exposure index revealed areas of superposition of human activity. The profile of the communities present in these zones is not particularly disturbed, which corroborates the results of the previous chapters on the status of the ecosystems considered.

This PhD thesis contributes to improving ecological knowledge in sub-Arctic coastal ecosystems, in particular by presenting the first benthic biodiversity census in the Sept-Îles region. Methods for assessing ecological status and anthropogenic exposure have been developed at the local scale (<100 km), which constitute particularly interesting tools for managers in order to define management targets and support conservation initiatives.

Keywords: marine ecology, sub-Arctic coastal ecosystems, benthic invertebrates, biodiversity, community prediction, human activities, anthropogenic exposure, ecological status assessment.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ix
AVANT-PROPOS	xiii
RÉSUMÉ	xv
ABSTRACT	xvii
TABLE DES MATIÈRES	xix
LISTE DES TABLEAUX	xxiii
LISTE DES FIGURES	xxv
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Écosystème : communautés et habitats	1
Perturbation de l'écosystème et effets sur les communautés	2
Les communautés benthiques	4
Influence anthropique	7
Application dans le Golfe du Saint-Laurent	10
Objectifs et structure de la thèse	12
Objectifs spécifiques	12
Structure des chapitres	13
ARTICLE 1	
ÉVALUATION DE LA BIODIVERSITÉ ET DE L'HABITAT DES COMMUNAUTÉS BENTHIQUES CÔTIERS EN ZONE INDUSTRIELLE-PORTUAIRE SUBARCTIQUE	17
Résumé	17
Title	18
Authors	19
Abstract	19
Introduction	19
Materials and methods	22
Study area	22

Sample collection	23
Laboratory work	24
Statistical analysis	25
Results and discussion	27
Description of the ecosystems	27
Similarity between taxa assemblages	36
Conclusions	45
Acknowledgements	46
Supplementary material	47
ARTICLE 2	
DÉTERMINER LE STATUT ÉCOLOGIQUE DE COMMUNAUTÉS BENTHIQUES CÔTIÈRES : LE CAS D'UNE ZONE INDUSTRIELLE PORTUAIRE CANADIENNE	51
Résumé	51
Title	52
Authors	53
Abstract	53
Keywords	53
Introduction	53
Methodology	53
Results	53
Discussion	53
Acknowledgements	53
ARTICLE 3	
TITLE	55
Résumé en français du troisième article	55
Contexte scientifique	55
Publication associée	55
Traduction du résumé de l'article publié	55
Title	55

Authors	55
Abstract	55
Keywords	55
Introduction	56
Methodology	56
Results	56
Discussion	56
Acknowledgements	56
CONCLUSION GÉNÉRALE	57
RÉFÉRENCES	59

LISTE DES TABLEAUX

1	Mean values (and standard error) of community characteristics calculated with stations included in the 0.5 mm and the 1 mm size classes.	32
2	Predictor coefficients (and standard error) from the multiple linear regression models of community characteristics obtained for the 0.5 mm and the 1 mm size classes. Model 1 corresponds to organic matter and grain size classes as predictors for stations in every sector, and Model 2 corresponds to heavy metal concentrations as predictors for stations in Baie des Sept Îles. OM = organic matter, As = arsenic, Cd = cadmium, Cr = chromium, Cu = copper, Fe = iron, Mn = manganese, Hg = mercury, Pb = lead, Zn = zinc, n = number of stations considered, "—" = predictors excluded by the best fit model selection. Significant p-values of marginal tests on predictors are highlighted in bold.	35
3	Bray-Curtis dissimilarity of the clusters obtained for the 0.5 mm and the 1 mm size classes. The diagonal of the triangular matrix corresponds to within-cluster dissimilarity, and other cells are across-cluster dissimilarity.	36
4	Mean values (and standard error) of habitat parameters calculated with stations belonging in the groups defined by the Hierarchical Agglomerative Clustering for the 0.5 mm and the 1 mm size classes. Only Baie des Sept Îles stations (when available in the cluster) were considered for the calculation of heavy metal concentration averages. n = number of stations considered for the calculation of each average.	39
5	List of the taxa along with the number of stations where this taxon was present and the number of collected individuals, for the 0.5 mm and the 1 mm size classes.	47

LISTE DES FIGURES

1	Diagramme représentant les liens entre les sources d'une perturbation (d'origine naturelle ou anthropique) et les communautés benthiques. . .	3
2	Représentation schématique de différents groupes d'espèces au sein d'une communauté biologique, en fonction de leur milieu de vie (A) ou de leur taille (B).	6
3	Carte de la zone d'étude considérée tout au long de cette thèse de doctorat.	11
4	Diagramme intégratif représentant les liens entre les différents chapitres de la thèse de doctorat. Les flèches grises correspondent aux liens entre composantes considérées des écosystèmes de la région d'étude (encadrés gris) et les chapitres (encadrés pourpres). Les flèches pourpres correspondent aux débouchés de chaque chapitre.	13
5	Maps of the study area. (a) Location of the considered sectors. (b) Stations sampled in the Pentecôte River sector. (c) Stations sampled in the coast of Port-Cartier sector. (d) Stations sampled in Baie des Sept Îles sector. (e) Stations sampled in the Manitou River sector.	23
6	Rarefaction curves for taxa assemblages of the 0.5 mm and the 1 mm size classes.	30
7	Scatterplot of the taxonomic distinctness ($\Delta+$) as a number of taxa sampled at a station. The dashed grey line corresponds to the expected value of $\Delta+$ and the dashed grey curves are the upper and lower limits of the standard deviation interval calculated with the value of $\Delta+$ at each station. Point colour represent similarity groups defined by Hierarchical Agglomerative Clustering. (a) Scatterplot for the 0.5 mm size class. (b) Scatterplot for the 1 mm size class.	31
8	Hierarchical Agglomerative Clustering of taxa assemblages. The dendrogram presents relationships between stations, displayed on the map with one colour for each group. (a) Clusters for the 0.5 mm size class. (b) Clusters for the 1 mm size class.	40

9	Constrained ordination with a distance-based Redundancy Analysis for taxa assemblages obtained for the 0.5 mm and 1 mm size classes. Only predictors selected by the distance-based linear modelling (DistLM) are displayed. Point colour represents similarity groups defined by the Hierarchical Agglomerative Clustering. OM = organic matter, As = arsenic, Cd = cadmium, Cr = chromium, Cu = copper, Fe = iron, Mn = manganese, Hg = mercury, Pb = lead, Zn = zinc. (a) Ordination for the 0.5 mm size class with organic matter and grain-size classes as predictors (Model 1). (b) Ordination for the 0.5 mm size class with heavy metal concentrations as predictors (Model 2). (c) Ordination for the 1 mm size class with organic matter and grain-size classes as predictors (Model 1). (d) Ordination for the 1 mm size class with heavy metal concentrations as predictors (Model 2).	42
10	Values of habitat parameters at each station. (a) Map for station depth. (b) Map for organic matter content. (c) Map for gravel content. (d) Map for sand content. (e) Map for silt content. (f) Map for clay content. . .	48
11	Values of heavy metal concentrations at each station. (a) Map for arsenic concentration. (b) Map for cadmium concentration. (c) Map for chromium concentration. (d) Map for copper concentration. (e) Map for iron concentration. (f) Map for manganese concentration. (g) Map for mercury concentration. (h) Map for lead concentration. (j) Map for zinc concentration.	49
12	Values of community characteristics at each station. (a) Map for taxa richness for the 0.5 mm size class. (b) Map for taxa richness for the 1 mm size class. (c) Map for total density for the 0.5 mm size class. (d) Map for total density for the 1 mm size class. (e) Map for Shannon diversity for the 0.5 mm size class. (f) Map for Shannon diversity for the 1 mm size class. (g) Map for Pielou evenness for the 0.5 mm size class. (h) Map for Pielou evenness for the 1 mm size class. (i) Map for taxonomical distinctness for the 0.5 mm size class. (j) Map for taxonomical distinctness for the 1 mm size class.	50

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'augmentation sans-précédent de l'empreinte anthropique sur les écosystèmes depuis l'ère industrielle a motivé la volonté de comprendre la place qu'occupe l'humanité dans le milieu qu'elle habite, en particulier à propos des océans, longtemps considérés comme immarcescibles. La totalité des écosystèmes marins, qu'ils soient côtiers, pélagiques ou profonds, subit au moins une influence d'origine anthropique (?), et l'intensité et la diversité de ces pressions est en constante augmentation (?Boonstra et al., 2015). Fortes de ce constat, plusieurs organisations internationales, comme la *Convention on Biological Diversity* sous l'égide des Nations Unies, ont mis en place des objectifs concrets de protection des écosystèmes, dans le but de guider les initiatives de conservation et de développement durable (?; ?). Ces initiatives représentent des opportunités uniques d'augmenter les interactions entre scientifiques, industriels, politiques et citoyens afin d'accroître et diffuser nos connaissances sur les écosystèmes marins.

Écosystème : communautés et habitats

Un écosystème est un ensemble constitué de deux composantes interconnectées. La première est la composante abiotique, liée aux paramètres physiques, chimiques et géologiques du milieu, qui est représentée par les habitats (ensemble de conditions environnementales particulières) (??). La seconde est la composante biotique, correspondant aux espèces présentes dans ce milieu, regroupées en communautés (ensemble d'espèces vivant dans un habitat particulier) (??). Cette définition inclut également les relations au sein de chaque composante, par exemple les interactions entre individus d'une même espèce (intraspécifiques) ou d'espèces différentes (interspécifiques).

Le terme “biodiversité” est employé pour désigner la diversité biologique d'un écosystème, et celle-ci peut être définie selon plusieurs perspectives, qu'elle soit spécifique (nombre de taxons différents), génétique (nombre des gènes différents), fonctionnelle (nombre

de fonctions différentes) ou écosystémique (nombre d'habitats différents) (??????). Le caractère multiple de cette définition rend son interprétation particulièrement complexe, et la diversité spécifique est généralement employée comme un indicateur unique de la biodiversité (par ex. ?). En effet, les liens entre la diversité spécifique et la structure d'un écosystème ont été mis en évidence aussi bien en milieu terrestre (par ex. ?) qu'aquatique (par ex. ??).

La persistance d'une espèce dans un écosystème est intrinsèquement reliée à son habitat, où elle effectuera des compromis (*trade-offs*) en fonction de son métabolisme et de son comportement afin de maintenir sa population (?). Ceci constitue la théorie de la niche écologique, qui peut être définie selon plusieurs concepts (?????). En retour, les espèces induisent des modifications de l'habitat, par exemple en diminuant la disponibilité en ressources ou en modifiant l'intégrité physique du milieu (???). L'étude de la structure et de l'évolution des écosystèmes est donc dépendante, à la fois, de l'étude de la biodiversité, de l'habitat et de leurs équilibres respectifs.

Perturbation de l'écosystème et effets sur les communautés

De nombreuses études écologiques cherchent à comprendre comment réagissent les différentes composantes de l'écosystème face à une perturbation avant, pendant et après son occurrence, notamment dans des buts de conservation ou de restauration. Plusieurs méthodes peuvent être choisies pour répondre à cet objectif, souvent reliées à des disciplines scientifiques particulières, ce qui rend complexe la définition et l'utilisation des termes utilisés (??). Tout au long de cette thèse de doctorat, les définitions suivantes, illustrées par la Figure 5, ont été choisies.

Une “perturbation”, dans le sens de *disturbance* en anglais, est une force qui affecte des processus environnementaux et/ou modifie un écosystème hors d'une situation d'équilibre (??Boonstra et al., 2015; ?; ?). Nombre de synonymes existent pour cette définition, comme “stresseur” (*stressor*), “déterminant” (*driver of change*) ou “pression”

(*pressure*), et le débat n'est pas clos quant à savoir quel terme privilégier (Crain et al., 2008; Darling and Côté, 2008; ?; Côté et al., 2016). L'origine d'une perturbation peut être naturelle, selon des évènements stochastiques (par ex. les tempêtes) ou cycliques (par ex. les saisons), ou bien anthropique, c'est-à-dire reliée aux activités humaines (?Micheli et al., 2016). Les conséquences d'une perturbation sont regroupées sous les termes "impact" ou "effet", qui vont entraîner des modifications mesurables de processus physiologiques, fonctionnels ou environnementaux au sein de l'écosystème (???).

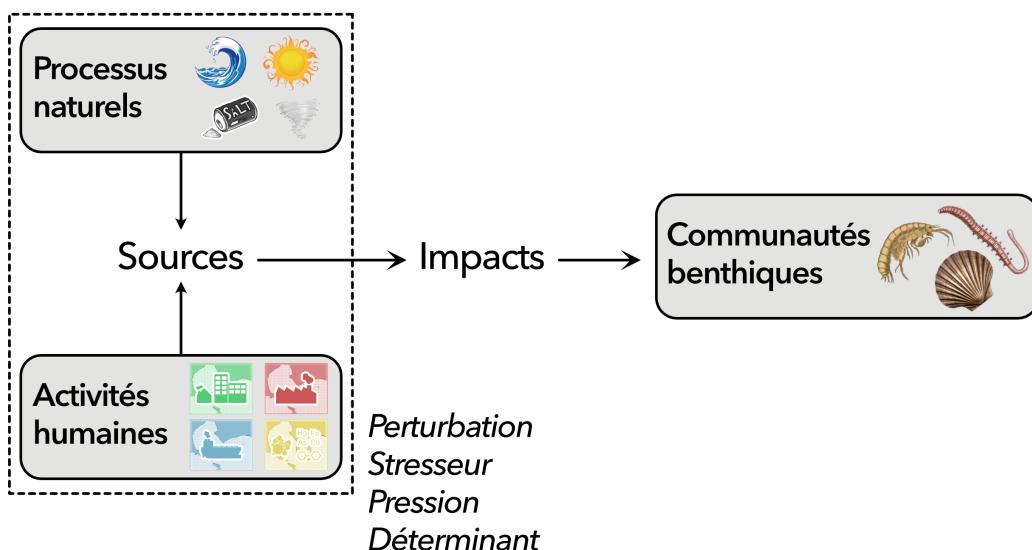


FIGURE 1 – Diagramme représentant les liens entre les sources d'une perturbation (d'origine naturelle ou anthropique) et les communautés benthiques.

Lorsqu'un écosystème subit une perturbation, celle-ci peut donc se traduire par une modification instantanée et/ou durable des composantes abiotique ou biotique (??). Ces phénomènes n'ont pas nécessairement les mêmes échelles spatiales et temporelles, où certaines perturbations peuvent être ponctuelles et éphémères, d'autres beaucoup plus diffuses et persistantes (??), ce qui influera sur les notions de résistance (capacité à supporter les effets d'une perturbation), de résilience (temps nécessaire pour atteindre à nouveau l'état avant la perturbation) de l'écosystème.

Au sein des communautés, le maintien de la population d'une espèce est alors conditionné aux réponses qu'elle adoptera pour s'acclimater à ces nouvelles conditions (??). Par exemple, une perturbation peut favoriser des espèces adaptées au caractère instable associé à ces évènements (??). De telles espèces sont dites opportunistes, présentant une croissance rapide de leur population et une forte densité d'individus de petite taille (appelée stratégie de type r, privilégiant un fort taux de reproduction), en opposition aux espèces longévives et moins abondantes retrouvées dans des environnements plus stables (stratégie de type K, privilégiant le maintien de la population à sa capacité maximale) (??).

Les communautés benthiques

Avec plus de 70 % de la surface de la planète recouverte par des océans, les écosystèmes marins regroupent une vaste gamme d'environnements. Leurs limites peuvent être définies selon de nombreux critères et en fonction des échelles spatio-temporelles considérées (?). Parmi les critères les plus couramment utilisés se trouvent les écosystèmes pélagiques (dans la colonne d'eau), benthiques (en lien avec les fonds marins), intertidaux (dans la zone de balancement des marées), subtiaux (non-influencés par les marées), côtiers (influencés par les apports d'origine terrestre et sur le talus continental) ou hauturiens (au large des côtes) (?). Il existe différents patrons de biodiversité entre ces écosystèmes (par ex. ??), et les environnements côtiers subtiaux figurent parmi les plus riches et diversifiés.

Le compartiment benthique contient une diversité élevée d'organismes, incluant des assemblages complexes de virus, bactéries, faune et flore. En pratique, ces communautés sont souvent séparées en différents sous-ensembles partageant des caractéristiques communes, afin de répondre à des questions écologiques spécifiques (par ex. ??). Plusieurs catégories d'organismes ont été définies en fonction de leur taille : la microfaune (organismes plus petits que 0.1 mm), la méiofaune (entre 0.1 et 0.5/1 mm), la macrofaune (entre 0.5/1 et 100 mm) et la mégafaune (plus de 100 mm) (Figure 5) (???). La limite

séparant la méiofaune et la macrofaune (0.5 ou 1 mm) fait encore aujourd’hui l’objet de débats entre chercheurs ; il s’agit d’une considération importante car le choix de cette limite aura un impact direct sur la résolution taxonomique des communautés étudiées (??).

Les invertébrés macrobenthiques, qui constituent le principal objet d’étude de cette thèse de doctorat, regroupent les espèces de nombreux phyla vivant en lien avec les fonds marins. Ceux-ci peuvent être sessiles (fixé sur un substrat) ou mobile, évoluant dans, sur ou au-dessus du sédiment (respectivement l’endobenthos, l’épibenthos et le suprabenthos) (Figure 6). De plus, certaines espèces peuvent être benthiques tout au long de leur vie (cycle holobenthique) ou à seulement des étapes précises de leur développement (cycle benthico-pélagique). La diversité de ces modes de vie est reliée à un nombre important de stratégies évolutives mises en œuvre pour prospérer dans l’habitat, que ce soit des méthodes de nutrition (par ex. filtration de l’eau, ingestion du sédiment, le recyclage de matières détritiques), des comportements (par ex. mode de vie, mobilité) ou des interactions biotiques (par ex. symbiose, parasitisme). De plus, les espèces macrobenthiques sont incluses dans des réseaux trophiques complexes, qui permettent les transferts d’énergie à travers l’écosystème.

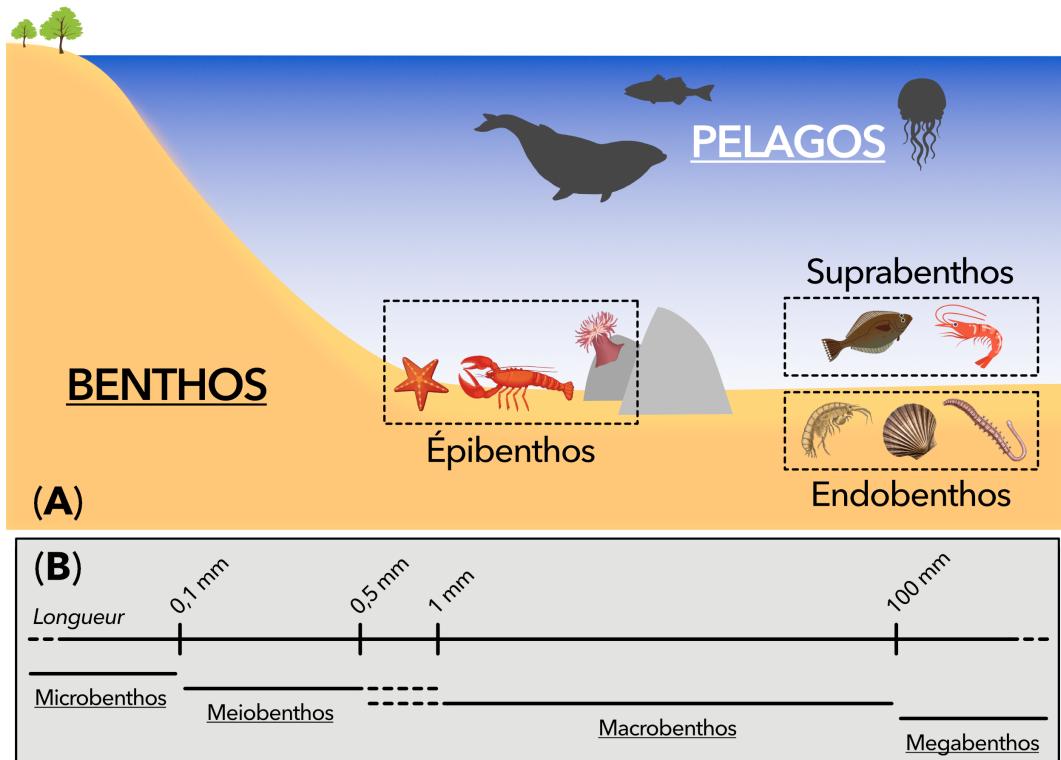


FIGURE 2 – Représentation schématique de différents groupes d'espèces au sein d'une communauté biologique, en fonction de leur milieu de vie (A) ou de leur taille (B).

Au sein de la macrofaune – et *a fortiori* au sein des communautés benthiques en général –, chaque espèce possède un rôle dans la structure de l'écosystème en lien avec son utilisation de l'habitat. L'étude de ces rôles est particulièrement intéressante pour comprendre la structure des écosystèmes (?). Par exemple, les espèces *ingénierues* modifient directement ou indirectement les caractéristiques d'un écosystème par leur mode de vie (par ex. en créant des structures biogéniques, pouvant jouer le rôle d'habitats pour d'autres espèces) ou leur comportement (par ex. en oxygénant le sédiment profond avec une activité de bioturbation), ce qui permettra à d'autres espèces de profiter d'habitats particuliers (? ; ?).

Beaucoup de ces espèces possèdent des capacités d'évitement limitées, ce qui peut conduire une dégradation de l'état des populations et à une mortalité accrue lorsque

l'écosystème est perturbé (?). Ceci est notamment le cas pour les espèces sessiles (par ex. les moules ou les anémones), les espèces vivant dans le sédiment (comme les amphipodes ou les mollusques fouisseurs) ou les organismes filtreurs (tels que des polychètes tubicoles ou les éponges) qui sont particulièrement sensibles aux perturbations chimiques affectant la colonne d'eau. La présence (ou l'absence) de ces espèces, ainsi qualifiées de "sentinelles" ou "indicatrices", aura la possibilité de détecter un certain état de l'écosystème (???).

Influence anthropique

À l'échelle mondiale, la population humaine mondiale a atteint 7.7 milliards d'individus en 2019, et les projections démographiques indiquent qu'elle s'élèvera à 9.7 milliards en 2050 (?). Avec une proportion importante de cette population qui entretient des liens étroits avec l'océan - environ 40 % vit à moins de 100 km des côtes -, la croissance de l'influence humaine sur les milieux marins est évidente (Ban and Alder, 2008; ?, ?). De nombreux exemples ont été documentés à travers le monde, mettant ainsi en lumière des conséquences sur les écosystèmes comme l'extinction locale de populations (par ex. la disparition de la morue Arctique due à la pêche intensive de ses stocks, ?), l'introduction d'espèces exotiques (par ex. l'introduction de l'ascidie *Botryllos schlosseri* à cause du trafic maritime, ?) ou encore la destruction d'habitats (par ex. due à l'exploitation de ressources fossiles, Archambault et al., 2016).

L'étude de l'influence anthropique a souvent été focalisée sur une activité humaine (par exemple le dragage ou la pêche), un processus (tels que le réseau trophique ou les réponses physiologiques à un contaminant) ou un certain type d'écosystème (comme les récifs coralliens ou les forêts de macroalgues) (REF ?). Le déploiement de technologies telles qu'une puissance de calcul informatique et une couverture satellitaire accrues permettent aujourd'hui de considérer l'empreinte humaine d'une façon plus holistique (Micheli et al., 2016; ?). De plus, l'étude du cumul de différentes influences permet de répondre à des questions écologiques plus complexes, notamment en étudiant de possibles effets émergents dues aux interactions entre activités (Crain et al., 2008; Darling and

Côté, 2008; Halpern and Fujita, 2013; ?; ?; ?; ?).

L'utilisation du terme "impact", nécessite de considérer comment les composantes de l'écosystème répondent aux perturbations qui les influencent (??). Il existe un éventail de méthodes permettant l'évaluation des impacts sur les communautés et les habitats, telles que les campagnes de terrain adoptant des plans d'échantillonnage spécifiques comme les plans *Before-After and Control/Impact* (BACI), les expériences en laboratoire comparant conditions contrôles et impactées, ou des modélisations informatiques (????). De plus, les modèles intégratifs, tels que le modèle *Driver-Pressure-State-Impact-Response* (DPSIR), ou les projets à stratégie holistique, comme le *marine spatial planning* ou le *ecosystem-based management*, permettent de bâtir des liens nécessaires entre disciplines scientifiques et acteurs environnementaux (????).

De nombreuses évaluations d'impacts des activités humaines s'intéressent à caractériser le "statut écologique" des milieux étudiées. La notion de "bon état écologique" a été définie dans l'Article 3 de la *Marine Strategy Framework Directive* (??) :

"Good Environmental Status is the environmental status of marine waters where these provide ecologically diverse and dynamic oceans and seas which are clean, healthy and productive."

Cette définition s'accompagne d'objectifs concrets, notamment dans le cadre de décisions internationales telles que l'Accord de Paris sur le climat (cible de 10 % d'aires marines et côtières protégées), *Aichi Biodiversity Targets* et les *Sustainable Development Goals* (???). Afin de guider les objectifs de conservation et de protection des écosystèmes, les études écologiques peuvent avoir recours à des indicateurs environnementaux, c'est-à-dire des métriques quantitatives qui synthétisent des composantes de l'écosystème pour détecter des changements et inférer un statut (??). Dans le cas de la *Marine Strategy Framework Directive*, onze Descripteurs du bon état écologique ont été établis et chacun comporte de nombreux indicateurs utilisés dans des protocoles standardisés (?). Même si beaucoup de ces méthodes ont fait leurs preuves (par ex. ?), elles peuvent être complexes

à appliquer dans d'autres écosystèmes que ceux dédiés à leur développement ou être trop intégratrices pour correctement détecter la variation des écosystèmes (??).

Différentes voies d'amélioration ont été proposées, comme l'intégration de perturbations multiples, de gradients de perturbation ou la considération de réseaux écosystémiques. Le score d'impact cumulé développé par Halpern et al. (2008) (mis à jour par ?) constitue un exemple récent, où plusieurs stresseurs anthropiques ont été caractérisés à l'échelle globale. Cette méthode combine deux propriétés de l'écosystème pour calculer un score d'impact : la vulnérabilité (susceptibilité de l'écosystème à une perturbation) et l'exposition (occurrence spatiale et temporelle de la perturbation) (?Halpern et al., 2007, 2008). En l'état des connaissances, considérer la vulnérabilité de façon adéquate demande un large volume de données (par ex. sur les tolérances physiologiques des espèces, les interactions biotiques ou les modes d'actions des perturbations) qui peuvent être spécifiques à des écosystèmes particuliers, ce qui augmente rapidement la complexité de ces évaluations (? , ?). Une solution possible est de se concentrer sur l'exposition, afin de cibler quels compartiments pourraient être influencés par des perturbations spécifiques, et ainsi concentrer les efforts d'évaluation de la vulnérabilité sur les interactions déterminées pertinentes.

L'évaluation du statut de l'écosystème peut être réalisée à différentes échelles spatiales selon les systèmes écologiques, les objectifs de conservation ainsi que les unités de gestion considérées. Bien que les études régionales et mondiales permettent d'obtenir des informations pertinentes sur les tendances à large échelle et de mobiliser un ensemble de nations pour atteindre des objectifs communs, il est important de considérer des études à plus petite échelle (par ex. à l'échelle d'un estuaire, d'une baie, d'une côte) car les processus écologiques ne sont pas identiques et d'autres types de réponses peuvent être analysées (???). De plus, la mobilisation des parties publiques, industrielles et scientifiques pour des projets de protection environnementale peut être sensiblement accrue.

Application dans le Golfe du Saint-Laurent

En 2019, 13,8 % des côtes du Canada étaient régulées par une forme de gestion publique et 8,9 % (511 906 km²) étaient officiellement protégées (?). Ce total pourrait augmenter à 30 % d'ici 2030, suite à la décision de rejoindre la *Global Ocean Alliance* (?). Le long de la côte Est du Canada, le complexe de l'Estuaire et du Golfe du Saint-Laurent est l'une des régions qui concentre le plus d'activités humaines (Belley et al., 2010; ?; Schloss et al., 2017). Le transport de marchandises depuis l'Atlantique vers les Grands Lacs est un axe commercial majeur, à partir duquel sont connectées de nombreuses chaînes d'approvisionnement au Canada et aux États-Unis (?).

Le Golfe du Saint-Laurent comprend les eaux entre Pointe-des-Monts jusqu'aux détroits de Cabot et Belle-Isle (Figure 7). Cette région est considérée subarctique, subissant ainsi de fortes variations de température et de salinité dues à la formation de glace sur les côtes et de banquise en hiver, ainsi que d'importants apports d'eau douce suite au dégel au printemps (Dutil et al., 2012; ?). Il s'agit d'une zone importante de biodiversité, avec la présence d'espèces emblématiques, telles que des mammifères marins (par ex. *Delphinapterus leucas*, *Megaptera novaeangliae*) (Schloss et al., 2017; ?), et de nombreuses espèces d'intérêt commercial pour la pêche (par ex. *Chionoecetes opilio*, *Pandalus borealis*, *Gadus morua*, *Hippoglossus hippoglossus*) (?). Plusieurs initiatives à l'échelle du Québec et du Canada font de la sauvegarde des écosystèmes dans le système du Saint-Laurent une priorité (?), et le Ministère des Pêches et Océans a désigné cette région comme une aire de gestion intégrée avec des objectifs de protection des écosystèmes (??).

Selon ?, plusieurs régions concentrent un nombre élevé d'activités humaines, notamment le long des côtes à l'ouest du Golfe. Ceci est d'autant plus vrai pour les zones industrielles portuaires, qui correspondent à un espace délimité servant à des fins industrielles et situé à proximité de services portuaires ainsi que d'infrastructures routières et ferroviaires (?). Parmi les zones industrielles portuaires présentes dans le Golfe du Saint-Laurent, celle située à Sept-Îles (région Côte-Nord) est certainement la plus importante. Sept-Îles

est le 2^{ème} port québécois, le 4^{ème} canadien, et en 2019, 29,3 millions de tonnes de marchandises y ont été échangées (??). Les principales industries sont principalement la transformation du minerai acheminé par train depuis les mines du nord du Québec et du Labrador, la pêche commerciale (crabe des neige, crevette nordique, flétan et bulot principalement), ainsi que le tourisme (?). La région maritime de Sept-Îles est composée de deux éléments géographiques d'importance : la Baie des Sept Îles et l'archipel à son entrée (Figure 7).

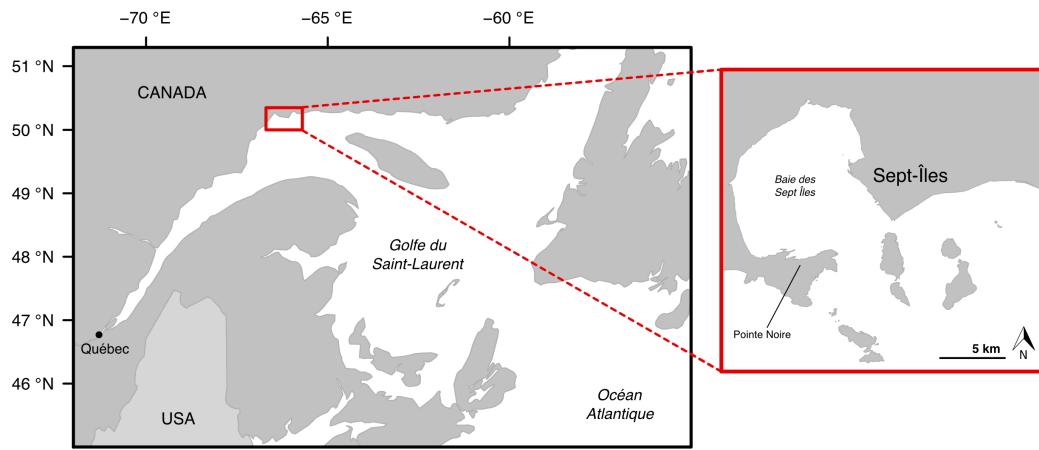


FIGURE 3 – Carte de la zone d'étude considérée tout au long de cette thèse de doctorat.

Peu d'études écologiques ont cherché à caractériser ces écosystèmes ainsi que leur environnement abiotique, ce qui pose un défi conséquent dans le cadre de la stratégie de protection des écosystèmes dans le système du Saint-Laurent. La zone industrielle portuaire de Sept-Îles représente donc un cadre d'étude particulièrement intéressant afin de comprendre comment les activités humaines influencent des écosystèmes côtiers canadiens à l'échelle locale.

Objectifs et structure de la thèse

Objectifs spécifiques

L'objectif principal de cette thèse de doctorat est ainsi de décrire les relations entre communautés benthiques et activités humaines à l'échelle d'une zone industrielle-portuaire. Ce projet de recherche s'inscrit dans les problématiques spécifiques du *Canadian Healthy Oceans Network II* (thème “*Coastal stressors*”) et du regroupement Québec-Océan (axe “Intégrité des milieux marins côtiers et enjeux socioéconomiques régionaux”).

Pour répondre à cet objectif, la thèse est divisée en trois chapitres, illustrés par le schéma conceptuel de la Figure 8. En premier lieu, j'ai effectué la première description synthétique de la structure des écosystèmes benthiques côtiers dans la région de Sept-Îles, permettant de disposer de données de base sur les communautés macrobenthiques et leurs habitats (chapitre 1). En se basant sur ces résultats, j'ai ensuite cherché à déterminer quel était le statut environnemental de la zone industrielle-portuaire de Sept-Îles en testant plusieurs indicateurs écologiques (chapitre 2). Enfin, partant du fait que beaucoup de ces indicateurs possèdent des limitations dans leur interprétation, j'ai développé un modèle local pour caractériser l'exposition des communautés benthiques aux activités humaines et j'ai testé l'efficacité de ce modèle à prédire la structure des communautés benthiques (chapitre 3).

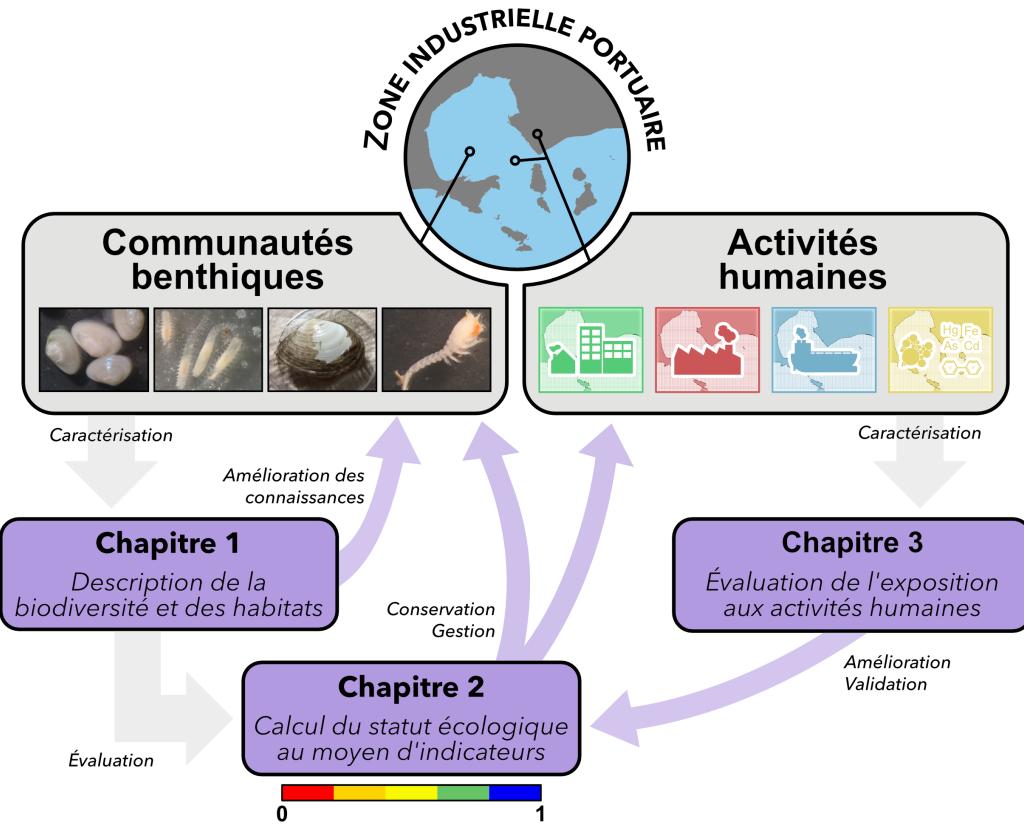


FIGURE 4 – Diagramme intégratif représentant les liens entre les différents chapitres de la thèse de doctorat. Les flèches grises correspondent aux liens entre composantes considérées des écosystèmes de la région d'étude (encadrés gris) et les chapitres (encadrés pourpres). Les flèches pourpres correspondent aux débouchés de chaque chapitre.

Structure des chapitres

Chapitre 1 : Évaluation de la biodiversité et de l'habitat des communautés benthiques côtiers en zone industrielle-portuaire subarctique

La région considérée pour cette thèse de doctorat possède peu de données écologiques sur ses écosystèmes benthiques. Afin d'évaluer efficacement les réponses des écosystèmes aux perturbations, notamment en disposant de conditions de référence robustes, ce chapitre a pour objectifs :

- Décrire les habitats et communautés macrobenthiques dans la région de Sept-Îles

- Évaluer les liens entre les communautés et les variables abiotiques de leur habitat
- Étudier la similarité des assemblages benthiques dans la zone considérée
- Évaluer comment la taille considérée pour étudier le compartiment benthique influence la description de l'écosystème

Deux campagnes de terrain ont permis de récolter les données écologiques nécessaires à répondre à ces objectifs, en particulier grâce à l'identification des espèces macrobenthiques et la mesure de variables abiotiques. Plusieurs groupes de stations d'échantillonnage ont été formés en fonction de la similarité de leurs assemblages d'espèces, et leur relation avec l'habitat a été évalué afin de comprendre quelles étaient les variables structurantes.

Chapitre 2 : Identifier le statut écologique de communautés benthiques côtières - étude de cas dans une zone industrielle portuaire canadienne

En se basant sur les travaux réalisés pour le chapitre 1, il est possible de se demander si les écosystèmes étudiés sont en bon état écologique, avec des perspectives de gestion et de conservation. Ainsi, les objectifs de ce chapitre sont :

- Comparer l'efficacité de plusieurs indicateurs écologiques pour déterminer le statut des écosystèmes
- Valider les résultats obtenus en mettant en relation le statut écologique obtenu avec les paramètres de l'habitat, afin de sélectionner des applications appropriées

Les indicateurs ont été sélectionnés au moyen d'une revue de littérature puis classés selon leur méthodologie. Ils ont ensuite été appliqués sur les données collectées lors du chapitre 1, après recherche d'informations complémentaires sur les espèces benthiques échantillonnées, notamment leur diversité et leurs réponses aux perturbations. Enfin, les corrélations entre indicateurs et paramètres de l'habitat ont été testées pour comprendre la pertinence de chaque indicateur.

Chapitre 3 : Exposition des écosystèmes benthiques côtiers aux activités humaines - modèle local d'évaluation et prédiction de la structure des communautés

Ce dernier chapitre entreprend de mettre en relation les communautés macrobenthiques avec les activités humaines présentes dans cette région en décrivant l'exposition anthropique des écosystèmes à l'échelle locale. Les objectifs spécifiques sont :

- Développer un modèle pour déterminer l'exposition des écosystèmes benthiques
- Prédire la structure des communautés en fonction de leur exposition anthropique (individuelle et cumulée)

Pour ce chapitre, des modèles de diffusion particulière ont été considérés pour déterminer les régions les plus exposées depuis les sources des activités humaines considérées. Le principal défi a été de modéliser adéquatement le comportement de ces particules théoriques dans un environnement où peu de données, notamment sur la circulation océanique, étaient disponibles. Ces modèles ont ainsi permis d'analyser les influences individuelles et cumulées des activités humaines. Enfin, des modèles joints de distribution d'espèces - qui prennent en compte les interactions entre les taxa présents dans une communautés - ont été utilisés pour déterminer la structure des communautés benthiques avec les indices d'exposition comme prédicteurs et identifier de potentielles zones perturbées.

ARTICLE 1

ÉVALUATION DE LA BIODIVERSITÉ ET DE L'HABITAT DES COMMUNAUTÉS BENTHIQUES CÔTIERS EN ZONE INDUSTRIELLE-PORTUAIRE SUBARCTIQUE

Résumé

Les écosystèmes côtiers sont confrontés à des pressions anthropiques croissantes dans le monde entier et leur gestion nécessite une évaluation et une compréhension solides des impacts cumulatifs des activités humaines. Cette étude évalue la variation spatiale des communautés macrofauniques benthiques, des sédiments et des métaux lourds dans les écosystèmes côtiers subarctiques autour de Sept-Îles (Québec, Canada) - une zone portuaire importante dans le Golfe du Saint-Laurent. Les propriétés physiques des sédiments variaient dans la zone étudiée, avec un profil général sablo-vaseux, sauf à des endroits spécifiques de la Baie des Sept Îles où des concentrations plus élevées de matière organique et de métaux lourds ont été détectées. Les assemblages macrofauniques ont été évalués pour deux classes de taille de taxons (organismes $> 0,5$ mm et > 1 mm) et reliés aux paramètres de l'habitat à l'aide de modèles de régression. Des communautés d'organismes plus petits ont montré des signes de perturbation pour un assemblage proche des activités industrielles de la Baie des Sept Îles, avec un nombre accru d'espèces tolérantes et opportunistes, contrairement aux régions voisines dont la composition était similaire à celle d'autres écosystèmes dans le Golfe du Saint-Laurent. Cette étude améliore la compréhension des communautés benthiques subarctiques et contribue aux programmes de surveillance des écosystèmes en zone industrielle-portuaire.

L'article associé à ce chapitre, "*Biodiversity and habitat assessment of coastal benthic communities in a sub-Arctic industrial harbour area*", a été rédigé en collaboration

avec Christopher W. McKindsey, Cindy Grant, Lisa Tréau de Coeli, Richard St-Louis et Philippe Archambault. Il a été publié dans le journal *Water*, dans la section spéciale *Quantifying the Effects of Global Change on the Distribution and Quality of Aquatic Resources*, le 28 août 2020. J'ai établi les objectifs de ce chapitre avec Christopher W. McKindsey et Philippe Archambault, et j'ai effectué la collecte de données sur le terrain en 2016 et en 2017 avec le soutien de plusieurs stagiaires sous ma direction. J'ai compilé les bases de données et effectué les analyses statistiques, tout en intégrant les données et résultats de la campagne 2014 effectuée par Cindy Grant et Lisa Tréau de Coeli. J'ai dirigé la rédaction de l'article, où l'ensemble des co-auteurs a contribué à l'interprétation des résultats en fonction de leur expertise et à la révision générale. Les données liées à cet article sont accessibles dans le dépôt en ligne hébergé par le site Scholars Portal DataVERSE avec l'identifiant unique [10.5683/SP2/5LJYXO](<https://doi.org/10.5683/SP2/5LJYXO>). Les résultats obtenus durant ces travaux ont été présentés lors de la Réunion Scientifique Annuelle de Québec-Océan à Rivière-du-Loup en novembre 2017, la *World Conference on Marine biodiversity* à Montréal en mai 2018 et le Colloque International sur la Recherche Scientifique Industrielle-Portuaire à Sept-Îles en mai 2019.

Dreujou E, McKindsey CW, Grant C, Tréau de Coeli L, St-Louis R, Archambault P (2020). Biodiversity and Habitat Assessment of Coastal Benthic Communities in a Sub-Arctic Industrial Harbor Area. *Water* 12(9):2424. DOI:10.3390/w12092424.

Les sections suivantes correspondent à celles de l'article publié.

Title

Biodiversity and habitat assessment of coastal benthic communities in a sub-Arctic industrial harbour area

Authors

Elliot Dreujou, Christopher W McKindsey, Cindy Grant, Lisa Tréau de Coeli, Richard St-Louis, Philippe Archambault

Abstract

Coastal ecosystems face increasing anthropogenic pressures worldwide and their management requires a solid assessment and understanding of the cumulative impacts from human activities. This study evaluates the spatial variation of benthic macrofaunal communities, sediments, and heavy metals in the sub-Arctic coastal ecosystems around Sept-Îles (Québec, Canada) – a major port area in the Gulf of St. Lawrence. Physical sediment properties varied in the studied area, with a general sandy-silty profile except for specific locations in Baie des Sept Îles where higher organic matter and heavy metal concentrations were detected. Macrofaunal assemblages were evaluated for two taxa size classes (organisms > 0.5 mm and > 1 mm) and linked to habitat parameters using regression models. Communities of smaller organisms showed signs of perturbation for one assemblage close to industrial activities at Baie des Sept Îles, with an increased number of tolerant and opportunistic species, contrasting to neighbouring regions whose compositions were similar to other ecosystems in the Gulf of St. Lawrence. This study enhances the understanding of sub-Arctic benthic communities and will contribute to monitoring programs for industrial harbour ecosystems.

Keywords: Biodiversity, coastal benthos, macrofauna, sub-Arctic ecosystems, Gulf of St. Lawrence

Introduction

It is now widely recognized that marine ecosystems worldwide are susceptible to human-induced disturbances (?), and benthic coastal habitats rank among the most vulnerable (Halpern et al., 2007; ?). When human activities influence ecosystems, communities may

be modified by the loss of sensitive species and the selection of tolerant or opportunistic species, for example (??). Such changes in species composition concomitantly impact ecosystem structure, affecting community characteristics (*e.g.* species richness, evenness) or ecosystem functional diversity (????). Understanding the links between disturbances and community responses is therefore relevant to understanding ecosystem evolution and stability.

In the context of increasing anthropogenic influences on marine ecosystems, a better understanding of ecosystem effects is needed for efficient conservation and management measures, along with sustainable development. Many organizations have highlighted the importance of biologically diverse ecosystems for mankind and have set targets to preserve them and guide decision makers (*e.g.* ???). To achieve these goals, tools are needed to detect and manage human influences on the environment.

Many factors influence ecosystems, from large-scale (*e.g.* climate, oceanic circulation) to small-scale phenomena (*e.g.* sediment perturbation, species interactions), which are often location- and temporally-specific (?). This complexity is a major concern for environmental assessment studies, where the goal is to detect possible human influence in a context of natural variability. Ecosystem status is considered in relation to a reference condition that corresponds to pristine or low human-influenced conditions, which rely upon the best knowledge available (?). Ecological groundwork, such as biodiversity surveys, time series monitoring or experimental studies, is then required to understand the ecosystem structure and stability and how to define accurate reference conditions for environmental assessments.

Macrofauna plays an important role in the structure and functioning of benthic marine ecosystems (??). Examples of this include engineering species (*e.g.* structural features for other species, bioturbation) or interactions with nutrient cycles (*e.g.* nutrient burial in the sediment, remineralization, benthos-pelagos coupling) (????). As many macrobenthic species have a sedentary lifestyle and a relatively long life span, they can

serve as indicators of the ecological status to assess and predict human influences (*e.g.* (?)). Finally, the macrofaunal compartment includes a variety of individual body sizes, from larvae to fully grown adults, and distinctions from meiofauna can be difficult to establish (?). The definition of the body size range is an important consideration for ecosystem biodiversity studies, as it will be a trade-off between increased biodiversity data by including smaller organisms and increased fieldwork and identification time (???).

In Eastern Canada, the Gulf of St. Lawrence is subjected to a variety of human activities, including industrial centres, commercial shipping, harbours, fisheries and aquaculture (Belley et al., 2010; ?; Schloss et al., 2017). Many ecological surveys on benthic invertebrates are available, in particular thanks to periodic stock assessment surveys, but few have specifically targeted coastal and shallow waters. One of the coastal areas likely most influenced by human activities is around Sept-Îles (Québec). In 2011, Sept-Îles harbour housed the sixth-largest Canadian port in terms of total exchanged goods, was second in terms of loaded tonnage shipped internationally (?), and port infrastructure and activity have been expanding since. Industrial activities at Sept-Îles are largely focused on international shipping of iron ore mined in northern Québec and Labrador and the production of aluminum, and there are many fisheries operating in Baie des Sept Îles (mainly snow crab, northern shrimp, halibut and whelk) (?). Sept-Îles ecosystems are considered sub-Arctic, with sea ice formation in November/December and an important freshwater run-off due to snowmelt in April (?). To our knowledge, no studies have focused on benthic communities in this area. Thus, study of the marine ecosystems at Sept-Îles and neighbouring regions will increase the understanding of sub-Arctic benthic ecosystems under anthropogenic influence and enhance local environmental assessments.

The objectives of this study are to (i) describe coastal habitats and macrobenthic communities at Sept-Îles, in order to provide the first benthic ecological survey of the area; (ii) evaluate the links between communities and abiotic variables (including heavy metals); (iii) detect the presence of similar benthic assemblages, along with their

relationships with habitats; (iv) evaluate how macrofaunal size range will influence community descriptions and relationships with habitat parameters. We expect that human activities in the region will influence the benthic community structure.

Materials and methods

Study area

We targeted ecosystems in the Côte-Nord region of Québec, within four adjacent sectors distributed along a 200 km coastline: Baie des Sept Îles, the coast of Port-Cartier and the entrances of the Pentecôte and Manitou rivers (Figure 5a). This area hosts several human activities, in particular an industrial harbour and related industrial operations at Sept-Îles, at the Pointe-Noire terminal (on the southern section of Baie des Sept Îles) and the eastern side of Port-Cartier. Coastal ecosystems at the entrances of the Pentecôte and Manitou rivers are subjected to limited human influences. A village is located at Pointe-des-Anglais (south of the Pentecôte River), with a summer peak of use, particularly by tourists, and a decommissioned harbour. The Manitou River is relatively pristine, without hydroelectric plants or major human settlements.

Baie des Sept Îles is characterized by sandy beaches and tidal marshes, with a mean depth of 35 m before the entrance of the archipelago (Dutil et al., 2012). It is influenced by freshwater inputs from multiple streams and strong tidal currents resulting in a mixed water column and an estuarine circulation (?). The other sectors present a mix of rocky and sandy coasts, with a steep bathymetry to as deep as 200 m.

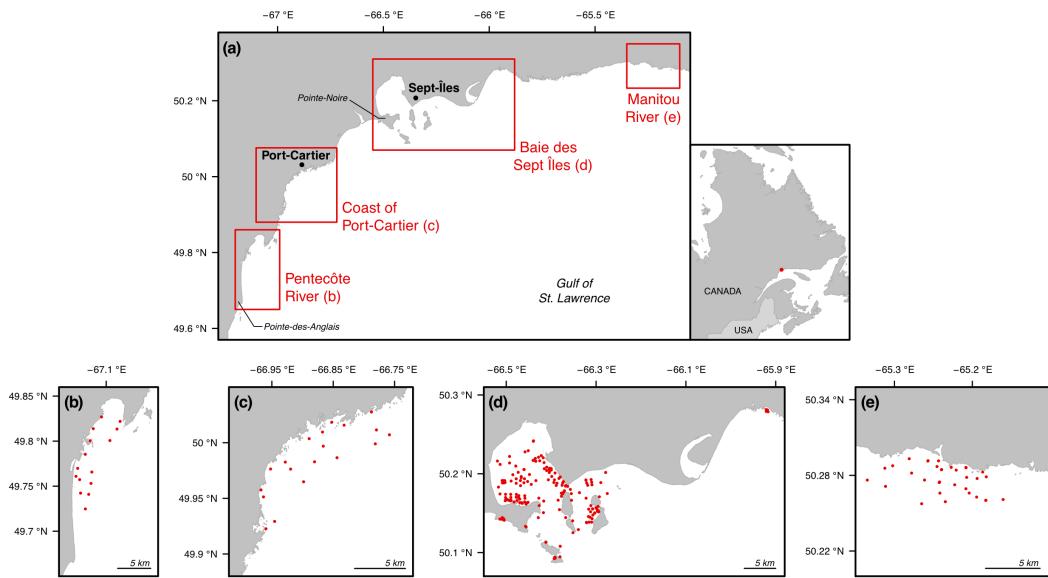


Figure 5 – Maps of the study area. (a) Location of the considered sectors. (b) Stations sampled in the Pentecôte River sector. (c) Stations sampled in the coast of Port-Cartier sector. (d) Stations sampled in Baie des Sept îles sector. (e) Stations sampled in the Manitou River sector.

Sample collection

We sampled coastal benthic ecosystems during three field campaigns: September 2014, June-July 2016 and July 2017. Sampling stations were positioned in each sector using a randomization algorithm, constrained between 0 m and 80 m deep. A total of 242 stations were sampled during these campaigns, with 175 in Baie des Sept îles (Figure 5b), 19 in coast of Port-Cartier (Figure 5c), 15 at Pentecôte River (Figure 5d) and 33 at Manitou River (Figure 5e).

Benthic samples were collected using a Ponar grab (0.05 m^2) deployed from a boat with two independent casts. Station depth was obtained from the navigation sonar, then corrected with respect to tide height at time of sampling. The first cast collected three samples for the analyses of organic matter content, sediment grain-size and heavy metal concentrations (habitat parameters). These samples were stored at -20°C until

processing in the laboratory. All the sediment obtained with the second cast was conserved for benthic macrofauna identification.

Two sieve mesh sizes were considered for macrofaunal samples to provide information on how the size range of the sampled individuals influences community descriptions and relationships with habitat parameters. Sediments were then sieved with either a 0.5 mm (2014 and 2017) or a 1 mm mesh size (2016 and 2017). This resulted in the inclusion of 166 stations for the 0.5 mm size class, located in Baie des Sept Îles and the Manitou River sectors, and 202 stations for the 1 mm size class, in all four sectors. Retained individuals were preserved in a solution of BORAX-buffered formalin (4 %).

Laboratory work

Habitat parameters

All samples collected during the three field campaigns were processed for organic matter and grain-size analyses. The percentage of total organic matter (*i.e.* sum of organic carbon and organic nitrogen) in the sediment was obtained by using the Loss-on-Ignition method (?). Grain-size analysis was done on a sieving column for the fraction with particles larger than 2 mm and with a Laser Diffraction Particle Size Analyser for the smaller fractions. Results from both techniques were combined to yield a unified distribution range from 0.04 μm to 26.5 mm. From this, percentages of gravel, sand, silt and clay were calculated as defined by ? and ?.

Heavy metals were analysed only for stations sampled in 2014 and 2016 in Baie des Sept Îles, due to practical and logistical constraints. Samples were processed at the analytical chemistry laboratory of Institut des Sciences de la Mer (Université du Québec à Rimouski, Rimouski), using Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry following a microwave mediated acid digestion of the sediment (?). We focused on metals for which toxicity criteria have been defined in the Biological Effects Database for Sediments by ?: arsenic, cadmium, chromium, copper, mercury, lead and zinc. We used this study to

detect the toxicity of the sediment on benthic species: five levels from Rare to Frequent Effects (corresponding to mild to high toxicity levels) have been defined by aggregating experimental and field studies on the tolerance of species to concentrations of heavy metals (?). Iron and manganese were also added to this analysis to account for possible contamination from local ore industries. To have a significant number of stations for the statistical analyses and increase our spatial coverage, heavy metal concentrations for sediments from stations sampled in 2017 in Baie des Sept Îles were calculated based on 2014 and 2016 values with Inverse Distance Weighting interpolation (?).

Biological samples

Samples for macrofauna identification were sorted using a stereomicroscope. Individuals were identified to the lowest taxonomic level possible with reference manuals and identification guides, and names were validated according to the World Register of Marine Species (?). Taxon density was recorded for each station by counting individuals collected per grab.

Statistical analysis

Statistical analyses were done using R v4.0 and PRIMER-e v6 with the PERMANOVA+ package (??). Habitat parameters were standardized by their mean and standard deviation prior to analysis and species densities were $\log(x + 1)$ transformed to avoid the highest values from dominating analyses. To address the fourth objective of this study, all following statistical analyses were done independently for communities of individuals retained by the 0.5 mm sieve (hereafter referred to as the 0.5 mm size class) and by the 1 mm sieve (the 1 mm size class) in order to compare their outcomes.

The Chao2 estimator was calculated to estimate the maximum expected number of taxa in the study area, and a rarefaction curve was computed to present how sampling effort was related to the observed biodiversity (??). Taxa richness and total density of individuals were calculated for each station, along with Shannon diversity (base

e logarithm), Pielou evenness and taxonomic distinctness indices in order to provide integrative information on community structure, the relative prevalence of constituent taxa and their taxonomic breadth (????).

To detect assemblages of similar taxa, we performed hierarchical agglomerative clustering based on Ward's method (?). The optimal number of clusters was determined using a K-means algorithm (?). Community variability within each cluster (*i.e.* a measure of β diversity) was assessed by calculating Bray-Curtis dissimilarity. Characteristic taxa, *i.e.* taxa that explained a significant proportion of within-cluster similarity, were identified using the similarity percentage routine (SIMPER, 9999 permutations) and the indicator value score (IndVal, 1000 randomization iterations) (Clarke, 1993; ?). We calculated average values of abiotic variables for stations grouped within each cluster to detect possible ecological patterns and spatial relationships.

We examined relationships between the benthic community (independent variables) and habitat parameters (predictors) using regression models. Because heavy metal concentrations were only analysed in Baie des Sept Îles, we considered two models with different predictors and spatial ranges: Model 1 with organic matter and grain-size classes (gravel, sand, silt, clay) at all sampled stations; and Model 2 with heavy metal concentrations (arsenic, cadmium, chromium, copper, iron, manganese, mercury, lead, zinc) at stations in Baie des Sept Îles. We studied potential links between community characteristics (taxa richness, total density of individuals, Shannon diversity, Pielou evenness) and both sets of predictors using multiple linear regressions. Variables were transformed (logarithm or square root) if the assumptions of normality and homoscedasticity were not respected, and multicollinearity was assessed by the Variance Inflation Factor (?). Outlier stations were determined using Cook's Distance and removed from analyses (?), while correlations between predictors was assessed by the Spearman rank coefficient: when two variables were strongly correlated ($|\rho| > 0.8$), one was removed from subsequent analyses although both were considered in interpretations (?). Significant predictors were identified with a best fit model procedure with package MASS (step-

wise, with forward and backward selection of predictors), using the Akaike Information Criterion as the decision metric (??). Finally, we explored relationships between taxa assemblages and both sets of predictors through non-parametric multivariate regression with distance-based linear modelling (DistLM, 9999 permutations) (?). Outputs of the clustering were combined with the DistLM results in a distance-based redundancy analysis (dbRDA), a constrained ordination method, to further identify relationships between clusters and habitat parameters (?).

Results and discussion

Description of the ecosystems

Sediment parameters

Maps with the parameters values for each sampled station are presented in Figures S1 and S2.

Organic matter concentration in the sediment ranged between 0.17 % and 3.87 %, except for two stations reaching 4.41 % and 8.26 %, and most sampled stations presented values inferior to 2 %. The highest organic matter values were observed in Baie des Sept Îles, directly in front of the city of Sept-Îles and the industrial facilities of Pointe-Noire, and in the western section of the bay close to *Zostera marina* meadows.

Overall, sediment was mainly composed of a high sand content (average and standard error of 52.7 % and 2.3 %, respectively) mixed with silt (27.3 % and 1.8 %). Gravel content was very low at all stations (3.5 % and 0.7 %), as was clay content (16.5 % and 2.2 %) except for thirty-five shallow stations in the Baie des Sept Îles where a dominance by clay was evident (more than 80 %).

Most of the heavy metal concentrations for stations in Baie des Sept Îles were below the lowest toxicity criterion (Rare Effect Level) established by ? and none reached levels corresponding to the highest toxicity criteria (Probable or Frequent Effect Levels).

Arsenic, chromium, copper, mercury and zinc concentrations reached low to moderate toxicity levels at 40, 167, 84, 8 and 49 stations out of 175, respectively. Interestingly, nearly all sampled stations present a moderate toxicity to chromium, but ? suggested that higher concentrations could be related to the presence of post-glacial clays as a source of heavy metals, thus contributing to the natural background sediment concentration of these metals. Heavy metal concentrations reported in our study area are lower than surrounding basal concentrations in the Gulf of St. Lawrence (?), except for certain sites within Baie des Sept Îles. A possible explanation may be a dilution effect due to tidal and hydrographic currents, but a circulation model is needed to confirm this hypothesis (?). The highest values for arsenic, chromium, copper, iron, manganese, lead and zinc (corresponding to moderate toxicity levels according to the classification), are located in shallow areas close to Sept-Îles industrial harbours and the Pointe-Noire sector, which may be a possible source of metal enrichment in the sediment as ore transformation industries operate in the area.

Benthic community

The complete list of sampled taxa can be found in Table 5. A total of 289 taxa were identified, with individuals from fourteen phyla where annelids, arthropods and mollusks were dominant (Table 5). We compared this dataset with available inventories of benthic invertebrates, and we obtained a 70 % match with the Ocean Biodiversity Information System (OBIS) online database (?) and a 96 % match with the dedicated catalogue of the Gulf of St. Lawrence from ?. Most observed taxa were new mentions for the Sept-Îles region. Ten taxa were not documented in the reference datasets of ? and ?: *Bathyporeia quoddyensis*, *Cyclaspis varians*, *Glycera alba*, *Microphthalmus sczelkowii*, *Kirkegaardia* sp., *Mya pseudoarenaria*, *Pholoe minuta tecta*, *Phylo ornatus*, *Thyasira gouldi*, *Tricellaria arctica*; though *C. varians*, *M. sczelkowii*, *M. pseudoarenaria*, *P. ornatus* and *T. gouldi* are registered as being present in the region by the World Register of Marine Species (?). Specific diversity studies for coastal and shallow waters in the Gulf of St. Lawrence

are scarce, in particular for the Sept-Îles region. Because historical surveys have mainly focused on commercially important species, birds or cetaceans, further taxonomical groundwork is needed before robust interpretations of these distributions can be made. Our study does not report the presence of known exotic species in the area (?), however sampling campaigns considering other macrofaunal components, such as rocky substrate communities or fouling invertebrates, would be a valuable addition to complement this portrait.

Comparisons of biodiversity inventories obtained for each size class found 137 taxa in common, while 114 were found only in the 0.5 mm size class (for a total of 251 taxa) and 38 only in the 1 mm size class (total of 175 taxa). This difference highlights the advantage of using smaller mesh sizes to survey macrofaunal diversity, as small individuals, larvae and some juvenile stages cannot be properly sampled with larger sieves and will result in a smaller biodiversity inventory (?). When we estimated the total taxa richness with the Chao2 index, we sampled 63 % of the estimated taxa pool ($\text{Chao2} = 397$) for the 0.5 mm size class and 75 % ($\text{Chao2} = 232$) for the 1 mm size class. Thus, the sampling campaigns were not able to survey the entire biodiversity of the region, where between 58 and 119 taxa may theoretically still be discovered or reported. The rarefaction curve for each size class did not reach an asymptote, further reinforcing the need to increase sampling effort to accurately describe the regional benthic biodiversity (Figure 6).

The highest values of taxa richness and total density were found in the Baie des Sept Îles sector, in particular in front of the city of Sept-Îles and in the southern section of the bay close to Pointe-Noire (Figure S3). Densities as high as 2000 individuals per grab were found at these stations for the 0.5 mm size class, consisting of mostly the polychaete *Micronephthys neotena*. There was a decrease in Shannon diversity, Pielou evenness and taxonomic distinctness relative to other stations for both size classes. These patterns may indicate that these communities experience local structuring factors, such as ecosystem perturbation (?), which is further reinforced by the differences in habitat parameters reported in the previous section.

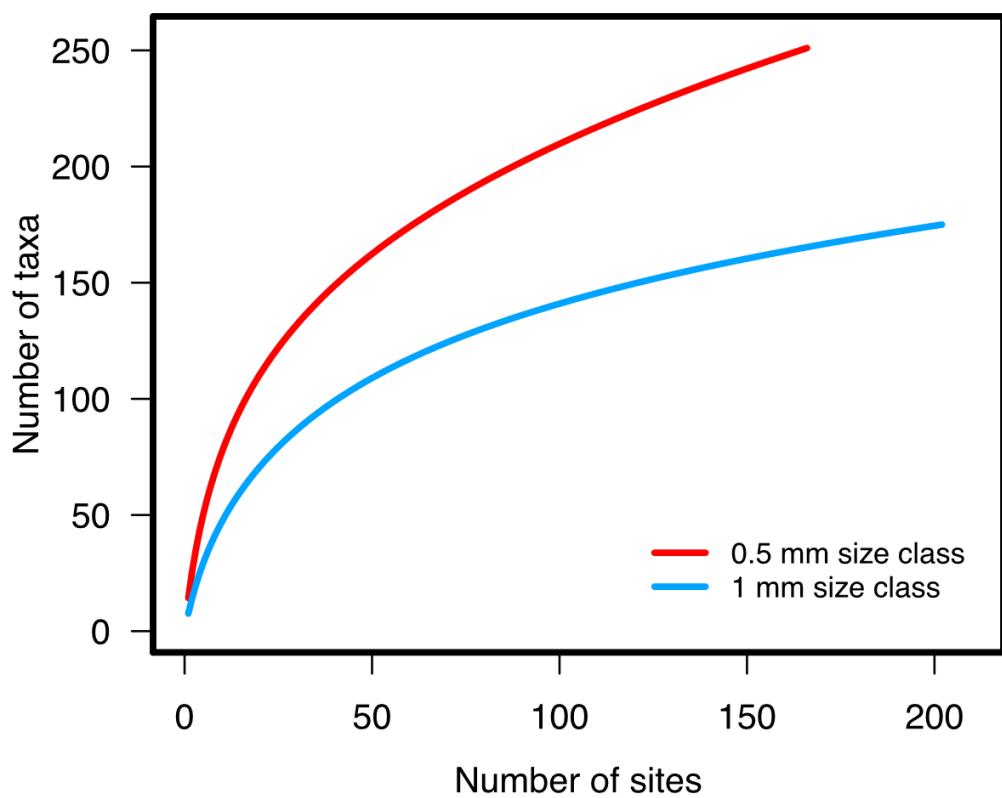


Figure 6 – Rarefaction curves for taxa assemblages of the 0.5 mm and the 1 mm size classes.

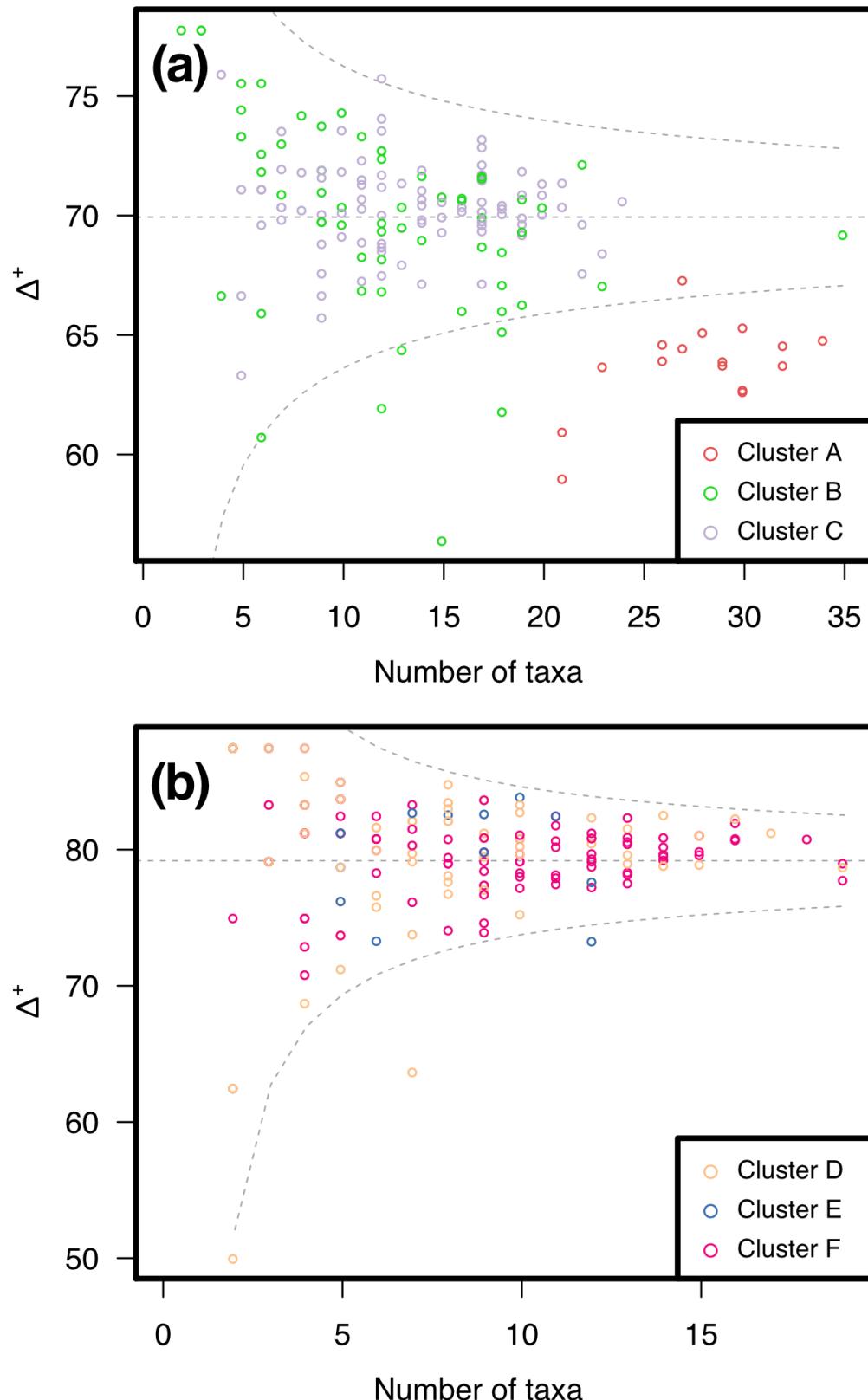


Figure 7 – Scatterplot of the taxonomic distinctness (Δ^+) as a number of taxa sampled at a station. The dashed grey line corresponds to the expected value of Δ^+ and the dashed grey curves are the upper and lower limits of the standard deviation interval calculated with the value of Δ^+ at each station. Point colour represent similarity groups defined by Ward hierarchical clustering. Cluster sizes: (a) $n = 100$, (b) $n = 65$.

A comparison between mean values of community characteristics obtained for each size class is presented in Table 1. The major differences were observed for taxa richness (nearly twice as high for the 0.5 mm size class) and for total density (nearly six times higher). As expected, more individuals were retained by the 0.5 mm sieving mesh. Average Shannon index is slightly higher for the 0.5 mm size class, while average Pielou evenness is around 0.7 for both classes. Concerning taxonomic distinctness, the majority of stations of both size classes were within the confidence interval around the expected average (calculated by the standard deviation of the index in relation to taxa richness), except for some 0.5 mm size class stations which were characterized by a low taxonomic distinctness relative to the rest of the sampled stations (Figure 7).

Table 1 – Mean values (and standard error) of community characteristics calculated with stations included in the 0.5 mm and the 1 mm size classes.

Variable	Unit	0.5 mm size class	1 mm size class
<i>Taxa richness</i>	taxa	14.27 (0.53)	7.58 (0.31)
<i>Density of individuals</i>	ind.grab ⁻¹	225.91 (32.94)	39.62 (4.3)
<i>Shannon diversity</i>	NA	1.79 (0.04)	1.42 (0.05)
<i>Pielou evenness</i>	NA	0.71 (0.01)	0.75 (0.02)
<i>Taxonomic distinctness</i>	NA	69.14 (0.5)	76.49 (1.22)

Relationships between community characteristics and habitat parameters are described in Table 2. For both size classes, predictive power of the regressions varied between 0.02 and 0.5 and models considering organic matter and grain-size classes as predictors presented higher R^2_{adj} than did those considering heavy metal concentrations. Depth had a positive influence on nearly all community characteristics except total density, which is coherent with general patterns of coastal marine biodiversity (???). Three groups of variables were strongly correlated: organic matter/silt, chromium/iron/manganese and copper/lead/zinc (thus considered together in interpretations).

For the 0.5 mm size class, most the predictors selected by the best fit model procedure for Models 1 and 2 had a positive influence on community characteristics, except for arsenic, cadmium and mercury in Model 2 where coefficients were negative (Table 2). Regressions for the 1 mm size class resulted in fewer predictors selected, with a positive influence of copper/lead/zinc in Model 2 and a negative influence of sand, clay in Model 1 and cadmium in Model 2 (Table 2). When comparing outcomes of Model 1 for each size class, gravel, sand and clay contents had opposite effects. For Model 2, few heavy metals influenced the 1 mm size class compared to the 0.5 mm size class, where only taxa richness and Shannon diversity were significantly related to predictors (with a very low predictive power). These results may indicate an increased influence of metals on smaller organisms, with an increased vulnerability except for copper/lead/zinc where the influence was positive. Concentration of the latter metals in surface sediments may be closely correlated to sediment texture (?), suggesting that this positive influence may also arise from a sediment composition favorable to both copper/lead/zinc concentrations and benthic communities. ? reported significant relationships between heavy metal loading and traits such as body size, but further research is needed to understand responses of different macrofaunal components. Concerning the whole benthic community, the DistLM procedures selected all available predictors in Models 1 and 2 for the 0.5 mm size class, with $R^2 = 0.27$ and 0.18 , respectively, while for the 1 mm size class depth, organic matter/silt, sand, clay were selected in Model 1 ($R^2 = 0.14$) and cadmium, chromium/iron/manganese, copper/lead/zinc in Model 2 ($R^2 = 0.07$).

Regressions for the 1 mm size class had less predictive power than did those for the 0.5 mm size class. Organism size may affect these regressions, as sieve size employed has been shown to influence the calculation of community characteristics (see previous sections and *e.g.* ??). Another possible influence could be the sampling strategy, as the 0.5 mm size class considered stations in two sectors while stations sampled for the 1 mm size class were located in four sectors. These results offer valuable insights for the understanding of benthic ecosystems, especially in order to predict their evolution

when considering forcing factors, such as climate change or anthropogenic development, on habitat parameters. Furthermore, comparison of models for the 0.5 mm and 1 mm size classes allow to show how sampling strategies (*e.g.* sieving mesh size, spatial range considered) influence community descriptions, which provides methodological recommendations for future environmental assessments in this region.

Table 2 – Predictor coefficients (and standard error) from the multiple linear regression models of community characteristics obtained for the 0.5 mm and the 1 mm size classes. Model 1 corresponds to organic matter and grain size classes as predictors for stations in every sector, and Model 2 corresponds to heavy metal concentrations as predictors for stations in Baie des Sept Îles. OM = organic matter, As = arsenic, Cd = cadmium, Cr = chromium, Cu = copper, Fe = iron, Mn = manganese, Hg = mercury, Pb = lead, Zn = zinc, n = number of stations considered, "—" = predictors excluded by the best fit model selection. Significant p-values of marginal tests on predictors are highlighted in bold.

	Model 1				
	Intercept	Depth	OM/silt	Gravel	Sand
0.5 mm size class (n = 159)					
<i>Specific richness</i>	0.02 (0.06)	0.24 (0.07)	0.29 (0.08)	0.2 (0.09)	0.25 (0.1)
<i>p-value</i> =	0.7095	0.0011	0.0005	0.0267	0.030
<i>Density of individuals</i>	0.02 (0.06)	- 0.09 (0.07)	0.54 (0.07)	0.12 (0.08)	0.52 (0.1)
<i>p-value</i> =	0.7992	0.1524	<0.0001	0.137	<0.00
<i>Shannon diversity</i>	0.06 (0.06)	0.54 (0.07)	—	0.16 (0.09)	—
<i>p-value</i> =	0.3786	<0.0001		0.0671	
<i>Pielou evenness</i>	0.05 (0.07)	0.31 (0.08)	- 0.14 (0.08)	-	- 0.2 (0.
<i>p-value</i> =	0.4181	<0.0001	0.0713		0.082
1 mm size class (n = 195)					
<i>Specific richness</i>	- 0.03 (0.06)	0.27 (0.07)	-	-	- 0.39 (0
<i>p-value</i> =	0.5874	<0.0001			<0.00
<i>Density of individuals</i>	- 0.02 (0.07)	- 0.17 (0.08)	-	-	- 0.2 (0.
<i>p-value</i> =	0.7931	0.0234			0.027
<i>Shannon diversity</i>	- 0.03 (0.06)	0.43 (0.06)	-	- 0.12 (0.08)	- 0.31 (0
<i>p-value</i> =	0.6265	<0.0001		0.1292	<0.00
<i>Pielou evenness</i>	0.02 (0.07)	0.31 (0.07)	-	-	-
<i>p-value</i> =	0.8276	<0.0001			
	Model 2				
	Intercept	As	Cd	Cr/Fr/Mn	Hg
0.5 mm size class (n = 142)					
<i>Specific richness</i>	- 0.06 (0.08)	- 0.41 (0.13)	- 0.69 (0.15)	-	- 0.46 (0

Similarity between taxa assemblages

0.5 mm size class

Hierarchical Agglomerative Clustering for the 0.5 mm size class identified three clusters of similar stations (Figure 8a). Mean Bray-Curtis dissimilarity was 0.38, 0.85 and 0.69 for clusters A, B and C, respectively, indicating a higher variability for communities of stations within clusters B and C compared to cluster A (Table 3). Mean within-cluster taxonomic distinctness varies between cluster A (63.8 %) and clusters B and C (69.9 % and 70.4 %, respectively). As shown on Figure 7a, stations from cluster A were well discriminated from those of clusters B and C, because of a lower taxonomic distinctness outside the confidence interval.

Table 3 – Bray-Curtis dissimilarity of the clusters obtained for the 0.5 mm and the 1 mm size classes. The diagonal of the triangular matrix corresponds to within-cluster dissimilarity, and other cells are across-cluster dissimilarity.

0.5 mm size class			
	A	B	C
A	37.68		
B	92.53	84.85	
C	90.37	91.67	69.35

1 mm size class			
	D	E	F
D	92.57		
E	92.16	69.15	
F	94.82	97.87	75.43

Stations of cluster A were located exclusively in Baie des Sept Îles, in front of the city of Sept-Îles and the industrial operations of Pointe-Noire (Figure 8a). The benthic

community of stations in cluster A was dominated by annelids, representing 89.5 % of the sampled individuals, with some phoronids (5 %). *Micronephthys neotena*, *Nephtys* sp., *Prionospio steenstrupi*, *Scoloplos armiger* and *Phoronida* accounted for 51 % of the total contribution to cluster similarity, while 50 taxa were selected by the IndVal index as characteristic of the community based on their contribution to the cluster similarity. These stations were shallow, at 4 m deep on average, with a high organic matter content and a sediment mostly composed of clay, and average heavy metal concentrations were the highest observed in our sampling (Table 4). Several characteristic taxa can be linked to human perturbation: *M. neotena* has been found in high density at decommissioned dump sites within Baie-des-Chaleurs (Eastern Canada), suggesting an opportunistic behavior toward perturbation (??), while *S. armiger* and *P. steenstrupi* are ranked ‘tolerant to disturbance’ and ‘second-order opportunistic’, respectively, in the organic matter enrichment classification of ?.

Cluster B regrouped some stations in Baie des Sept Îles (close to the coast and in the archipelago) and nearly all of those at Manitou River (Figure 8a). Taxa assemblage was characterized by a combination of arthropods (32.7 % of the sampled individuals), annelids (22.3 %) and mollusks (20.9 %), with a presence of nematodes (14.6 %) and echinoderms (8 %). 67 % of the total contribution to community similarity is explained by *Echinarachnius parma*, *Nematoda*, *Phoxocephalus holbotti*, *Harpacticoida* and *Spisula solidissima*, with 12 significant taxa for this cluster according to IndVal scores. Mean station depth was 14 m, with low organic matter, a high content of sand and clay; stations of this cluster located in Baie des Sept Îles had low concentrations of heavy metal in the sediment (Table 4). This cluster regroups taxa that are sensitive to perturbation, such as *P. holbotti* and *S. solidissima*, both of which have been classified as being ‘very sensitive to disturbance’ (?). Furthermore, ? described physiological impacts of heavy metal loading for *S. solidissima*, especially for increased copper concentrations.

For cluster C, stations were widely distributed in Baie des Sept Îles (except for one station at Manitou River) (Figure 8a). Arthropods (42.3 %) and annelids (37.8 %) were

the main phyla of this cluster, with a further large proportion (14.2 %) represented by mollusks. Fifteen taxa were selected by the IndVal scores, with characteristic taxa being *M. neotena*, *Macoma calcarea*, *Eudorellopsis integra*, *Protomedieia grandimana* and *Leucon* (*Leucon*) *nasicoides* (64 % of the total similarity). Station depth was high, 33 m deep on average, and the sediment had a sandy-silty profile with moderate concentrations of organic matter and heavy metal compared to the other clusters (Table 4). Here, taxa do not present a particular relationship to perturbation, with many representative taxa being ‘indifferent to disturbance’, including *M. calcarea*, *P. grandimana* and *L.* (*Leucon*) *nasicoides*, with the exception of *M. neotena* as described above (?).

Table 4 – Mean values (and standard error) of habitat parameters calculated with stations belonging in the groups defined by the Hierarchical Agglomerative Clustering for the 0.5 mm and the 1 mm size classes. Only Baie des Sept Îles stations (when available in the cluster) were considered for the calculation of heavy metal concentration averages. n = number of stations considered for the calculation of each average.

Variable	Unit	0.5 mm size class			1 m size class	
		Cluster A	Cluster B	Cluster C	Cluster D	Cluster E
All four sectors		(n = 16)	(n = 61)	(n = 89)	(n = 83)	(n = 10)
<i>Depth</i>	m	6.99 (0.35)	13.72 (1.64)	32.76 (2.02)	21.5 (1.88)	16.5 (1.5)
<i>Organic matter</i>	%	2.58 (0.42)	0.52 (0.04)	1.76 (0.1)	0.72 (0.08)	0.7 (0.05)
<i>Gravel</i>	%	0 (0)	5.9 (1.8)	1.7 (1)	6.8 (1.6)	2.5 (0.5)
<i>Sand</i>	%	0 (0)	53.3 (5.3)	46.3 (2.3)	63.8 (3.7)	92.5 (2.5)
<i>Silt</i>	%	0.1 (0)	11.3 (2.4)	49.1 (2.2)	25 (3)	4.5 (1.5)
<i>Clay</i>	%	99.9 (0)	29.5 (5.6)	3 (1.6)	4.4 (1.2)	0 (0)
Baie des Sept Îles only		(n = 16)	(n = 47)	(n = 88)	(n = 42)	(n = 10)
<i>Arsenic</i>	mg.kg ⁻¹	3.74 (0.32)	2.51 (0.19)	3.89 (0.24)	3.56 (0.55)	1.1 (0.1)
<i>Cadmium</i>	mg.kg ⁻¹	0.15 (0.01)	0.11 (0.01)	0.14 (0.01)	0.13 (0.01)	0.05 (0.01)
<i>Chromium</i>	mg.kg ⁻¹	80.29 (5.34)	54.5 (3.68)	58.07 (1.71)	51.77 (3.5)	33.5 (3.5)
<i>Copper</i>	mg.kg ⁻¹	19.89 (1.33)	6.86 (0.73)	12.33 (0.51)	9.3 (1.05)	6.5 (0.5)
<i>Iron</i>	g.kg ⁻¹	64.73 (3.73)	57.56 (4.42)	55.27 (1.68)	49.2 (2.47)	33.5 (3.5)
<i>Manganese</i>	g.kg ⁻¹	2.17 (0.32)	0.93 (0.06)	1.18 (0.06)	0.86 (0.06)	0.3 (0.05)
<i>Mercury</i>	mg.kg ⁻¹	0.04 (0.02)	0.01 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.01 (0.01)
<i>Lead</i>	mg.kg ⁻¹	7.32 (0.58)	3.26 (0.27)	5.46 (0.2)	4.65 (0.4)	2.5 (0.5)
<i>Zinc</i>	mg.kg ⁻¹	77.21 (4.22)	43.54 (2.25)	61.09 (1.77)	54.28 (4.09)	33.5 (3.5)

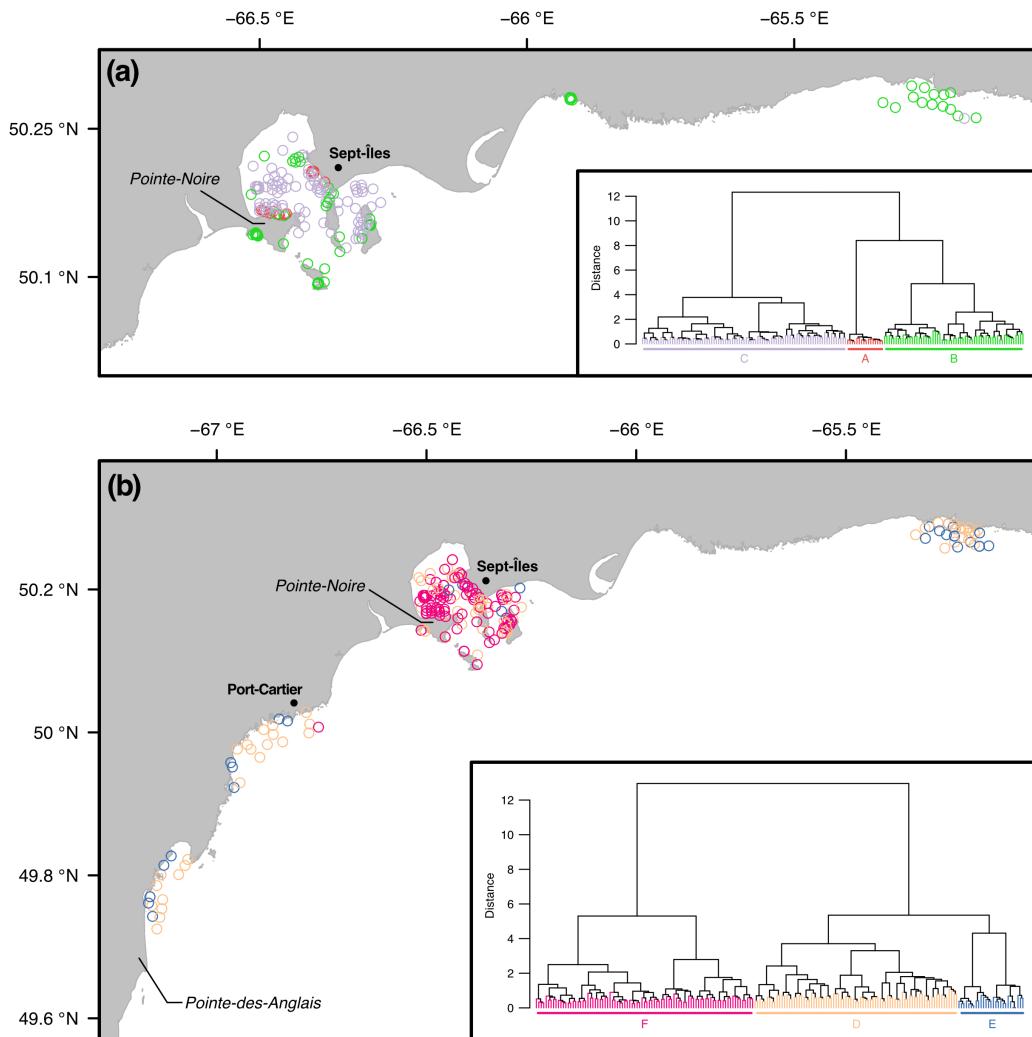


Figure 8 – Hierarchical Agglomerative Clustering of taxa assemblages. The dendrogram presents relationships between stations, displayed on the map with one colour for each group. (a) Clusters for the 0.5 mm size class. (b) Clusters for the 1 mm size class.

Comparison of characteristic taxa in clusters shows cluster A to be quite different from the other clusters. This difference is visible on the two dbRDAs, where there is an evident discrimination of cluster A's assemblages relative to those of clusters B and C, mainly explained by depth and clay for Model 1 and chromium/iron/manganese concentrations for Model 2 (Figure 9a-b). Bray-Curtis dissimilarities indicate a higher

similarity within this cluster, which may be explained by uniformization due to some perturbation (?Séguin et al., 2014). Furthermore, cluster A's stations are close to human activities, a possible source for higher contents of organic matter, heavy metal and clay contents relative to other stations in Baie des Sept Îles. As suggested by ?, those specific sites may present an ecosystem disturbance due to an increased organic matter. Local hydrodynamics are likely one of the main factors influencing sediment composition (?). We may also postulate that dredging activities, where a dumping site is operated close to cluster A's stations, may impact on the composition of benthic sediments by favoring the accumulation of fine particles (?). Contaminants in sediments, such as heavy metals, are known to impact marine species at the individual level, for example by affecting their metabolism and their reproductive success, which extends their impacts to the distribution of community traits (???). The link between higher contaminant concentrations and human perturbation is well established (*e.g.* ??). However, the presence of post-glacial clay can temper perceived effects of heavy metal inputs from anthropogenic sources on benthic communities (?), even though specific sites close to harbour installations seem to present overall higher concentrations than those in the rest of Baie des Sept Îles.

These results strongly suggest that cluster A regroups stations with a higher perturbation status than those of cluster B, while cluster C possesses an intermediate profile, with a possible relationship with organic matter content and heavy metal concentrations. Consequently, this size class allowed to detect a certain perturbation signal on benthic communities, located in specific areas.

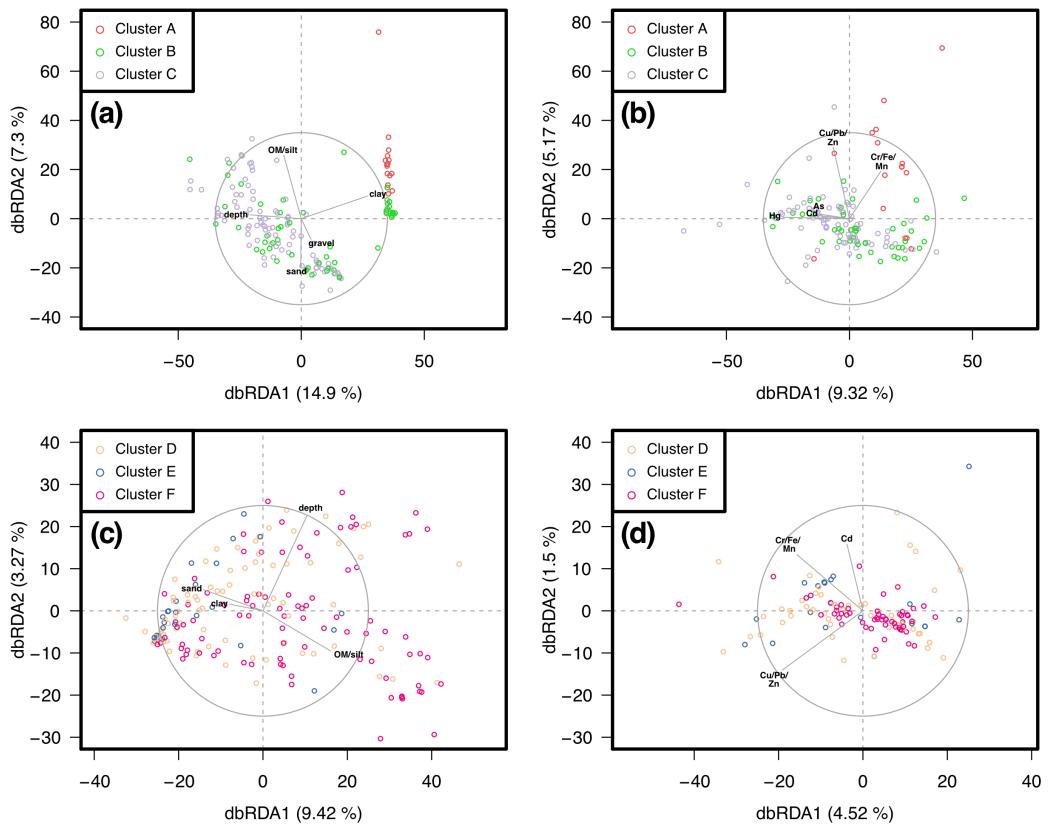


Figure 9 – Constrained ordination with a distance-based Redundancy Analysis for taxa assemblages obtained for the 0.5 mm and 1 mm size classes. Only predictors selected by the distance-based linear modelling (DistLM) are displayed. Point colour represents similarity groups defined by the Hierarchical Agglomerative Clustering. OM = organic matter, As = arsenic, Cd = cadmium, Cr = chromium, Cu = copper, Fe = iron, Mn = manganese, Hg = mercury, Pb = lead, Zn = zinc. (a) Ordination for the 0.5 mm size class with organic matter and grain-size classes as predictors (Model 1). (b) Ordination for the 0.5 mm size class with heavy metal concentrations as predictors (Model 2). (c) Ordination for the 1 mm size class with organic matter and grain-size classes as predictors (Model 1). (d) Ordination for the 1 mm size class with heavy metal concentrations as predictors (Model 2).

1 mm size class

Three groups of stations were also identified by Hierarchical Agglomerative Clustering for the 1 mm size class (Figure 8b). Mean Bray-Curtis dissimilarity was highest for cluster D (0.93), intermediate for cluster F (0.81) and lowest for cluster E (0.78) (Table

3). No particular relationship could be identified based on mean taxonomic distinctness, even though the average for cluster E's (71.1 %) was slightly less than those for clusters D and F (77.6 % and 79.7 %, respectively) (Figure 7b).

Cluster D regrouped stations from all four sampled sectors, in particular most of the stations on the coast of Port-Cartier and the Pentecôte and Manitou rivers were included here (71 %, 67 % and 58 % of the stations, respectively) (Figure 8b). Arthropods (39.4 % of the sampled individuals), mollusks (20.2 %), annelids (18.2 %) and echinoderms (17 %) were the phyla dominating the community. Characteristic taxa were *Cistenides granulata*, *E. parma*, *P. holbolli*, *Nephtys caeca* and *Strongylocentrotus* sp. (62 % of the total similarity), and 13 taxa had significant IndVal scores. Stations were quite shallow (21.5 m deep) on average, with a low organic matter content and a sediment composed of sand with some silt. (Table 4). Interestingly, while many taxa are classified as 'indifferent to disturbance', this is not the case for *P. holbolli* and *Strongylocentrotus* sp. which are 'very sensitive', indicating mixed responses of taxa in this cluster's taxa (?).

Concerning cluster E, nearly all stations were located outside of Baie des Sept Îles (Figure 8b). Its assemblage was dominated by echinoderms (48 %) and mollusks (40.6 %), with *E. parma* and *Mesodesma arctatum* accounting for 93 % of the total similarity and were 2 of the 3 taxa selected by the IndVal calculation. Compared to the other clusters, stations were shallower (mean depth of 16.1 m), had less organic matter and the sediment was mostly sandy (Table 4). Three stations in Baie des Sept Îles had low heavy metal concentrations, but these values are not informative compared to the other clusters because of the very low number of stations available to calculate averages. *E. parma* and *M. arctatum* are not referenced in the classification of Borja et al., but many echinoids and some species of the genus *Mesodesma* are known to be 'very sensitive to disturbance' (?), which is an evidence this cluster may be an evidence of a low perturbation profile.

Finally, cluster F regrouped only stations in Baie des Sept Îles (Figure 8b). 41.2 % of the sampled individuals were arthropods, 35.5 % annelids, 21.4 % mollusks, and 26 taxa were selected by their IndVal scores. Characteristic taxa were *M. calcarea*, *E. integra*, *Ennucula tenuis*, *M. neotena* and *Protomederia grandimana* (66 % of the total similarity). Stations were at 32.5 m deep on average, with an equal proportion of sand and silt, a high organic matter content and high overall heavy metal concentrations (Table 4). This cluster is very similar to cluster C for the 0.5 mm size class, both in terms of habitat parameters values and characteristic taxa.

Stations of clusters D and F presented a wider dispersion on the dbRDAs than those of cluster E, where the latter were grouped and influenced by a high sand content and low organic matter/silt for Model 1, and heavy metal concentrations for Model 2 (Figure 9c-d). Depth, organic matter/silt, sand, clay (Model 1) and all heavy metals except arsenic and mercury (Model 2) were selected to explain the structure of the 1 mm size class assemblages, even though R^2 values were quite low (0.14 and 0.07) (Figure 9c-d). Clusters D and E do not seem to be particularly perturbed, having a profile quite characteristic of other coastal ecosystems in the Gulf of St. Lawrence and presenting taxa that are sensitive to disturbance. On the other hand, cluster F seems to exhibit a somewhat different profile, where there is a higher sediment organic matter content. Apart from a possible human perturbation, another possible driver to explain the structure of the benthic communities is the sedimentary profile. Sediments in clusters D and E's stations are mainly sandy whereas those for cluster F are mostly sandy silty. The dominance of sand-dwelling species such as *M. arctatum* and *E. parma* in clusters D and E supports this hypothesis (?).

These results show that clusters obtained for the 1 mm size class seem to be more variable than those observed for the 0.5 mm size class, as shown by higher Bray-Curtis dissimilarity values for the former. By sampling only individuals larger than 1 mm only, the assessment of benthic ecosystems seems to be insufficient to differentiate ecosystem perturbation from natural variability (???). This is of even greater importance when

considering that the 0.5 mm size class can detect some ecosystem perturbation, as shown above. Further field campaigns, including factorial sampling with possibly impacted and reference areas, along with local experimental and manipulative work, would provide more robust conclusions on the 1 mm size class and link taxa responses to environmental perturbation.

Conclusions

Our work provides the first description of benthic habitats and communities in the sub-Arctic ecosystems of Sept-Îles, which is an important contribution to local and regional biodiversity surveys and a necessary step towards establishing baseline conditions for environmental assessments. Regression models between community characteristics (*e.g.* taxa richness or diversity), taxon densities and habitat parameters (*e.g.* organic matter, heavy metals) highlight how abiotic parameters may impact benthic communities, and provide predictive methods to assess the evolution of these communities in future environmental conditions. Finally, we detected taxa assemblages with similar distributions in the environment, which we related to the values of habitat parameters to highlight perturbation patterns.

By studying multiple size classes of macrofauna, we were able to compare how they will influence the description of benthic communities. When including smaller organisms (0.5 mm size class), conclusions were more robust and we were able to document local perturbation responses. The evaluation of only larger organisms (1 mm size class) was able to decrease the time needed to sample and identify taxa, but at the cost of reducing the strength of similarity analyses and of detecting relationships to habitat parameters variation and perturbation.

Our results provide valuable guidelines for the environmental monitoring of benthic ecosystems in industrial harbour areas, along with ecological data to better understand how sub-Arctic ecosystems react to environmental perturbation.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge and thank all the people that helped during the field campaigns, lab work and data analysis: Julie Carrière, Claudy Dechêne, Serge Gallienne, Dany Lévesque, Laure de Montety, Philippe-Olivier Dumais, Raphaël Bouchard, Jean-Luc Shaw, David Beauchesne, David Poissant and Sara Marullo. This study is a contribution to the research program of Québec-Océan, which also provided scientific and financial support.

Supplementary material

Table 5 – List of the taxa along with the number of stations where this taxon was present and the number of collected individuals, for the 0.5 mm and the 1 mm size classes.

Aphia ID	Phylum	Accepted name	0.5 mm size class		Presence	Density	Pre
			Presence	Density			
102866	Arthropoda	<i>Aceroides (Aceroides) latipes</i>	22	57			
136340	Arthropoda	<i>Akanthophoreus gracilis</i>	31	163			
878476	Mollusca	<i>Ameritella agilis</i>	16	39			
547000	Arthropoda	<i>Ameroculodes edwardsi</i>	8	10			
101908	Arthropoda	<i>Ampelisca macrocephala</i>	—	—			
158022	Arthropoda	<i>Ampelisca vadorum</i>	2	2			
101364	Arthropoda	Ampeliscidae spp.	—	—			
762338	Annelida	<i>Ampharete oculata</i>	—	—			
129155	Annelida	<i>Ampharete</i> sp.	1	2			
981	Annelida	Ampharetidae spp.	—	—			
111186	Bryozoa	<i>Amphiblestrum auritum</i>	1	1			
125064	Echinodermata	<i>Amphipholis squamata</i>	—	—			
1135	Arthropoda	Amphipoda	44	127			
123613	Echinodermata	<i>Amphiura</i> sp.	—	—			
102002	Arthropoda	<i>Ampithoe rubricata</i>	—	—			
882	Annelida	Annelida	13	89			
102513	Arthropoda	<i>Anonyx lilljeborgi</i>	9	16			
102516	Arthropoda	<i>Anonyx sarsi</i>	—	—			
1292	Cnidaria	Anthozoa	3	4			
101368	Arthropoda	Aoridae spp.	1	4			
157214	Annelida	<i>Arcteobia anticostiensis</i>	1	1			
333034	Annelida	<i>Aricidea acmira catherinae</i>	3	13			
129430	Annelida	<i>Aricidea</i> sp.	7	57			
531617	Mollusca	<i>Arrhoges occidentalis</i>	1	1			
137683	Mollusca	<i>Astarte</i> sp.	8	12			
156746	Mollusca	<i>Astarte subaequilatera</i>	—	—			
156747	Mollusca	<i>Astarte subaequilatera</i>	—	—			

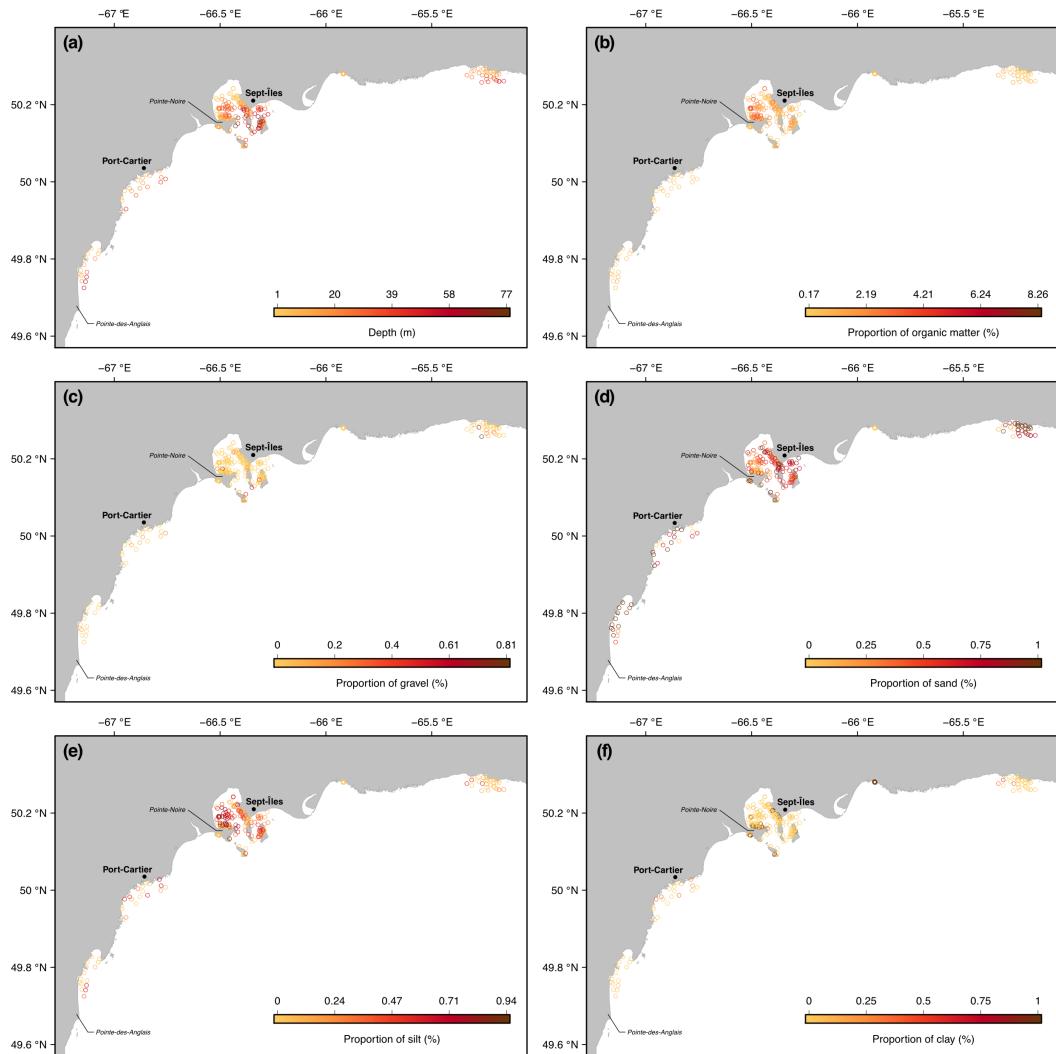


Figure 10 – Values of habitat parameters at each station. (a) Map for station depth. (b) Map for organic matter content. (c) Map for gravel content. (d) Map for sand content. (e) Map for silt content. (f) Map for clay content.

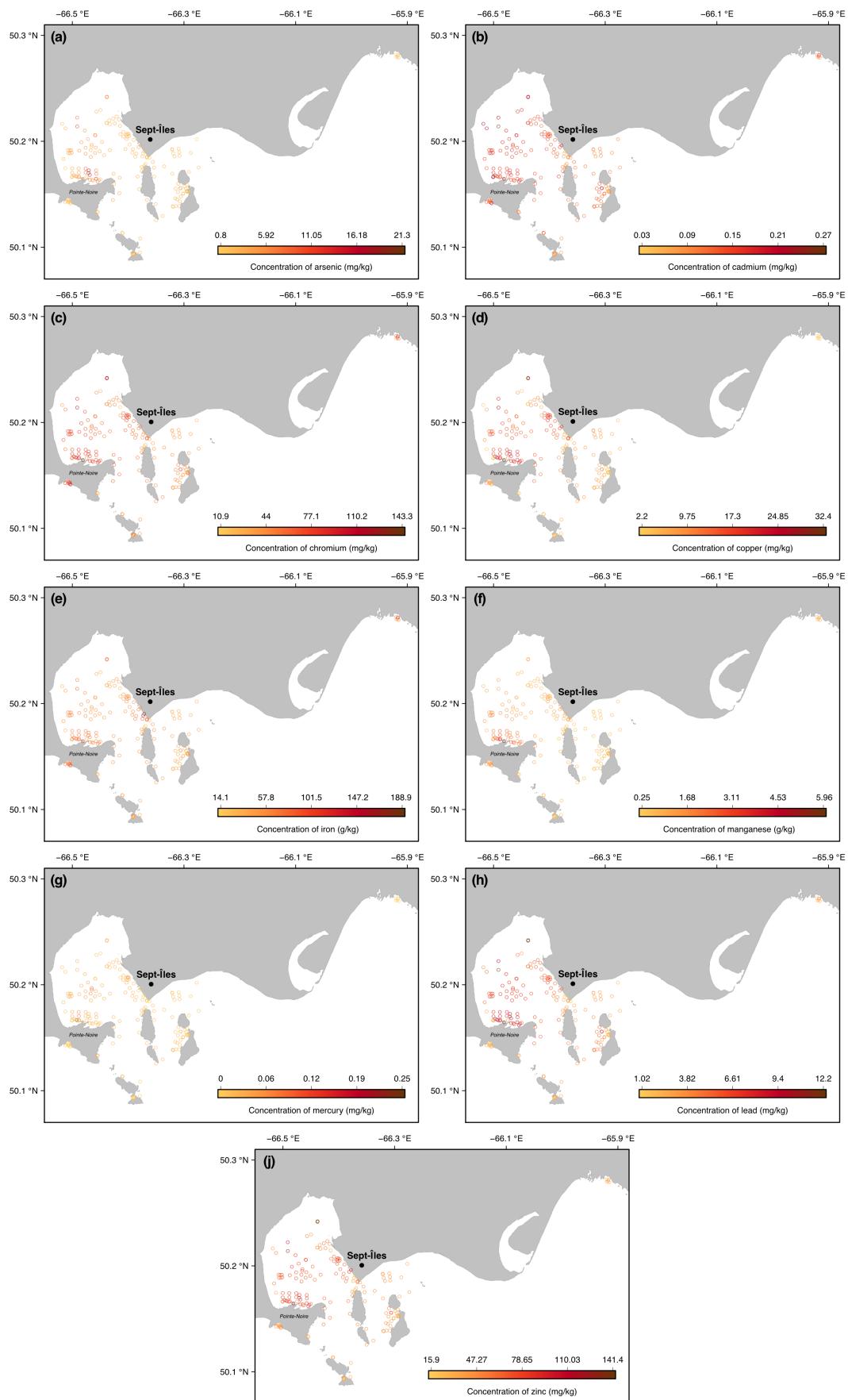


Figure 11 – Values of heavy metal concentrations at each station. (a) Map for arsenic concentration. (b) Map for cadmium concentration. (c) Map for chromium concentration.

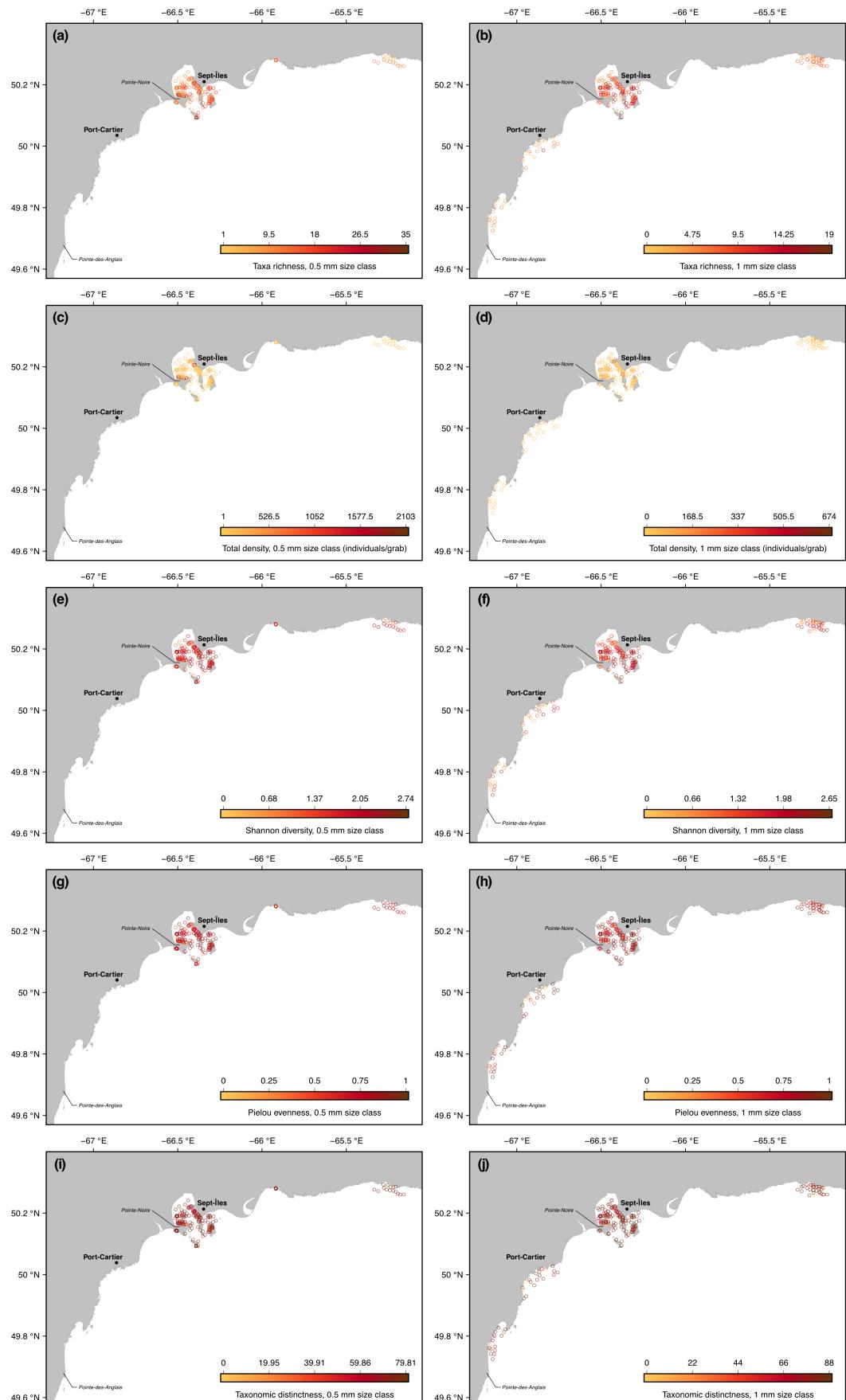


Figure 12 – Values of community characteristics at each station. (a) Map for taxa richness for the 0.5 mm size class. (b) Map for taxa richness for the 1 mm size class.

ARTICLE 2

DÉTERMINER LE STATUT ÉCOLOGIQUE DE COMMUNAUTÉS BENTHIQUES CÔTIÈRES : LE CAS D'UNE ZONE INDUSTRIELLE PORTUAIRE CANADIENNE

Résumé

Compte tenu de l'influence généralisée des activités humaines sur les écosystèmes marins, l'évaluation de l'état écologique fournit des informations précieuses pour les initiatives de conservation et le développement durable. Ainsi, de nombreux indicateurs environnementaux ont été développés dans le monde et il est nécessaire d'évaluer leur performance en calculant l'état écologique dans une variété d'écosystèmes et à de multiples échelles spatio-temporelles. Cette étude a calculé et comparé seize indicateurs de l'état écologique, classés dans trois catégories méthodologiques: mesures d'abondance, paramètres de diversité et espèces caractéristiques. Cette sélection a été appliquée aux écosystèmes benthiques côtiers de Sept-Îles (Québec, Canada), une zone industrielle portuaire majeure dans le golfe du Saint-Laurent, et mise en relation avec les paramètres de l'habitat (matière organique, fractions granulométriques et concentrations de métaux lourds). Presque tous les indicateurs ont mis en évidence un état écologique généralement bon dans la zone d'étude, où les communautés présentaient un profil non-perturbé, avec une diversité élevée de taxons et de fonctions écosystémiques, sans la dominance des taxons opportunistes. Plusieurs corrélations significatives avec les paramètres de l'habitat ont été détectées, en particulier avec les métaux lourds, et les analyses de rééchantillonnage ont détecté des résultats relativement solides. Cette étude fournit des renseignements précieux sur l'application d'indicateurs dans les écosystèmes côtiers canadiens, ainsi que sur leur utilisation à des fins d'évaluation environnementale.

L'article associé à ce chapitre, "*Determining the ecological status of benthic coastal communities: a case study in a Canadian industrial harbour area*", a été rédigé en collaboration avec Nicolas Desroy, Lisa Tréau de Coeli, Julie Carrière, Christopher W. McKindsey et Philippe Archambault. Il a été soumis dans la revue *Frontiers in Marine Science*, dans la section spéciale *Biodiversity and Distribution of Benthic Invertebrates - From Taxonomy to Ecological Patterns and Global Processes*, le XXX. J'ai établi les objectifs de ce chapitre avec Nicolas Desroy, Christopher W. McKindsey et Philippe Archambault. Je me suis basé sur les données obtenues lors de la campagne d'échantillonnage en 2017 effectuée pour le premier chapitre, en collaboration avec Julie Carrière, auxquelles j'ai ajouté des données sur les traits biologiques collectées depuis différentes bases de données en ligne, validées par Lisa Tréau de Coeli. J'ai calculé les indicateurs environnementaux au cours d'un stage à la station biologique de Dinard avec Nicolas Desroy, et j'ai ensuite effectué les analyses statistiques pour évaluer et comparer les résultats des différents indicateurs. J'ai dirigé la rédaction de l'article, où l'ensemble des co-auteurs a contribué à l'interprétation des résultats en fonction de leur expertise et à la révision générale. Les données liées à cet article sont accessibles dans le dépôt en ligne hébergé par le site Scholars Portal DataVERSE avec l'identifiant unique [10.5683/SP2/WDDDMI](<https://doi.org/10.5683/SP2/WDDDMI>). Une partie des résultats de ces analyses a été présentée lors de la Réunion Scientifique de *Canadian Healthy Oceans Network II* à Ottawa en novembre 2018.

Dreujou E, Desroy N, Carrière J, Tréau de Coeli L, McKindsey CW, Archambault P (submitted). Determining the ecological status of benthic coastal communities: a case study in a Canadian industrial harbour area. *Frontiers in Marine Science*.

Les sections suivantes sont celles de l'article soumis, en révision.

Title

TEXT

Authors

TEXT

Abstract

TEXT

Keywords

TEXT

Introduction

TEXT

Methodology

TEXT

Results

TEXT

Discussion

TEXT

Acknowledgements

TEXT

ARTICLE 3

TITLE

Résumé en français du troisième article

Contexte scientifique

Publication associée

Traduction du résumé de l'article publié

ABSTRACT

Les sections suivantes sont celles de l'article publié.

Title

TEXT

Authors

TEXT

Abstract

TEXT

Keywords

TEXT

Introduction

TEXT

Methodology

TEXT

Results

TEXT

Discussion

TEXT

Acknowledgements

TEXT

CONCLUSION GÉNÉRALE

TODO

RÉFÉRENCES

- Archambault, P., Grant, C., Audet, R., Bader, B., Bourgault, D., Cusson, M., Doyon, S., Dumont, D., Lamalle, S., Levasseur, M., Morin, É., Pelletier, É., Schloss, I., St-Onge, G., Therriault, G., Tremblay, H., Tremblay, J.-É., Tremblay, R., and Plante, S. (2016). Notre Golfe : l'émergence d'un réseau intersectoriel pour l'étude de l'environnement socioécologique du golfe du Saint-Laurent. *Le Naturaliste canadien*, 140(2):41–44.
- Ban, N. and Alder, J. (2008). How wild is the ocean? Assessing the intensity of anthropogenic marine activities in British Columbia, Canada. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 18(1):55–85.
- Belley, R., Archambault, P., Sundby, B., Gilbert, F., and Gagnon, J.-M. (2010). Effects of hypoxia on benthic macrofauna and bioturbation in the Estuary and Gulf of St. Lawrence, Canada. *Continental Shelf Research*, 30(12):1302–1313.
- Boonstra, W. J., Ottosen, K. M., Ferreira, A. S. A., Richter, A., Rogers, L. A., Pedersen, M. W., Kokkalis, A., Bardarson, H., Bonanomi, S., Butler, W., Diekert, F. K., Fouzai, N., Holma, M., Holt, R. E., Kvile, K. Ø., Malanski, E., Macdonald, J. I., Nieminen, E., Romagnoni, G., Snickars, M., Weigel, B., Woods, P., Yletyinen, J., and Whittington, J. D. (2015). What are the major global threats and impacts in marine environments? Investigating the contours of a shared perception among marine scientists from the bottom-up. *Marine Policy*, 60:197–201.
- Clarke, K. R. (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18(1):117–143.
- Côté, I. M., Darling, E. S., and Brown, C. J. (2016). Interactions among ecosystem stressors and their importance in conservation. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1824):20152592.
- Crain, C. M., Kroeker, K., and Halpern, B. S. (2008). Interactive and cumulative effects of multiple human stressors in marine systems. *Ecology Letters*, 11(12):1304–1315.
- Darling, E. S. and Côté, I. M. (2008). Quantifying the evidence for ecological synergies. *Ecology Letters*, 11(12):1278–1286.
- Dutil, J.-D., Proulx, S., Galbraith, P. S., Chassé, J., Lambert, N., and Laurian, C. (2012). Coastal and epipelagic habitats of the estuary and Gulf of St. Lawrence. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 3009: Ix + 87 pp. Technical Report 3009.
- Halpern, B. S. and Fujita, R. (2013). Assumptions, challenges, and future directions in cumulative impact analysis. *Ecosphere*, 4(10):art131.

- Halpern, B. S., McLeod, K. L., Rosenberg, A. A., and Crowder, L. B. (2008). Managing for cumulative impacts in ecosystem-based management through ocean zoning. *Ocean & Coastal Management*, 51(3):203–211.
- Halpern, B. S., Selkoe, K. A., Micheli, F., and Kappel, C. V. (2007). Evaluating and Ranking the Vulnerability of Global Marine Ecosystems to Anthropogenic Threats. *Conservation Biology*, 21(5):1301–1315.
- Micheli, F., Heiman, K. W., Kappel, C. V., Martone, R. G., Sethi, S. A., Osio, G. C., Fraschetti, S., Shelton, A. O., and Tanner, J. M. (2016). Combined impacts of natural and human disturbances on rocky shore communities. *Ocean & Coastal Management*, 126:42–50.
- Schloss, I. R., Archambault, P., Beauchesne, D., Cusson, M., Ferreyra, G., Levasseur, M., Pelletier, É., St-Louis, R., and Tremblay, R. (2017). Cumulative potential impacts of the stress factors associated with human activities on the St. Lawrence marine ecosystem. In Archambault, P., Schloss, I. R., Grant, C., and Plante, S., editors, *Hydrocarbon in the Gulf of St. Lawrence - Social, Economic and Environmental Issues*, pages 133–165. Notre Golfe, Rimouski, Qc, Canada.
- Séguin, A., Harvey, É., Archambault, P., Nozais, C., and Gravel, D. (2014). Body size as a predictor of species loss effect on ecosystem functioning. *Scientific Reports*, 4.