

## Chapitre 5

# CARACTÉRISATION DE LA FAUNE BENTHIQUE



## Table des matières

Table des matières .....	378
Liste des figures .....	378
Liste des tableaux .....	380
5. CARACTERISATION DE LA FAUNE BENTHIQUE.....	381
Glossaire.....	382
5.1. Mise en contexte.....	383
5.2. Matériel et méthodes.....	383
5.2.1. Plans d'échantillonnage, sites et stations étudiés.....	383
5.2.2. Prélèvement des échantillons.....	391
5.2.3. Analyses au laboratoire.....	391
5.2.3.1. Matière organique totale.....	391
5.2.3.2. Granulométrie .....	392
5.2.3.3. Pigments chlorophylliens.....	392
5.2.3.4. Métaux lourds.....	393
5.2.3.5. Identification du macro-endobenthos*.....	393
5.2.4. Traitement statistique des données.....	394
5.2.4.1. Campagne 2014.....	394
5.2.4.2. Campagnes 2016 et 2017 .....	395
5.2.4.3. Comparaison des campagnes 2014, 2016 et 2017 .....	396
5.3. Résultats et discussion.....	396
5.3.1. Campagne 2014 .....	396
5.3.1.1. Caractérisation des sédiments .....	396
5.3.1.2. Caractérisation de la faune benthique .....	404
5.3.1.3. Interprétation générale pour la campagne de 2014.....	412
5.3.2. Campagnes 2016 et 2017.....	413
5.3.2.1. Caractérisation des sédiments .....	413
5.3.2.2. Caractérisation de la faune benthique .....	424
5.3.2.3. Liens entre l'habitat et les communautés .....	433
5.3.3. Comparaison des campagnes 2014, 2016 et 2017.....	442
5.3.3.1. Paramètres du sédiment.....	442
5.3.3.2. Ensemble des communautés.....	442
5.4. Constats et recommandations.....	443
5.5. Références bibliographiques.....	446

## Liste des figures

Figure 5-1 : Sites échantillonnés pendant la campagne 2014.....	384
Figure 5-2 : Stations échantillonnées aux sites P1 et P2 (a) et P3 et P4 (b) pendant la campagne 2014 .....	384
Figure 5-3 : Stations échantillonnées aux sites R1 (a) et R2 (b) pendant la campagne 2014.....	385
Figure 5-4 : Stations échantillonnées aux sites R3 (a) et R4 (b) pendant la campagne 2014.....	386
Figure 5-5 : Les différentes zones de la baie de Sept-Îles.....	387
Figure 5-6 : Stations échantillonnées pendant la campagne 2016 dans la baie de Sept-Îles (a) et la côte de Port-Cartier (b).....	388
Figure 5-7 : Stations échantillonnées pendant la campagne 2016 dans le secteur Pentecôte (c) et la rivière Manitou (d). .....	389
Figure 5-8 : Stations échantillonnées pendant la campagne 2017 dans la baie de Sept-Îles (a) et la rivière Manitou (b) .....	390
Figure 5-9 : Utilisation de la benne sur le terrain (Crédit-photo : Elliot Dreujou).....	391

Figure 5-10 : Contenu en matière organique (%), moyenne ± erreur-type) des sédiments prélevés aux sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et aux sites références (R1, R2, R3, R4).....	397
Figure 5-11 : Proportion des différentes classes de taille (%), moyenne ± erreur-type) des sédiments des sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et références (R1, R2, R3, R4).....	398
Figure 5-12 : Concentrations en arsenic (a), cadmium (b) (mg.kg <sup>-1</sup> , moyenne ± erreur-type) des sédiments des sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et références (R1, R2, R3, R4).....	401
Figure 5-13 : Concentrations en chrome (c), cuivre (d), fer (e) (mg.kg <sup>-1</sup> , moyenne ± erreur-type) des sédiments des sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et références (R1, R2, R3, R4).....	402
Figure 5-14 : Concentrations en arsenic manganèse (f), mercure (g), plomb (h) (mg.kg <sup>-1</sup> , moyenne ± erreur-type) des sédiments des sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et références (R1, R2, R3, R4).....	403
Figure 5-15 : Concentrations en zinc (i) (mg.kg <sup>-1</sup> , moyenne ± erreur-type) des sédiments des sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et références (R1, R2, R3, R4) .....	404
Figure 5-16 : Courbe d'accumulation des taxons échantillonnés dans la baie de Sept-Îles en 2014.....	405
Figure 5-17 : Bipalponephthys neotena .....	406
Figure 5-18 : Nephtys sp.....	406
Figure 5-19 : Scoloplos sp. .....	406
Figure 5-20 : Phoronida (Phoronis ijimai) .....	406
Figure 5-21 : Valeur de la richesse spécifique (a), l'abondance (b) et la biomasse (c), (moyenne ± erreur-type) des communautés benthiques des sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et références (R1, R2, R3, R4).....	408
Figure 5-22 : Indices de Shannon (d) et de Piélov (e) (moyenne ± erreur-type) des communautés benthiques des sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et références (R1, R2, R3, R4) .....	409
Figure 5-23 : Dendrogrammes des stations échantillonnées en 2014, basés sur les distances de Bray-Curtis calculées avec une routine CLUSTER sur le logarithme des abondances des organismes benthiques (a) et sur leur présence/absence (b) .....	411
Figure 5-24 : Contenu en matière organique (%) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 (cercles vides) et 2017 (cercles pleins).....	413
Figure 5-25 : Concentration en chlorophylle a (a) et en phaeopigments (b) ( $\mu\text{g}.\text{g}^{-1}$ ) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 (cercles vides) et 2017 (cercles pleins) .....	415
Figure 5-26 : Contenu en gravier (a) (%) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 (cercles vides) et 2017 (cercles pleins) .....	416
Figure 5-27 : Contenu en sable (b) et en vase (c) (%) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 (cercles vides) et 2017 (cercles pleins) .....	417
Figure 5-28: Contenu en arsenic (a) (mg.kg <sup>-1</sup> ) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 .....	418
Figure 5-29 : Contenu en cadmium (b) et chrome (c), (mg.kg <sup>-1</sup> ) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 .....	419
Figure 5-30 : Contenu en cuivre (d) et fer (e) (mg.kg <sup>-1</sup> ) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 .....	420
Figure 5-31 : Contenu en manganèse (f) et mercure (g) (mg.kg <sup>-1</sup> ) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 .....	421
Figure 5-32 : Contenu en plomb (h) et zinc (i) (mg.kg <sup>-1</sup> ) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 .....	422
Figure 5-33 : Cadrage multidimensionnel non-métrique (nMDS) des échantillons de surface (carrés noirs) et des échantillons profonds (losanges noirs) collectés aux stations échantillonnées dans la baie de Sept-Îles (BSI) en 2016.....	423
Figure 5-34 : Courbes d'accumulation des taxons échantillonnés en 2016 (a) et 2017 (b) .....	425
Figure 5-35 : Valeur de la richesse spécifique (a) et de l'abondance (b) aux stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 et 2017.....	426
Figure 5-36 : Valeur des indices de Shannon (c) et de Piélov (d) aux stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 et 2017 .....	427
Figure 5-37 : Dendrogrammes des stations échantillonnées en 2016, basés sur les distances de Bray-Curtis calculées avec une routine CLUSTER sur le logarithme des abondances des organismes benthiques (a) et sur leur présence/absence (b) .....	430
Figure 5-38 : Dendrogrammes des stations échantillonnées en 2017, basés sur les distances de Bray-Curtis calculées avec une routine CLUSTER sur le logarithme des abondances des organismes benthiques (a) et sur leur présence/absence (b) .....	431
Figure 5-39 : Représentation des relations significatives entre les paramètres du sédiment, les concentrations en métaux lourds et la richesse spécifique (a) pour les stations échantillonnées en 2016 et 2017.....	434
Figure 5-40 : Représentation des relations significatives entre les paramètres du sédiment, les concentrations en métaux lourds et l'abondance (b) pour les stations échantillonnées en 2016 et 2017.....	435

Figure 5-41 : Représentation des relations significatives entre les paramètres du sédiment, les concentrations en métaux lourds et l'indice de Shannon (c) pour les stations échantillonnées en 2016 et 2017 .....	436
Figure 5-42 : Représentation des relations significatives entre les paramètres du sédiment, les concentrations en métaux lourds et l'indice de Piéloù (d) pour les stations échantillonnées en 2016 et 2017.....	437
Figure 5-43 : Analyse de redondance basée sur les distances (dbRDA) étudiant les relations entre les assemblages d'espèces et les paramètres du sédiment aux stations échantillonnées lors des campagnes 2016 et 2017 .....	439
Figure 5-44 : Analyse de redondance basée sur les distances (dbRDA) étudiant les relations entre les assemblages d'espèces et concentrations de métaux lourds aux stations échantillonnées lors des campagnes 2016 et 2017 .....	441

## Liste des tableaux

Tableau 5-1 : Résultats de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) testant l'effet du Traitement et du Site (Traitement) sur le contenu en matière organique des sédiments des stations échantillonnées en 2014 .....	396
Tableau 5-2 : Résultats de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) testant l'effet du Traitement et du Site (Traitement) sur les types de sédiments des stations échantillonnées en 2014.....	398
Tableau 5-3 : Résultats des analyses de variance par permutation (PERMANOVA) testant l'effet du Traitement et du Site (Traitement) sur les concentrations en métaux lourds des sédiments des stations échantillonnées en 2014 .....	400
Tableau 5-4 : Abondance et biomasse totales des phyla présents dans les échantillons collectés à BSI en 2014 .....	404
Tableau 5-5 : Résultats des analyses de variance par permutation (PERMANOVA) testant l'effet du Traitement et du Site (Traitement) sur les indices de diversité des communautés benthiques des stations échantillonnées en 2014 .....	407
Tableau 5-6 : Résultats de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) multivariée testant l'effet du Traitement et du Site (Traitement) sur les assemblages benthiques des stations échantillonnées en 2014 (logarithme des abondances ou présence/absence).....	410
Tableau 5-7 : Résultats des tests a posteriori de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) multivariée testant l'effet du Traitement et du Site (Traitement) sur les assemblages benthiques des stations échantillonnées en 2014 (logarithme des abondances ou présence/absence) .....	410
Tableau 5-8 : Similarité des assemblages benthiques entre les sites potentiellement perturbés et les sites références de la campagne 2014, calculée par la procédure SIMPER.....	412
Tableau 5-9 : Résultats de l'analyse de variance multiple par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de la Profondeur d'échantillonnage sur les concentrations en métaux lourds des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 .....	423
Tableau 5-10 : Abondance et biomasse de chaque phylum présent dans les échantillons collectés en 2016 et 2017 ..	424
Tableau 5-11 : Valeurs des indices de diversité pour les stations échantillonnées en 2016 et 2017.....	424
Tableau 5-12 : Similarité des assemblages benthiques entre les groupes obtenus pour les stations de la campagne 2016, calculés par la procédure SIMPER.....	432
Tableau 5-13 : Similarité des assemblages benthiques entre les groupes obtenus pour les stations de la campagne 2017, calculés par la procédure SIMPER.....	433
Tableau 5-14 : Résultats des régressions simples effectuées sur les résultats des campagnes 2016 et 2017, afin d'analyser les liens entre les indices de diversité et les paramètres du sédiment .....	434
Tableau 5-15 : Résultats des régressions multiples effectuées sur les résultats des campagnes 2016 et 2017, afin d'analyser les liens entre les indices de diversité et les paramètres du sédiment .....	438
Tableau 5-16 : Résultats des régressions simples effectuées sur les résultats des campagnes 2016 et 2017, afin d'analyser les liens entre les indices de diversité et les paramètres du sédiment .....	440
Tableau 5-17 : Résultats des régressions multiples effectuées sur les résultats des campagnes 2016 et 2017, afin d'analyser les liens entre les indices de diversité et les concentrations de métaux lourds .....	441
Tableau 5-18 : Résultats de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) multivariée testant l'effet de la Campagne sur les paramètres du sédiment des stations échantillonnées lors des trois campagne.....	442
Tableau 5-19 : Résultats des tests a posteriori de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) multivariée testant l'effet de la Campagne sur les paramètres du sédiment des stations échantillonnées lors des trois campagnes .....	442
Tableau 5-20 : Résultats de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) multivariée testant l'effet de la Campagne sur les assemblages d'espèces supérieures à 500 µm des stations échantillonnées en 2014 et 2017 (logarithme des abondances ou présence/absence).....	443
Tableau 5-21 : Résultats de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) multivariée testant l'effet de la Campagne sur les assemblages d'espèces supérieures à 1 mm des stations échantillonnées en 2016 et 2017 (logarithme des abondances ou présence/absence).....	443

## CHAPITRE 5

### CARACTERISATION DE LA FAUNE BENTHIQUE



Projet réalisé par l'équipe de :  
 Philippe Archambault, Ph. D.  
 Laboratoire d'écologie benthique  
 Université Laval

Auteurs	Elliot Dreujou, Laurence Paquette, Cindy Grant, Philippe Archambault
Rédaction et révision du chapitre :	
Collaboration à la rédaction de la section 5.4 :	Julie Carrière, Ph.D., directrice du projet et directrice de l'INREST, Aurélie Le Hénaff, coordonnatrice de l'INREST
Construction de la base de données :	Elliot Dreujou (2016, 2017), Lisa Tréau de Coeli (2014)
Validation de la base de données et analyses statistiques :	Elliot Dreujou (2016, 2017), Cindy Grant (2014)
Analyses granulométriques :	Elliot Dreujou (2016, 2017), Gonzalo Bravo, Valérie De Carufel (2016), Chantal Méthot, Lisa Tréau de Coeli (2014)
Détermination du contenu en matière organique :	Elliot Dreujou (2016, 2017), Chantal Méthot (2014)
Tri des échantillons :	Elliot Dreujou (2016, 2017), Pierre-Olivier Dumais, Raphaël Bouchard (2017), David Poissant, David Beauchesne, Jean-Luc Shaw (2016), Chantal Méthot, Lisa Tréau de Coeli (2014)
Identification des organismes et détermination des biomasses :	Elliot Dreujou (2016, 2017), Lisa Tréau de Coeli (2014)
Collaboration au plan et à la stratégie d'échantillonnage et approbation par l'INREST :	Julie Carrière, Ph.D., directrice du projet et directrice de l'INREST



Crédit photo : Julie Carrière

## Glossaire

Les termes sont identifiés par un astérisque \* dans le texte afin de vous référer à la définition ci-dessous.

**Benthos :** Organismes dont le mode de vie est lié au fond aquatique (Actu-Environnement, 2018a).  
 - endobenthique : vivant dans le substrat (intérieur du fond marin)  
 - épibenthique : vivant à la surface du substrat.

**Meiofaune :** Ensemble des animaux de petites tailles, entre 0,1 et 500 µm, vivant dans les sédiments. Ils se caractérisent par leurs déplacements qui s'opèrent entre les grains de sable, sans le remuer (Actu-Environnement, 2018b).

**Phaeopigment :** Pigment non photosynthétique qui est le produit de dégradation de la chlorophylle (Maurer et al., 2017)

**Taxon :** Groupe faunistique ou floristique correspondant à un niveau de détermination systématique donné : classe, ordre, genre, famille, espèce (IFREMER, 2011).

**Phylum :** Synonyme d'embranchement, rang de la classification systématique du vivant, situé sous le règne et au-dessus de la classe.

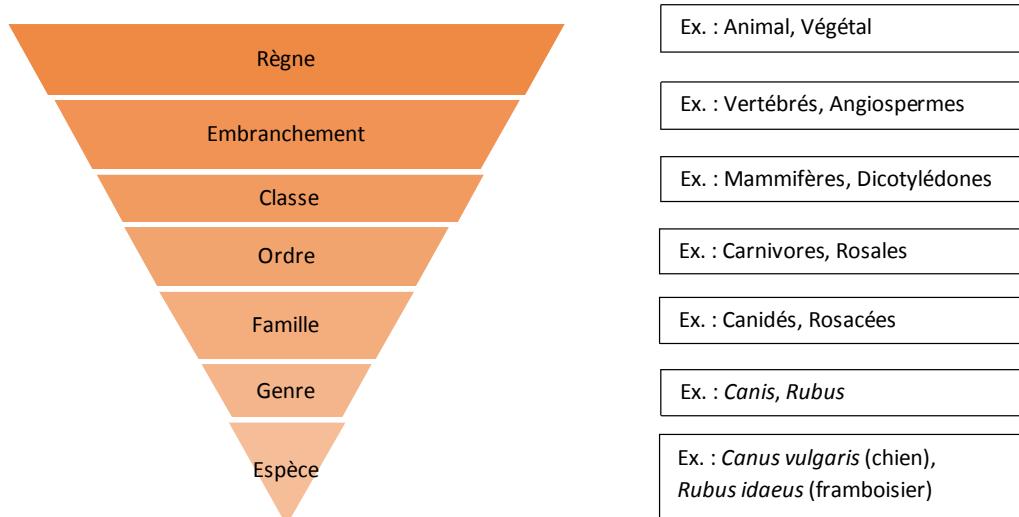


Schéma de la classification scientifique des espèces et exemples par taxon

## Sites d'échantillonnage :

- BDA (=BDH) secteur Pentecôte
- BSI baie de Sept-Îles
- CPC côte de Port-Cartier
- MR embouchure de la rivière Manitou

## 5.1. Mise en contexte

La baie de Sept-Îles est le siège d'activités anthropiques diverses, en particulier l'industrie minière, les pêches industrielle et artisanale et les rejets d'eaux usées. Cette sollicitation crée une pression grandissante sur les écosystèmes benthiques, dont les caractéristiques biotiques et abiotiques<sup>1</sup> pourraient être modifiées. Dans le cadre de l'observatoire de veille environnementale de la baie de Sept-Îles, une équipe pluridisciplinaire a été formée afin de comprendre les liens entre les communautés et les activités humaines.

Afin de répondre aux différents objectifs, il est nécessaire de caractériser les écosystèmes étudiés. Trois campagnes d'échantillonnage de la communauté benthique ont ainsi été réalisées en 2014, 2016 et 2017. Chaque campagne a permis de récolter plusieurs paramètres sur les écosystèmes échantillonnés. En particulier, il a été question de :

- (1) mesurer des variables abiotiques des sédiments (matière organique, granulométrie, pigments chlorophylliens) et
- (2) caractériser la faune macro-endobenthique, à différentes stations placées dans la baie de Sept-Îles.

## 5.2. Matériel et méthodes

### 5.2.1. Plans d'échantillonnage, sites et stations étudiés

Le développement d'un plan d'échantillonnage est une étape cruciale dans un projet d'évaluation environnementale ; l'exercice peut être complexe et se doit d'être validé par plusieurs personnes (Underwood, 1993a ; 1993b ; 1994 ; Glasby, 1997 ; Underwood, 2000a ; 2000b ; Archambault *et al.*, 2001 ; Fraschetti *et al.*, 2001 ; Downes *et al.*, 2002 ; Underwood et Chapman, 2003). Un plan d'échantillonnage approprié doit impérativement être fait de manière à répondre à l'objectif du projet. Cette réflexion initiale permet d'optimiser le projet et d'améliorer grandement, à terme, le processus de prise de décision puisque les données récoltées seront aptes à révéler, s'il y a lieu, l'influence d'une perturbation sur l'écosystème. De plus, un plan d'échantillonnage adéquat diminue l'ambiguité possible dans l'interprétation des résultats.

La profondeur et l'habitat étant des paramètres ayant beaucoup d'influence sur les communautés benthiques, il importe, pour une caractérisation juste de celles-ci,

- soit (1) de concentrer ses efforts dans une unique classe de profondeur et sur un seul type de sédiment,
- soit (2) de couvrir l'ensemble de la zone d'étude, incluant toutes les classes de profondeurs et tous les types de fond.

Ces deux approches peuvent être utilisées dans la création des plans expérimentaux.

Dans le cadre de la campagne réalisée en 2014, la première approche a été choisie et les sédiments et communautés ont été caractérisés au sein de sites potentiellement perturbés et de sites considérés comme peu perturbés (références). La profondeur des sites étudiés se trouvait entre 4 à 10 m de profondeur et 5 stations ont été échantillonnées par site (figures 5-1, 5-2, 5-3 et 5-4).

---

<sup>1</sup> Se dit d'un facteur ou processus physique ou chimique de l'environnement (ne fait pas intervenir le vivant) (Ifremer, 2008).

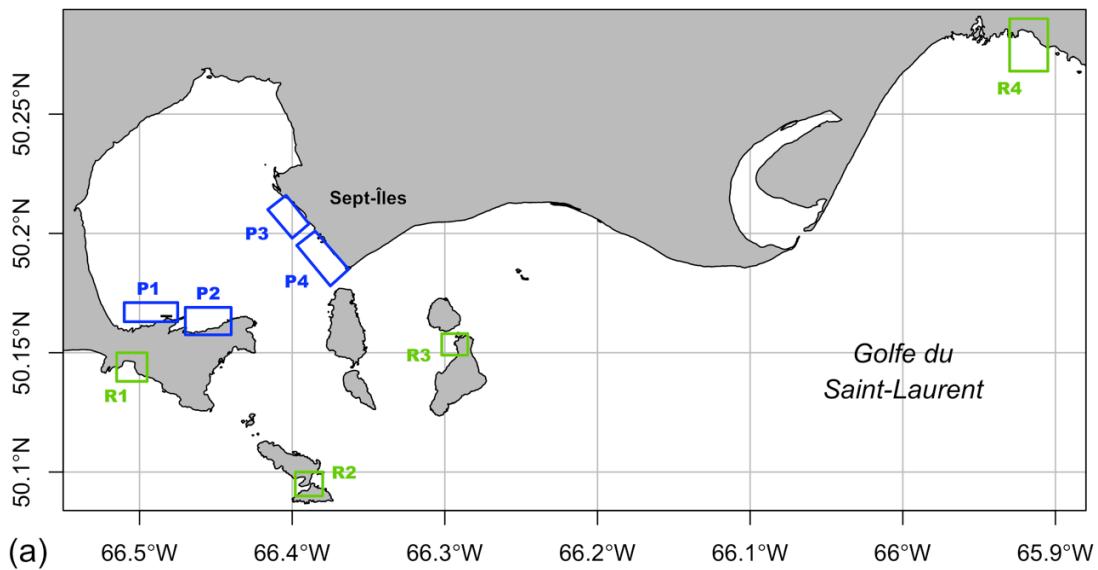


Figure 0-1 : Sites échantillonnés pendant la campagne 2014

Les sites potentiellement perturbés sont en bleu et ceux références en vert, et 5 stations ont été échantillonnées par site.

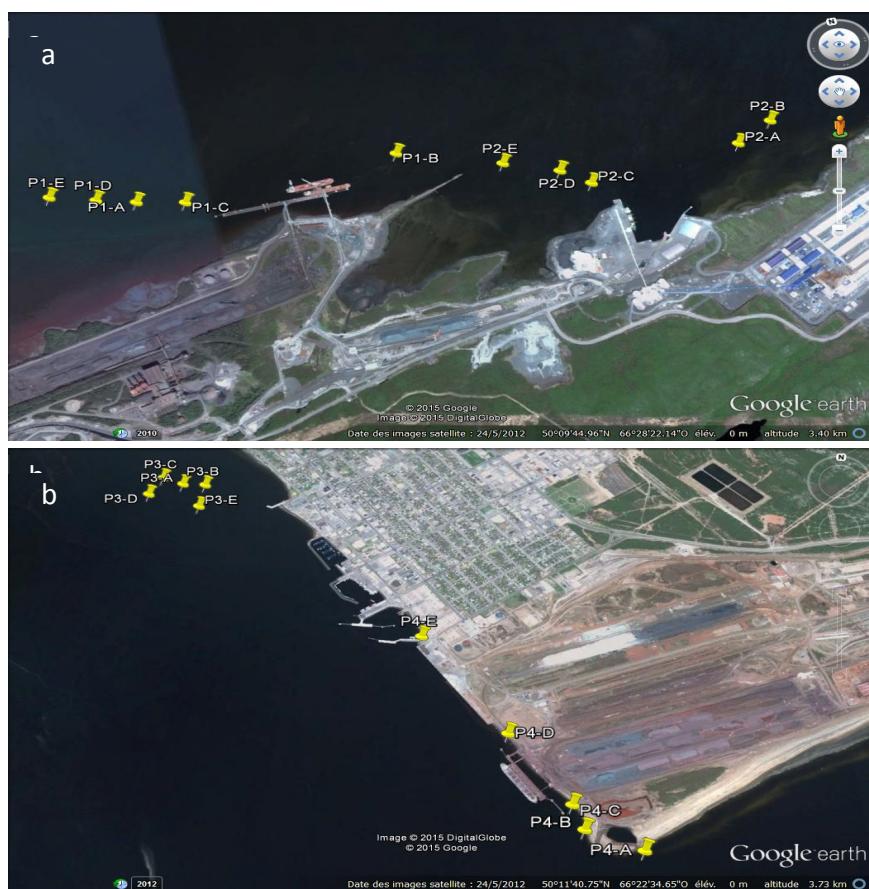


Figure 0-2 : Stations échantillonnées aux sites P1 et P2 (a) et P3 et P4 (b) pendant la campagne 2014



Figure 0-3 : Stations échantillonnées aux sites R1 (a) et R2 (b) pendant la campagne 2014

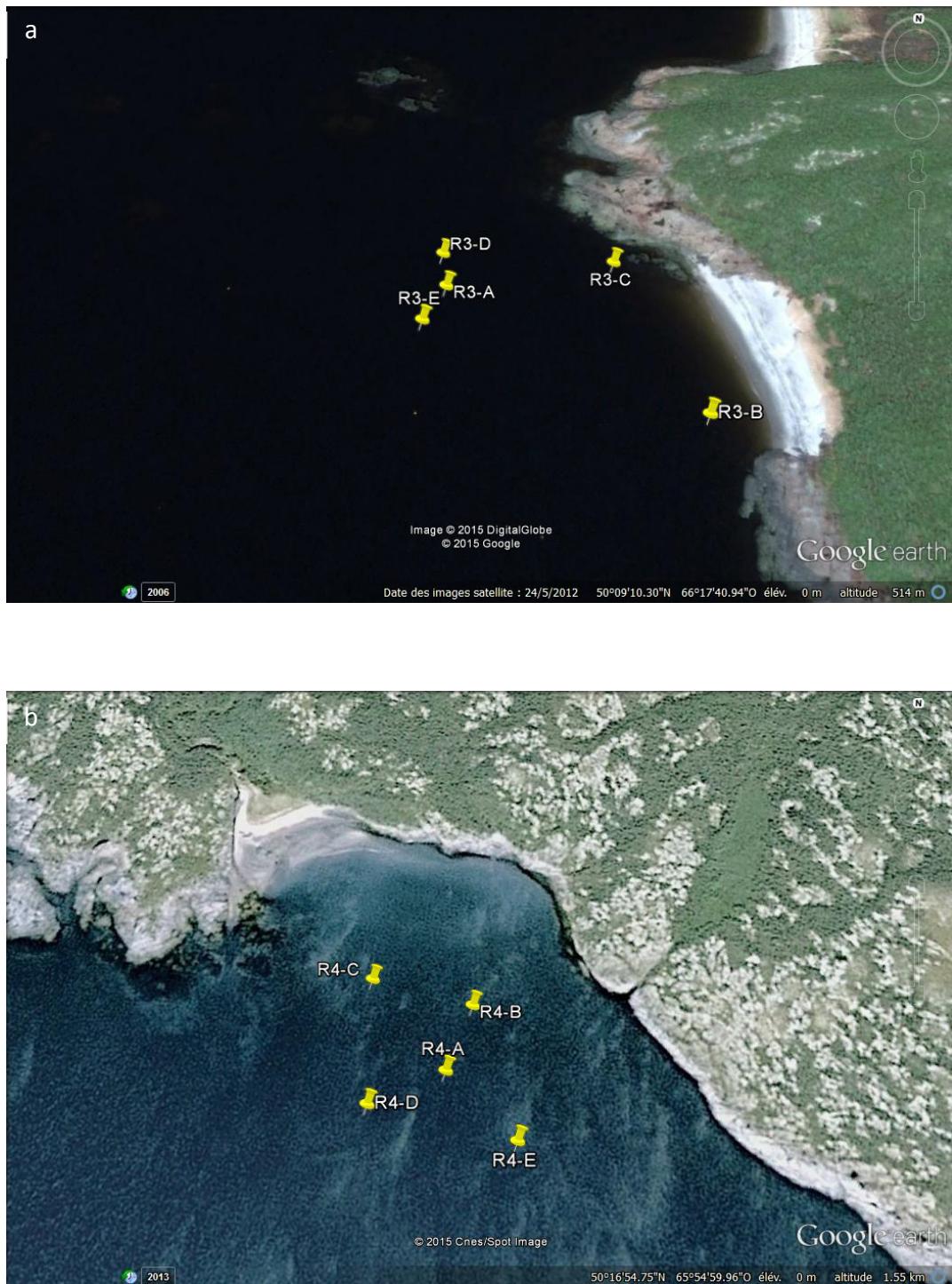


Figure 0-4 : Stations échantillonnées aux sites R3 (a) et R4 (b) pendant la campagne 2014

Pour les campagnes de 2016 et 2017, la seconde approche a été choisie. L'objectif a été d'obtenir un portrait des communautés benthiques et des sédiments à l'échelle de la baie complète (baie de Sept-Îles et archipel à son entrée).

Les stations ont été placées aléatoirement selon la méthode de *block-randomisation*<sup>2</sup> (Hulbert, 1984), dans les différentes zones de la baie (figure 5-5) et dans plusieurs secteurs références. Mentionnons que cette carte a été utilisée initialement pour la campagne d'échantillonnage de 2016.



Figure 0-5 : Les différentes zones de la baie de Sept-Îles pour la campagne 2016

Au total, 35 stations ont été échantillonnées en 2016 dans la baie de Sept-Îles (BSI ; figure 5-6a), ainsi que plusieurs le long de la côte de Port-Cartier (CPC ; figure 5-6b), dans le secteur Pentecôte (BDA ; figure 5-7c) et à l'embouchure de la rivière Manitou (MR ; figure 5-7d). En 2017, 24 stations ont été échantillonnées à BSI (figure 5-8a) et 5 à MR (figure 5-8b) selon le même plan expérimental.

<sup>2</sup> Les stations ont été placées aléatoirement dans une zone délimitée au préalable selon un facteur (un « block »).

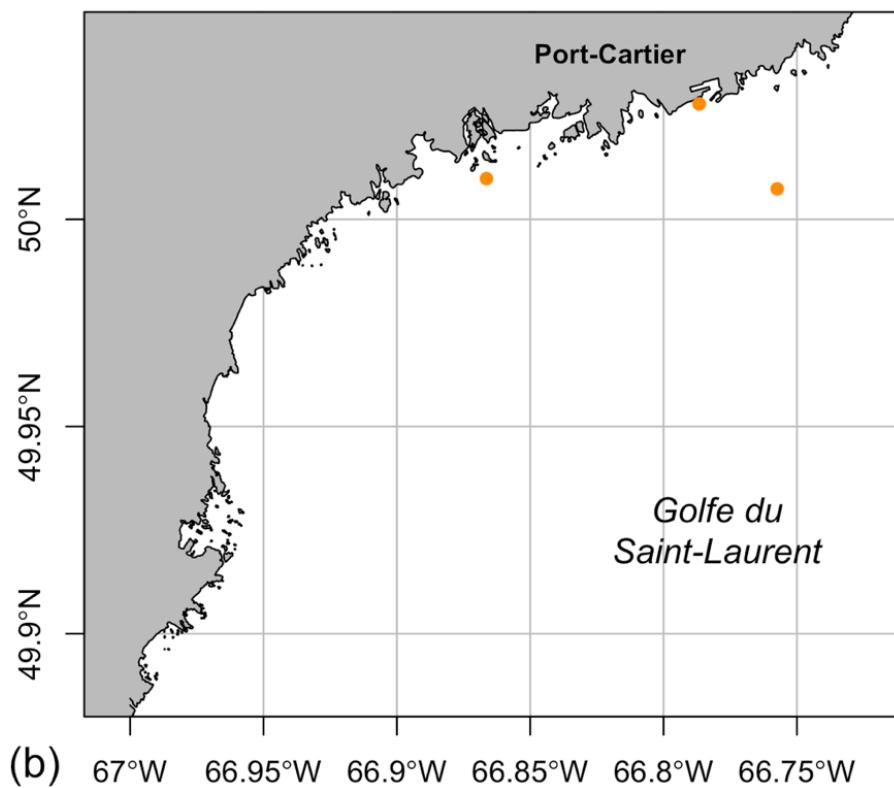
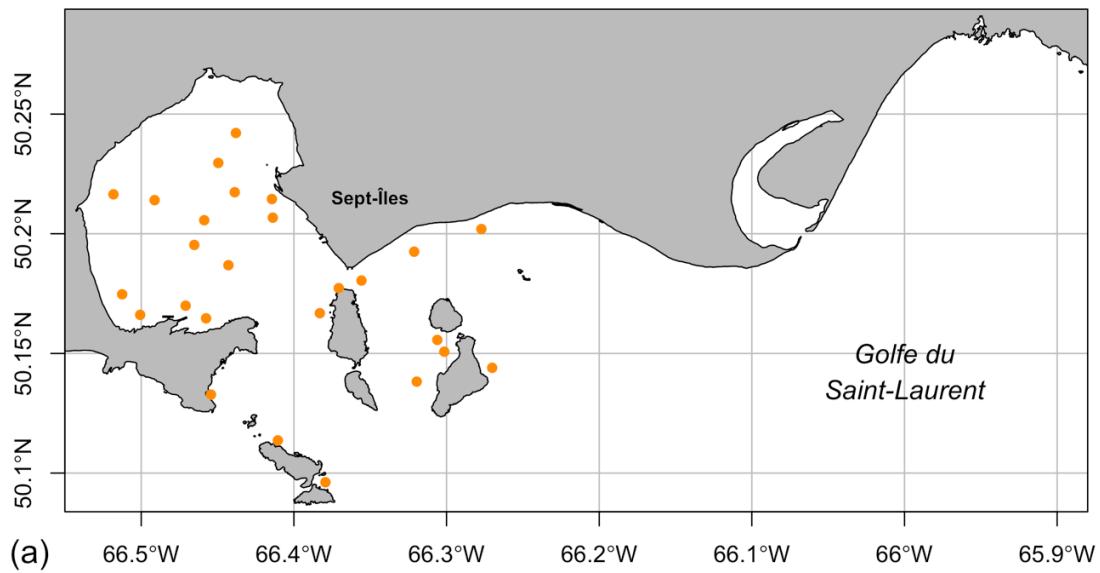


Figure 0-6 : Stations échantillonées pendant la campagne 2016 dans la baie de Sept-Îles (a) et la côte de Port-Cartier (b).

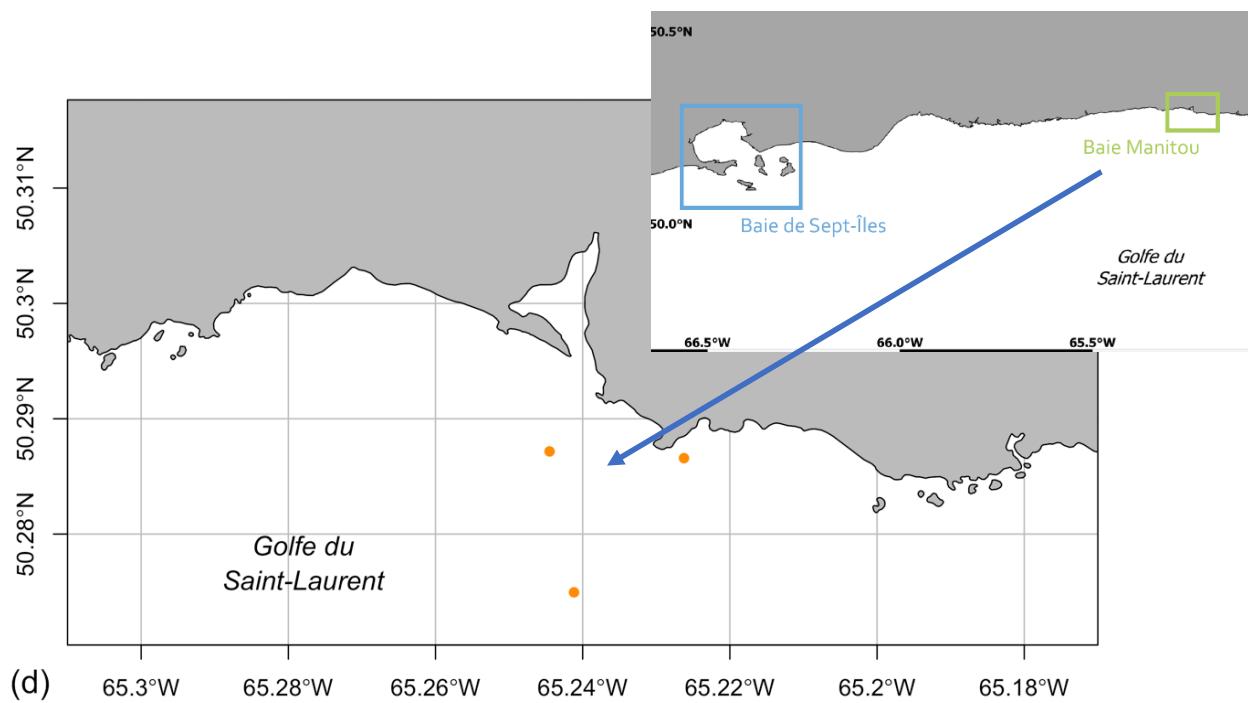
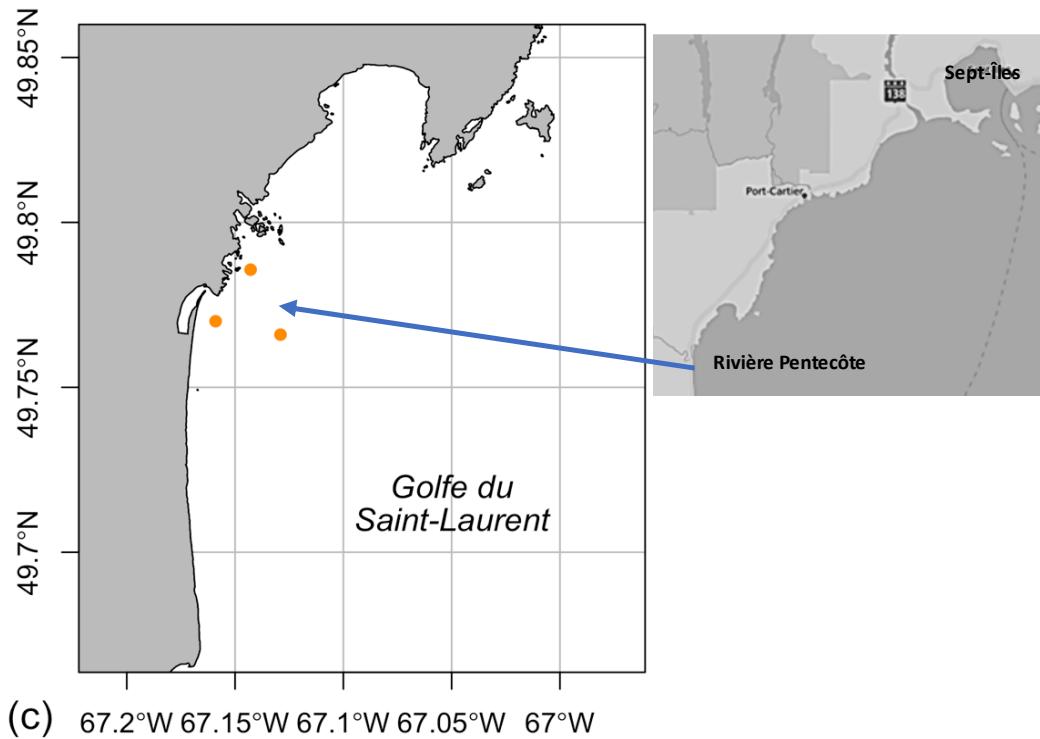


Figure 0-7 : Stations échantillonnées pendant la campagne 2016 dans le secteur Pentecôte (c) et la rivière Manitou (d).

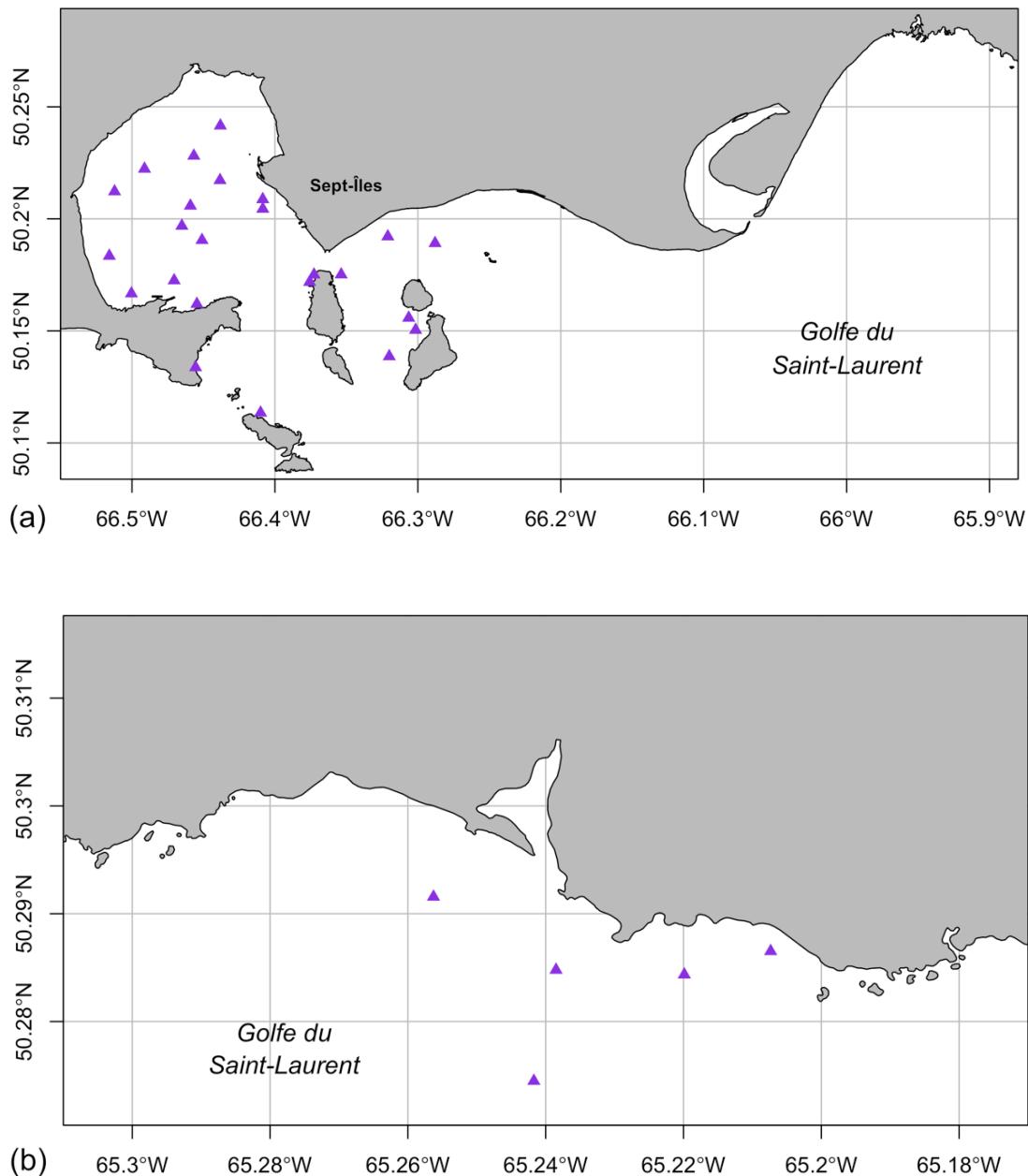


Figure 0-8 : Stations échantillonées pendant la campagne 2017 dans la baie de Sept-Îles (a) et la rivière Manitou (b)

Les coordonnées de chaque station et la synthèse des données recueillies lors des trois campagnes sont compilées à l'annexe 5-1.

### 5.2.2. Prélèvement des échantillons

Tous les échantillons de sédiments ont été prélevés à l'aide d'une benne Ponar (capacité de 8,2 litres, surface de 229 x 229 mm ; figure 5-9). Compte tenu de la faible masse de cette benne (20 kg) qui la rend difficile d'utilisation à des profondeurs supérieures à 40 m, un câble lesté a pu être utilisé lors de l'échantillonnage en zones profondes. Afin d'obtenir un volume constant entre chaque station pour les échantillons collectés, la benne a été déployée à deux reprises.



Figure 0-9 : Utilisation de la benne sur le terrain (Crédit-photo : Elliot Dreujou)

Le premier déploiement a permis de prélever du sédiment pour l'analyse des pigments chlorophylliens, du contenu en matière organique, de la taille des particules du sédiment. Les échantillons ont été prélevés en surface (maximum 5 cm de profondeur) et conservés à -20 °C. Des échantillons ont aussi été prélevés pour les analyses de contaminants, en surface et en profondeur du sédiment.

Le second déploiement a été effectué dans le but de réaliser l'identification de la macro-endofaune benthique. La totalité du sédiment collecté par la benne a été récupérée en rinçant l'intérieur de la benne à l'eau salée. Le contenu de la benne a été tamisé avec un tamis de 500 µm de maille pour les campagnes 2014 et 2017, et un de 1 mm de maille pour la campagne 2016.

Des données supplémentaires ont été collectées à chaque station d'échantillonnage : la date du prélèvement, le nom de la station, les coordonnées géographiques, la profondeur, l'épaisseur du sédiment récolté par la benne, ainsi que plusieurs paramètres météorologiques comme la température de l'air et l'intensité du vent.

### 5.2.3. Analyses au laboratoire

#### 5.2.3.1. Matière organique totale

Définition :

La matière organique est la matière produite par le métabolisme des êtres vivants (végétaux, animaux et micro-organismes). Elle est constituée d'une fraction carbonée et d'une fraction azotée.

#### Protocole d'analyse :

Pour déterminer le contenu en matière organique totale (carbone et azote organiques confondus), la méthode de perte par ignition a été utilisée (LOI ou Loss-On-Ignition ; Davies, 1974 ; Leong et Tanner, 1999 ; Bale et Kenny, 2005). Les sédiments ont été séchés (60 °C, minimum 48 h ou jusqu'à l'obtention d'une masse stable), puis brûlés dans une fournaise (550 °C pendant 6 h). La différence de masse avant et après calcination permet d'obtenir la proportion de matière organique totale du sédiment, calculée en pourcentage de la masse de l'échantillon.

#### 5.2.3.2. Granulométrie

##### Définition :

La granulométrie d'un sédiment est l'analyse qui consiste à déterminer la proportion des classes de taille des particules qui le composent. Ces classes sont standardisées et permettent d'obtenir le pourcentage de gravier, sable et vase qui composent le sédiment.

##### Protocole d'analyse :

Les analyses granulométriques ont été réalisées à l'aide d'un analyseur de taille de particules par diffraction laser (LS 13320 Beckman-Coulter). Lorsque la taille des particules était supérieure à la limite de détection de l'appareil (2 mm), la méthode de séparation par colonne de tamis successifs a été utilisée. Les résultats ont ensuite été uniformisés pour obtenir la distribution des particules entre 0,04 µm et 26,5 mm. Les différentes analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Gradistat, et la classification des sédiments est inspirée de celle de Wentworth (1922).

#### 5.2.3.3. Pigments chlorophylliens

Cette analyse a été réalisée uniquement pour les stations des campagnes 2016 et 2017.

##### Définition :

Le micro-phytobenthos est composé d'algues microscopiques et de cyanobactéries photosynthétiques qui vivent dans les premiers millimètres de profondeur des sédiments, exposées à la lumière (MacIntyre *et al.*, 1996). Ce comportement joue un rôle significatif pour la productivité de l'écosystème (Gargas, 1972 ; Nowicki et Nixon, 1985 ; Varela et Penas, 1985). En particulier, la matière organique produite par ces organismes aura un impact sur les niveaux trophiques supérieurs qui s'en alimentent (comme la meio\*- et la macrofaune benthique).

La chlorophylle *a* est un pigment indicateur de l'abondance des organismes photosynthétiques, permettant ainsi l'estimation de la production primaire et de la dynamique trophique. À noter que les pigments peuvent aussi provenir du phytoplancton, présent dans la colonne d'eau, qui aurait coulé jusqu'au fond grâce à des conditions favorables.

##### Protocole d'analyse :

Les échantillons pour l'analyse des pigments chlorophylliens ont été conservés dans l'obscurité à une température de -20 °C pour une période de conservation inférieure à deux mois (Leavitt et Hodgson, 2001 ; Reuss et Conley, 2005). La méthode de mesure par fluorimétrie (Holm-Hansen *et al.*, 1965 ; Lorenzen, 1966) a été utilisée selon le protocole modifié de Riaux-Gobin et Klein (1993). Cette méthode permet la mesure de la concentration en chlorophylle *a* (pigment présent chez tous les organismes photosynthétiques, actifs pour la photosynthèse) et en phaeopigments\* (résultats de la dégradation de la chlorophylle, inactifs pour la photosynthèse).

Les pigments ont été extraits en plaçant 2 g de substrat dans 10 ml d'acétone à 90 % pendant 24 h à 4 °C. Après centrifugation des échantillons, la fluorescence du surnageant (qui contient les pigments solubilisés dans l'acétone) a été mesurée avec un fluorimètre (Turner Design 10AU) avant et après acidification à l'acide chlorhydrique. La concentration des pigments a été calculée en microgrammes de pigment par gramme de sédiment sec ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ).

#### 5.2.3.4. Métaux lourds

Définition :

Les métaux lourds (comme le fer, l'aluminium ou le titane) sont des éléments chimiques présents naturellement dans le sédiment marin, dont les concentrations peuvent varier en fonction de forages naturels ou d'origine humaine. Certains métaux peuvent avoir une influence sur la biochimie des organismes, notamment sur leur métabolisme.

Protocole d'analyse :

Les mesures des concentrations en métaux lourds dans les sédiments de surface et profonds ont été effectuées par le laboratoire de Richard Saint-Louis à l'Université du Québec à Rimouski. La méthodologie utilisée pour obtenir les résultats est détaillée dans le chapitre 4.

#### 5.2.3.5. Identification du macro-endobenthos\*

Définition :

Les organismes benthiques correspondent à l'ensemble des organismes qui vivent en relation avec le fond marin. On distingue les organismes végétaux, nommés phytobenthos (algues et plantes aquatiques), des organismes animaux, dit zoobenthos ou faune benthique (vers, mollusques, crustacés, poissons, etc.). Dans le cadre de cette étude, les espèces étudiées sont des macro-invertébrés benthiques (taille de l'individu supérieure à 500 µm). Ces espèces représentent la plus grande part de la biodiversité marine (Snelgrove, 1999 ; Appeltans, 2012). Brunel *et al.* (1998) ont identifié 1 855 taxons\* de macro-invertébrés benthiques dans le golfe du Saint-Laurent.

La plupart des macro-invertébrés benthiques sont sédentaires durant la majorité de leur cycle de vie, ainsi ces espèces sont considérées comme des indicateurs de l'état d'un milieu (Pearson et Rosenberg, 1978 ; Gray, 1979 ; Rosenberg *et al.*, 2004 ; Dauvin *et al.*, 2010). L'étude de la structure des assemblages d'invertébrés benthiques est une approche courante permettant d'évaluer les impacts environnementaux (Pearson et Rosenberg, 1978 ; Clarke et Warwick, 1994 ; Pohle et Thomas, 2001 ; Cranford *et al.*, 2006 ; Drouin *et al.*, 2011 ; Robert *et al.*, 2013). Ces impacts peuvent être l'effet des polluants, d'un enrichissement en matière organique ou d'autres perturbations naturelles ou de nature anthropique.

Protocole d'analyse :

Les organismes benthiques récoltés sur le terrain après tamisage ont été triés à l'aide d'une loupe binoculaire en laboratoire, puis identifiés à l'aide de clés dichotomiques d'identification et d'ouvrages spécialisés en taxonomie. Le niveau d'identification (famille, genre, espèce) est variable selon l'état de préservation des individus et le stade de maturation. Les identifications ont été validées par un expert taxonomiste et les noms des taxons ont été mis en correspondance avec le *World Register of Marine Species* ([www.marinespecies.org](http://www.marinespecies.org)). Le nombre d'individus de chaque espèce a été dénombré et tous les individus de chaque espèce ont été pesés pour obtenir la biomasse totale de l'espèce (précision 0,1 mg). Enfin, les organismes ont été conservés dans une solution de formaldéhyde 4 %.

Les assemblages benthiques ont été décrits à l'aide de l'indice de diversité de Shannon et de l'indice d'équitableté de Piélou (Magurran, 1988). Ces indices, couramment utilisés lors d'études écologiques, prennent en compte la totalité des espèces ainsi que leurs abondances.

L'indice de Shannon mesure la richesse des communautés en prenant en compte le nombre d'espèces et l'abondance des individus au sein de chacune de ces espèces : lorsqu'il est élevé, la communauté est riche et possède de nombreuses espèces différentes, et inversement lorsqu'il est faible la communauté est peu diversifiée (Grall et Coic, 2005). Cet indice est souvent accompagné de l'indice de Piélou.

L'indice de Piélou estime la dominance des espèces dans la communauté : un indice élevé (proche de 1) correspond à une communauté où l'abondance de chaque espèce est identique (pas d'espèces dominantes), tandis qu'un indice faible (proche de 0) montre que certaines espèces sont plus abondantes que d'autres et dominent la communauté (Grall et Coic, 2005).

## 5.2.4. Traitement statistique des données

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

### 5.2.4.1. Campagne 2014

Des analyses de variance par permutation (PERMANOVA, 9999 permutations ; Anderson, 2001) ont été réalisées pour évaluer les différences entre les sites références et potentiellement perturbés. L'homogénéité des variances entre les groupes a été vérifiée au moyen de tests de Bartlett et de tests PERMDISP (Anderson, 2001 ; Quinn et Keough, 2002). Les variables ont été transformées au besoin afin de respecter les conditions d'application de chaque analyse.

Les facteurs des modèles utilisés sont : *Traitement* (facteur fixe, à deux niveaux : potentiellement perturbé et référence) et *Site* (facteur aléatoire, niché dans *Traitement*, à quatre niveaux : 1, 2, 3 ou 4) ; avec 5 réplicats par site. Des comparaisons *a posteriori* entre les groupes ont été réalisées au moyen du test de Tukey.

Dans un premier temps, plusieurs PERMANOVAs univariées ont été effectuées pour tester la significativité des groupes selon différentes variables (le contenu en matière organique, le type de sédiment, les concentrations en métaux lourds et les indices de diversité endobenthique). Les matrices de similarité pour chaque PERMANOVA ont été calculées en utilisant la distance euclidienne entre les stations.

Une PERMANOVA est un test statistique utilisé pour tester la réponse simultanée d'une ou plusieurs variable(s) à un ou plusieurs facteur(s) avec des méthodes de permutation (Anderson, 2005).

Le test de Tukey permet de déterminer les différences significatives entre les moyennes de groupes dans une analyse de variance (Statistica, 2016a).

La distance euclidienne est une distance géométrique dans un espace multidimensionnel défini par les variables (Statistica, 2016b).

Afin d'estimer le nombre total d'espèces présentes dans la baie, une courbe d'accumulation a été établie (Clarke et Gorley, 2006). Une PERMANOVA multivariée a ensuite été réalisée selon le même plan statistique sur les assemblages benthiques, au moyen des distances de Bray-Curtis sur les abondances de chaque espèce, puis à partir des données transformées en présence/absence (9999 permutations ; Anderson, 2001). Un cadrage multidimensionnel non-métrique (nMDS) et une procédure CLUSTER ont été réalisés pour visualiser les différences entre les assemblages. La contribution de chaque taxon aux groupes identifiés a été calculée avec une procédure SIMPER (Clarke et Warwick, 2001 ; Clarke et Gorley, 2006).

Bray-Curtis : Mesure permettant de calculer la dissimilarité entre deux stations, en considérant les abondances des espèces présentes à chaque station.

SIMPER est une routine permettant de décrire les variables qui contribuent le plus à la similarité entre les groupes de stations obtenus par les nMDS et cluster.

Le nMDS représente les stations dans un espace non-métrique en calculant une distance entre celles-ci. La routine produit une figure, où les stations les plus similaires sont celles qui sont proches les unes des autres. Les nMDS sont très fréquemment associés à une analyse de clustering, traduit en français par classification hiérarchique. Il y a plusieurs méthodes pour ces procédures, mais leur point commun est qu'elles permettent de détecter des groupes de stations selon la similarité entre leurs paramètres (espèces, variables environnementales, etc.)..

#### 5.2.4.2. Campagnes 2016 et 2017

Dans un premier temps, plusieurs cartes ont été réalisées afin de visualiser la variation spatiale des paramètres du sédiment et des indices de diversité à BSI, MR, CPC et BDA.

Une courbe d'accumulation, qui représente le nombre d'espèces échantillonnées en fonction de l'effort d'échantillonnage (Marcon, 2015), a été calculée pour étudier la qualité de l'échantillonnage de chaque campagne. Afin d'étudier la similarité entre les stations, une classification hiérarchique CLUSTER (suivie d'un test SIMPROF, 9999 permutations) a été effectuée sur les assemblages benthiques (abondances et présence/absence). La contribution des taxons à la formation des groupes mis en évidence a été calculée à l'aide de la procédure SIMPER.

Les combinaisons de variables environnementales qui prédisent le mieux la variation des communautés benthiques dans la baie de Sept-Îles ont été identifiées avec un test à permutation multiple par étapes avec modèle linéaire (DistLM, 9999 permutations ; McArdle et Anderson, 2001). Les variables ont été sélectionnées séquentiellement en choisissant le modèle avec le meilleur R<sup>2</sup> ajusté ou en utilisant le Akaike Information Criteria (AIC).

Une analyse de redondance dbRDA (Anderson *et al.*, 2008) a été effectuée pour visualiser la différence entre les groupes et la pertinence des variables environnementales à expliquer le modèle de distribution. Plusieurs régressions simples ont ensuite été réalisées pour étudier l'influence des variables sélectionnées par le DistLM sur les indices de diversité des communautés. La normalité et la colinéarité des variables environnementales ont été évaluées à partir d'un schéma Draftsman, et des transformations ont été effectuées au besoin (Anderson *et al.*, 2008).

### 5.2.4.3. Comparaison des campagnes 2014, 2016 et 2017

Plusieurs PERMANOVAs ont été effectuées pour tester l'homogénéité des résultats des trois campagnes. La première analyse a comparé les paramètres du sédiment des trois campagnes, et comprend un facteur : *Campagne* (facteur fixe, à 3 niveaux : 2014, 2016 et 2017). Des tests *a posteriori* de Tukey ont été effectués pour comparer chaque couple de campagnes. La seconde analyse a comparé les assemblages d'espèces entre les campagnes 2014 et 2017 avec le facteur *Campagne* (facteur fixe, à 2 niveaux : 2014 et 2017), et la troisième entre ceux des campagnes 2016 et 2017 avec le facteur *Campagne* (facteur fixe, à 2 niveaux : 2016 et 2017). Cette distinction a été effectuée car chaque campagne n'a pas pris en compte les mêmes fractions de taille pour les communautés (supérieures à 500 µm pour les campagnes 2014 et 2017, supérieures à 1 m pour la campagne 2016).

## 5.3. Résultats et discussion

### 5.3.1. Campagne 2014

#### 5.3.1.1. Caractérisation des sédiments

##### Matière organique

En 2014, la valeur moyenne du contenu en matière organique des sédiments a été de  $1,37\% \pm 1,47\%$  (figure 5-10). La PERMANOVA met en évidence une différence significative du contenu en matière organique selon les sites et globalement, les valeurs sont plus élevées dans les sites potentiellement perturbés (tableau 5-1). Les résultats des tests *a posteriori* indiquent la présence d'une forte similarité entre les sites, sauf pour P4 et R2 (figure 5-10).

Le contenu plus important en matière organique dans les sédiments aux sites potentiellement perturbés que dans les sites références pourrait être attribué à plusieurs facteurs. Des analyses complémentaires à la campagne 2014 ont été recommandées afin de déterminer l'importance et la source des apports en matière organique (terrigène, anthropique, marine) et l'hydrodynamisme dans la baie de Sept-Îles. D'autre part, la variance plus élevée dans les sites potentiellement perturbés pourrait indiquer une hétérogénéité plus importante du milieu, comparativement aux stations des sites références plus semblables.

Tableau 5-1 : Résultats de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) testant l'effet du Traitement et du Site (Traitement) sur le contenu en matière organique des sédiments des stations échantillonnées en 2014

Concentration en matière organique				
	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Traitement	1	32,170	11,9850	<b>0,0313</b>
Site (Traitement)	6	16,105	2,4227	<b>0,0069</b>
Résidus	32	35,452		
Total	39	83,727		

dl = degré de liberté ; SC = somme des carrés

Les valeurs significatives sont présentées en caractère gras.

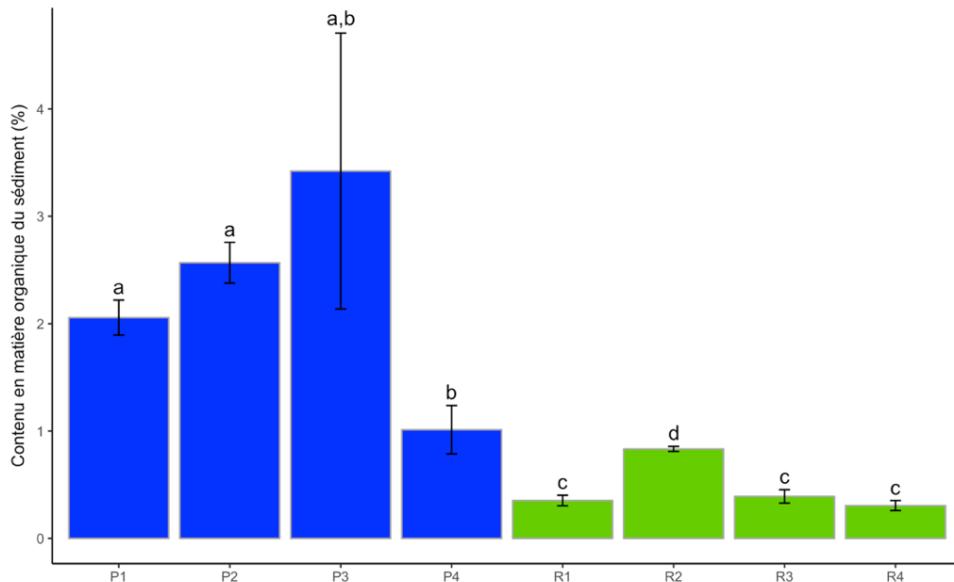


Figure 0-10 : Contenu en matière organique (%), moyenne  $\pm$  erreur-type) des sédiments prélevés aux sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et aux sites références (R1, R2, R3, R4)

Les lettres représentent les groupes significatifs de sites, mis en évidence par le test *a posteriori* de Tukey.

### Granulométrie

Les sédiments des stations de la campagne 2014 sont majoritairement de type vase et argile (particules < 63 µm), avec peu de sable et de gravier (figure 5-11). Les PERMANOVAs réalisées sur ces trois variables indépendamment (vase, sable, gravier) montrent qu'il existe une légère variation de la composition des sédiments d'un site à l'autre au niveau de leur teneur en vase et en sable. La proportion en gravier aux sites potentiellement perturbés est significativement plus faible que celle des sites références (tableau 5-2).

De façon générale, les sites potentiellement perturbés semblent plus uniformes et composés de sédiments plus fins comparativement aux sites de référence. Les tests *a posteriori* mettent en évidence une forte similarité entre les sites potentiellement perturbés, et une similarité un peu plus faible des sites références (compte tenu de la variabilité élevée aux sites R2 et R3).

La présence abondante de petites particules aux sites potentiellement perturbés peut s'expliquer par plusieurs facteurs, notamment par un hydrodynamisme faible à l'intérieur de la baie. Les sites références, ayant plus de grosses particules (en particulier aux sites R2 et R3), pourraient ainsi être plus exposés aux courants marins, mais la grande variabilité des résultats pour ces sites ne permet pas d'avoir une conclusion robuste.

Tableau 5-2 : Résultats de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) testant l'effet du Traitement et du Site (Traitement) sur les types de sédiments des stations échantillonnées en 2014

Proportion de vase et d'argile				
	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Traitement	1	0,5338	1,9726	0,1655
Site(Traitement)	6	1,6238	2,9064	<b>0,0195</b>
Résidus	32	2,9796		
Total	39	5,1372		
Proportion de sable				
	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Traitement	1	0,3873	1,5784	0,4272
Site(Traitement)	6	1,4722	2,5064	<b>0,0415</b>
Résidus	32	3,1327		
Total	39	83,7270		
Proportion de gravier				
	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Traitement	1	0,0118	1,8520	<b>0,0293</b>
Site(Traitement)	6	0,0381	1,1566	0,1817
Résidus	32	0,1744		
Total	39	0,2243		

dl = degré de liberté ; SC = somme des carrés

Les valeurs significatives sont présentées en caractère gras.

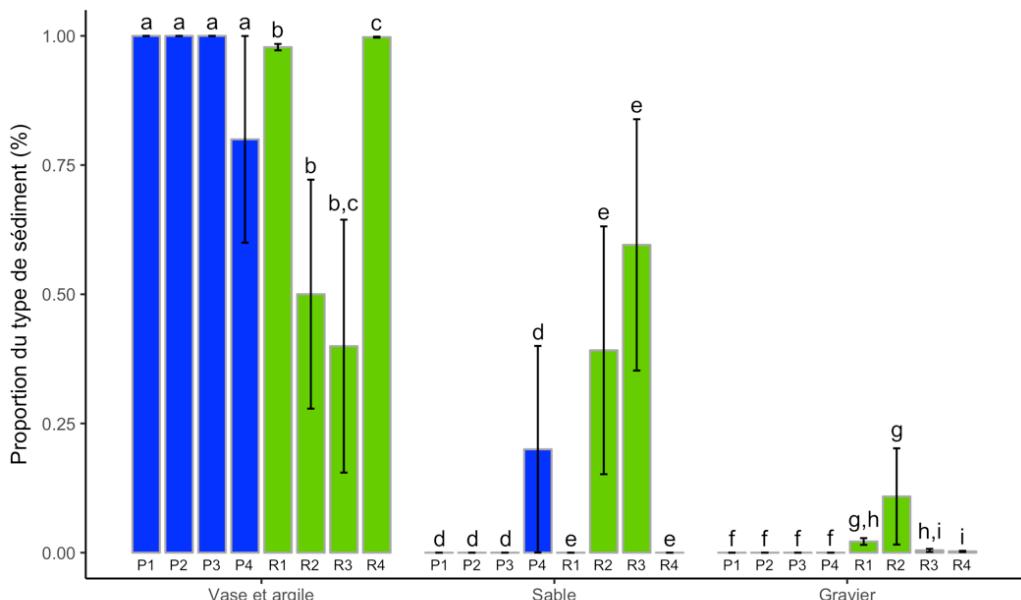


Figure 0-11 : Proportion des différentes classes de taille (%, moyenne ± erreur-type) des sédiments des sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et références (R1, R2, R3, R4)

Les lettres représentent les groupes significatifs de sites, mis en évidence par le test *a posteriori* de Tukey.

## Métaux lourds

L'analyse sur les métaux a été focalisée sur ceux ayant fait l'objet d'évaluations de toxicité environnementale, à savoir l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le plomb (Pb) et le zinc (Zn) (Environnement Canada et MDDELCC, 2007) ; le fer (Fe) et le manganèse (Mn) ont également été considérés.

Les figures 5-12, 5-13, 5-14 et 5-15 présentent les moyennes des concentrations de ces métaux à chaque site en mg.kg<sup>-1</sup>.

Les PERMANOVAs réalisées sur les concentrations de chaque métal détectent une différence entre les sites potentiellement perturbés et les sites références uniquement pour les concentrations en cuivre et en zinc (tableau 5-3).

Les concentrations en métaux sont globalement plus élevées dans les sites potentiellement perturbés que dans les sites références. Des différences ont été détectées entre les sites échantillonnés pour chaque traitement pour la plupart des métaux sauf le fer, le mercure et le zinc (tableau 5-3).

Les tests *a posteriori* de Tukey indiquent que plusieurs groupes de sites pourraient être établis :

- les sites P1 et P2 d'une part, et P3 et P4 d'autre part, selon leurs concentrations en arsenic, chrome, manganèse et plomb,
- les sites R1 et R4 d'une part, et R2 et R3 d'autre part, selon leurs concentrations en arsenic, cadmium, chrome, fer, manganèse.

La similarité entre les groupes précédents peut être expliquée par la proximité spatiale des sites : les sites P1 et P2 sont en face de l'Aluminerie Alouette et au site de la Société ferroviaire et portuaire de Pointe-Noire, P3 et P4 en face de Sept-Îles et de la compagnie minière IOC, R1 et R4 sont sur les côtes à l'est et à l'ouest de la ville, et R2 et R3 sont situés dans l'archipel.

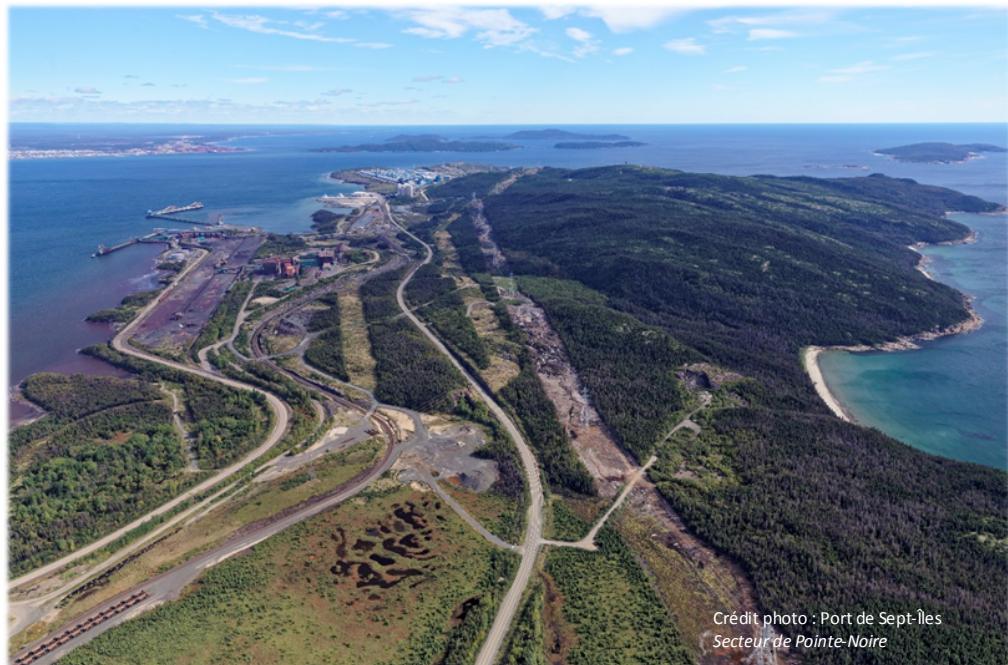


Tableau 5-3 : Résultats des analyses de variance par permutation (PERMANOVA) testant l'effet du Traitement et du Site (Traitement) sur les concentrations en métaux lourds des sédiments des stations échantillonnées en 2014

**Concentration en arsenic**

	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Traitement	1	15,625	3,2351	0,2064
Site(Traitement)	6	28,979	8,9962	<b>0,0001</b>
Résidus	32	17,180		
Total	39	61,784		

**Concentration en cadmium**

	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Traitement	1	0,0090	2,0930	0,2013
Site(Traitement)	6	0,0258	3,1444	<b>0,0130</b>
Résidus	32	0,0438		
Total	39	0,0786		

**Concentration en chrome**

	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Traitement	1	2 163,8	1,0085	0,2848
Site(Traitement)	6	12 874,0	3,5791	<b>0,0076</b>
Résidus	32	19 184,0		
Total	39	34 222,0		

**Concentration en cuivre**

	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Traitement	1	1 739,80	23,8520	<b>0,0278</b>
Site(Traitement)	6	437,63	3,0807	<b>0,0146</b>
Résidus	32	757,64		
Total	39	2 935,00		

**Concentration en fer**

	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Traitement	1	$1,096 \times 10^9$	0,8960	0,3173
Site(Traitement)	6	$7,337 \times 10^9$	1,2745	0,2829
Résidus	32	$3,070 \times 10^{10}$		
Total	39	$3,914 \times 10^{10}$		

**Concentration en manganèse**

	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Traitement	1	$1,090 \times 10^7$	3,7610	0,1474
Site(Traitement)	6	$1,739 \times 10^7$	6,2715	<b>0,0001</b>
Résidus	32	$1,479 \times 10^7$		
Total	39	$4,308 \times 10^7$		

**Concentration en mercure**

	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Traitement	1	0,0084	3,3775	0,1425
Site(Traitement)	6	0,0149	1,6586	0,0783
Résidus	32	0,0480		
Total	39	0,0714		

**Concentration en plomb**

	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Traitement	1	155,240	9,0124	0,0573
Site(Traitement)	6	103,350	6,9227	<b>0,0002</b>
Résidus	32	79,621		
Total	39	338,210		

**Concentration en zinc**

	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Traitement	1	11 381,0	23,2120	<b>0,0308</b>
Site(Traitement)	6	2 941,8	1,9862	0,0902
Résidus	32	7 899,1		
Total	39	22 221,0		

dl = degré de liberté ; SC = somme des carrés

Les valeurs significatives sont présentées en caractère gras.

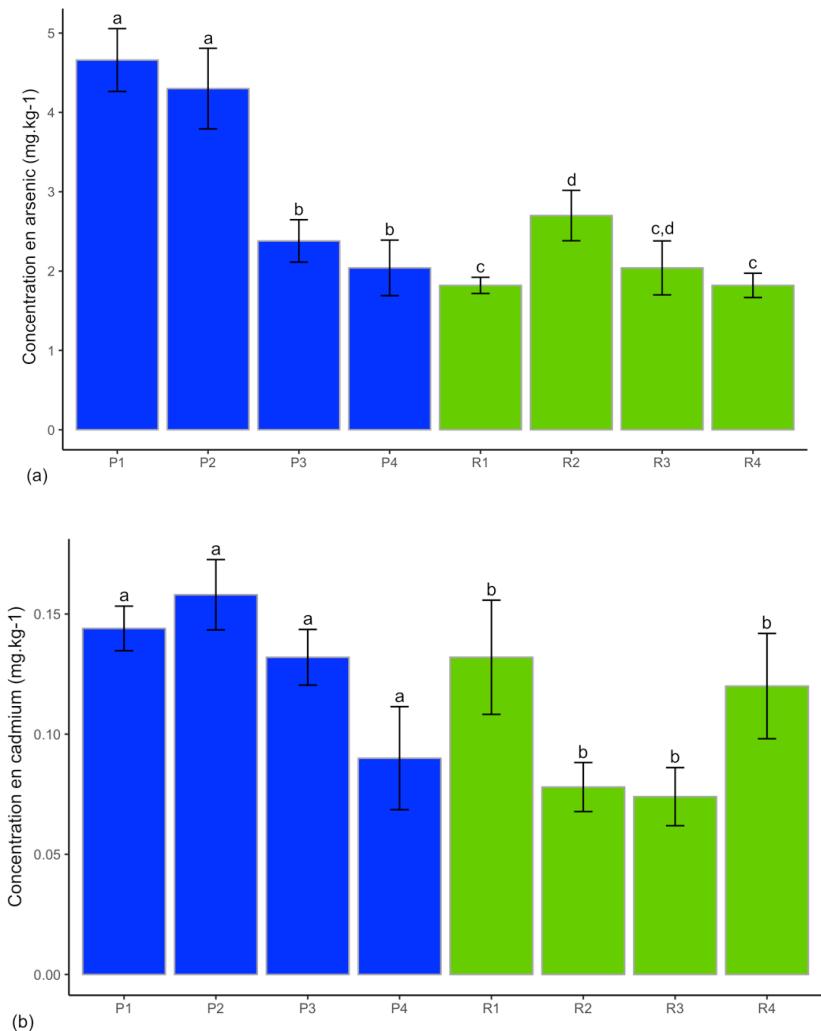


Figure 0-12 : Concentrations en arsenic (a), cadmium (b) ( $\text{mg.kg}^{-1}$ , moyenne  $\pm$  erreur-type) des sédiments des sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et références (R1, R2, R3, R4)

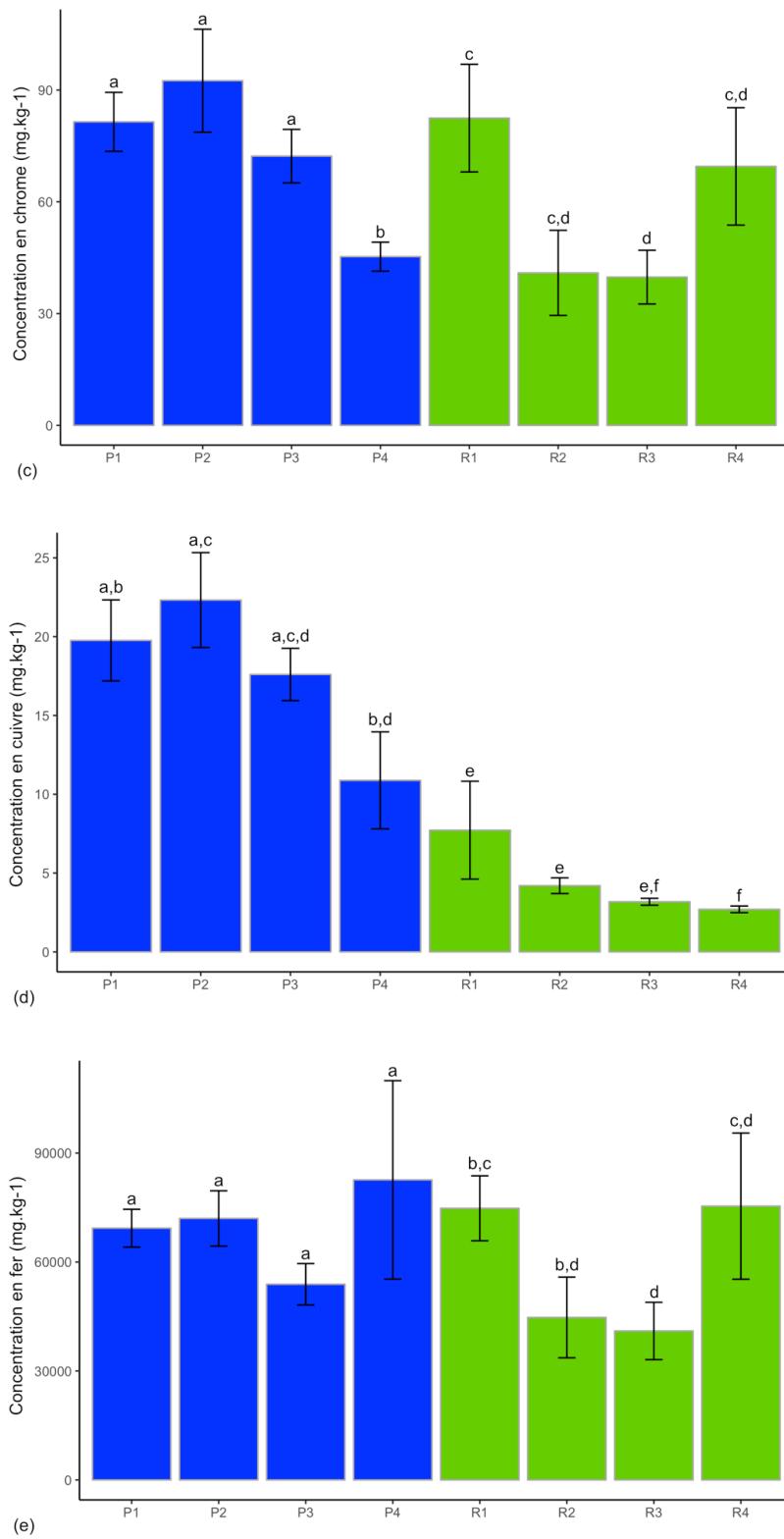


Figure 0-13 : Concentrations en chrome (c), cuivre (d), fer (e) ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , moyenne  $\pm$  erreur-type) des sédiments des sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et références (R1, R2, R3, R4)

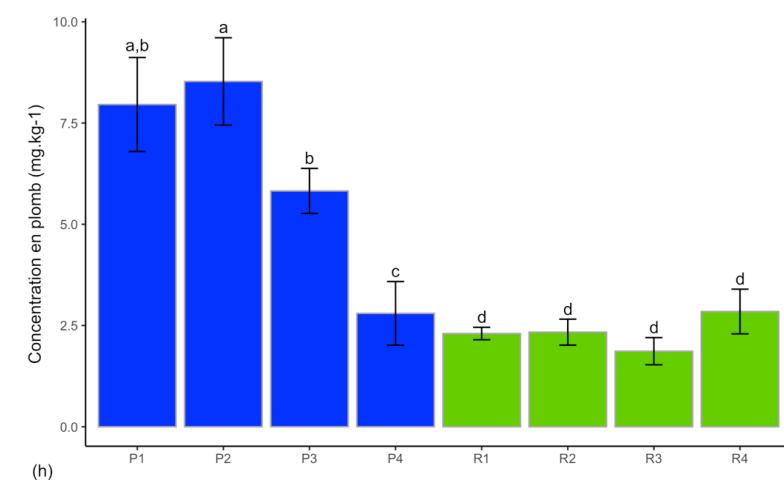
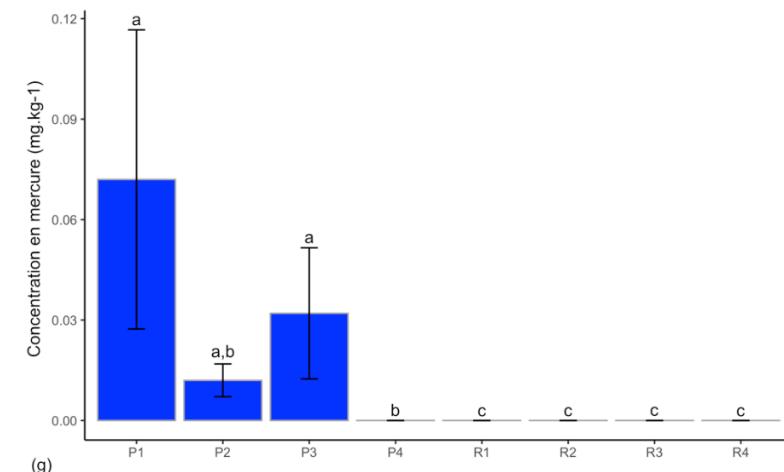
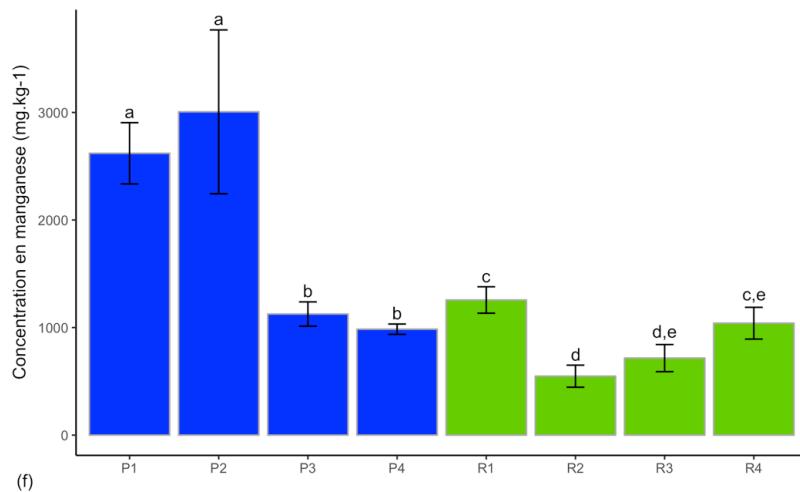


Figure 0-14 : Concentrations en arsenic manganèse (f), mercure (g), plomb (h) ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , moyenne  $\pm$  erreur-type) des sédiments des sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et références (R1, R2, R3, R4)

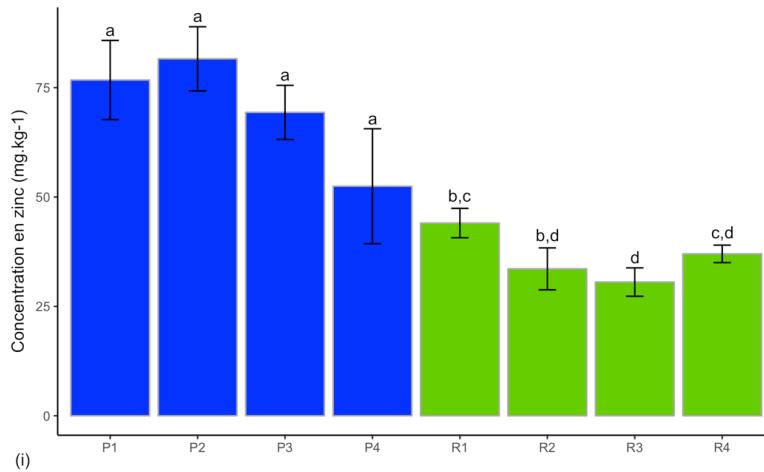


Figure 0-15 : Concentrations en zinc (i) ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , moyenne  $\pm$  erreur-type) des sédiments des sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et références (R1, R2, R3, R4)

Les lettres représentent les groupes significatifs de sites, mis en évidence par le test *a posteriori* de Tukey.

### 5.3.1.2. Caractérisation de la faune benthique

#### Indices de diversité

L'échantillonnage de 2014 a permis de répertorier 159 taxons, répartis dans 12 phylums\*. Leur contribution en termes d'abondance (quantité) et de biomasse (poids) est présentée dans le tableau 5-4. Par échantillon, la richesse spécifique moyenne est de  $21 \pm 8$  taxons, l'abondance moyenne de  $641 \pm 703^3$  individus et la biomasse moyenne de  $37,3 \pm 74,7$  g. L'indice de diversité de Shannon moyen est de  $1,84 \pm 0,41$  et celui d'équitabilité de Piélou est de  $0,64 \pm 0,16$ .

Tableau 5-4 : Abondance et biomasse totales des phyla présents dans les échantillons collectés à BSI en 2014

Phylum	Abondance (individus)	Biomasse (g)
Annelida	21 495 (83,78 %)	28,65 (1,92 %)
Arthropoda	1 641 (6,40 %)	2,59 (0,17 %)
Bryozoa	30 (0,12 %)	0,13 (0,01 %)
Chaetognatha	1 (< 0,01 %)	< 0,01 (< 0,01 %)
Chordata	7 (0,03 %)	5,49 (0,37 %)
Cnidaria	82 (0,32 %)	0,39 (0,03 %)
Echinodermata	143 (0,56 %)	1 442,84 (96,84 %)
Hemichordata	2 (0,01 %)	0,04 (< 0,01 %)
Mollusca	1 104 (4,30 %)	4,96 (0,33 %)
Nemertea	5 (0,02 %)	< 0,01 (< 0,01 %)
Phoronida	1 140 (4,44 %)	4,78 (0,32 %)
Platyhelminthes	5 (0,02 %)	< 0,01 (< 0,01 %)
<b>Total</b>	<b>25 655</b>	<b>1 489,88</b>

La contribution de chaque phylum à l'abondance et la biomasse totales est indiquée.

<sup>3</sup> L'écart-type (ET) mesure la dispersion d'une série de valeurs, ce qui est utile pour la caractérisation de sa distribution. D'un point de vue statistique, l'ET est calculé en prenant en compte la différence entre chaque valeur et la moyenne de sa série. Avoir un ET supérieur à la moyenne signifie que la série de données est très dispersée, i.e. possède une grande variabilité et/ou est influencée par des valeurs extrêmes très élevées/faibles comparativement à la moyenne.

La classification des taxons selon leur coefficient de fréquence (Guille, 1970) révèle que 11 taxons sont dits « courants » (fréquence supérieure à 50 %), 46 taxons sont « constants » à travers les stations (entre 11 et 49 %) et 102 taxons sont « rares » (inférieure à 10 %).

Cet important nombre de taxons rares est conséquent à la courbe d'accumulation d'espèces présentée à la figure 5-16.

Cette courbe n'atteint pas de plateau, ce qui indique que d'autres espèces restent à identifier dans la baie de Sept-Îles. Un effort d'échantillonnage complémentaire a été réalisé en 2016 et 2017 permettant d'obtenir une vision plus juste des communautés benthiques.

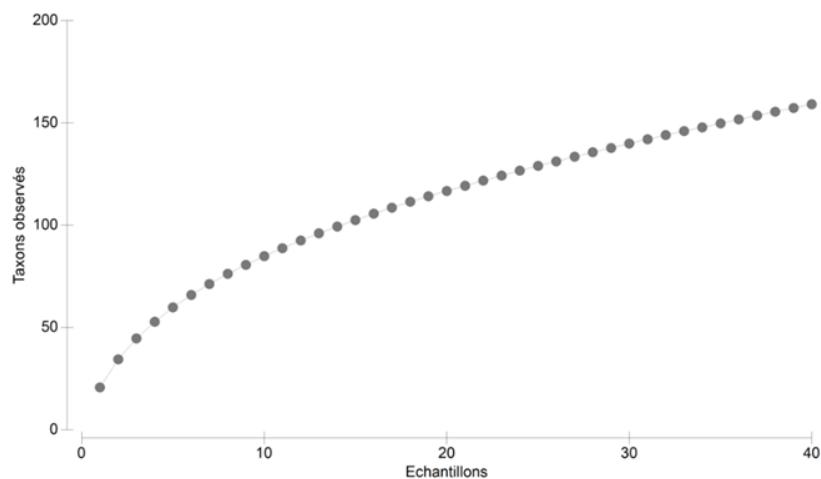


Figure 0-16 : Courbe d'accumulation des taxons échantillonés dans la baie de Sept-Îles en 2014

Les taxons qui possèdent la plus grande abondance par échantillon sont *Bipalponephthys neotena* (figure 5-17) (33,2 % des individus échantillonés), *Nephtys* sp. (26,9 %) (figure 5-18), *Scoloplos cf. armiger/acutus* (figure 5-19) (5,1 %), *Prionopsio steenstrupi* (4,5 %) et *Phoronida* (figure 5-20) (4,4 %).

Il est à noter que les individus de *Nephtys* sp. étaient majoritairement au stade juvénile. Leurs branchies et parapodes n'étant pas développés, l'identification jusqu'à l'espèce de ces individus est impossible (Pettibone, 1963).

Cependant, des individus matures de *Nephtys caeca* et de *Nephtys longosetosa* ont été identifiés, ce qui permet de supposer que les juvéniles de *Nephtys* sp. appartiennent probablement à ces espèces.

À propos des individus de *Scoloplos cf. armiger/acutus*, il est important de noter que l'espèce n'est pas différenciable entre *S. armiger* et *S. acutus* avec les méthodes de taxonomie traditionnelle (comm. A. Zhdan, 2013, Moscow State University).

Enfin, la complexité anatomique des *Phoronida* ne permet pas de réaliser une identification précise jusqu'à l'espèce sans expertise extérieure.



Figure 0-17 : *Bipalponephthys neotena*<sup>4</sup>



Figure 0-18 : *Nephtys* sp.<sup>5</sup>



Figure 0-19 : *Scoloplos* sp.<sup>6</sup>

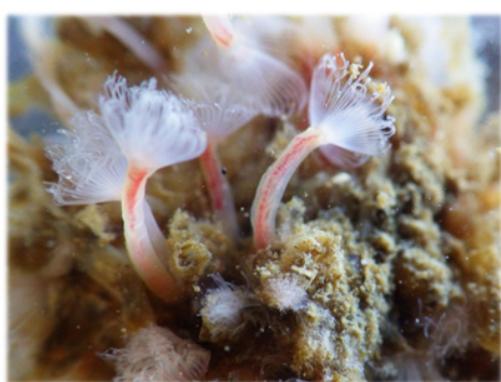


Figure 0-20 : *Phoronida (Phoronis ijimai)*<sup>7</sup>

Les valeurs moyennes des indices de diversité (richesse spécifique, abondance, biomasse, diversité de Shannon, équitabilité de Piélou) à chaque site sont présentées aux figures 5-21 et 5-22. Les PERMANOVAs réalisées sur les indices de diversité ont montré que la biomasse des organismes benthiques est significativement différente entre les sites potentiellement perturbés et les sites références (tableau 5-5). La richesse spécifique et l'abondance sont à la limite du seuil de significativité, ce qui laisse supposer une faible influence du facteur Traitement sur ces variables malgré tout. Aucune différence au niveau des indices de Shannon et de Piélou n'a été détectée entre les traitements ou les sites. Les tests *a posteriori* indiquent que les sites P1, P2 et P3 présentent des similarités significatives en termes de richesse spécifique, d'abondance et de biomasse, en revanche aucun autre groupe particulier ne se distingue pour les sites références.

La différence significative de biomasse entre les sites potentiellement perturbés et les sites références peut s'expliquer par la présence exclusive de l'oursin plat *Echinarachnius parma* dans les sites références. Cette espèce représente à elle seule 96,8 % de la biomasse totale des organismes échantillonnés (tableau 5-4). Les espèces présentes dans les sites potentiellement perturbés sont en général de petite taille, et donc avec une faible biomasse.

<sup>4</sup> <https://www.gbif.org/occurrence/1413897350>

<sup>5</sup> <http://mglebrusc.free.fr/textes/la%20mer/Faune/nephtys.html>

<sup>6</sup> [http://beta.boldsystems.org/index.php/TaxBrowser\\_Taxonpage?taxid=82421](http://beta.boldsystems.org/index.php/TaxBrowser_Taxonpage?taxid=82421)

<sup>7</sup> <https://www.inaturalist.org/photos/1163044>

Tableau 5-5 : Résultats des analyses de variance par permutation (PERMANOVA) testant l'effet du Traitement et du Site (Traitement) sur les indices de diversité des communautés benthiques des stations échantillonnées en 2014

	Richesse spécifique			
	dl	SC	F-ratio	p (perm)
Traitement	1	864,9	6,7377	0,0544
Site(Traitement)	6	770,2	4,9972	<b>0,0007</b>
Résidus	32	822,0		
Total	39	2 457,1		
	Abondance			
	dl	SC	F-ratio	p (perm)
Traitement	1	$9,959 \times 10^6$	8,8951	0,0846
Site(Traitement)	6	$6,718 \times 10^6$	13,7020	<b>0,0002</b>
Résidus	32	$2,615 \times 10^6$		
Total	39	$1,929 \times 10^7$		
	Biomasse			
	dl	SC	F-ratio	p (perm)
Traitement	1	50 669	11,623	<b>0,0312</b>
Site(Traitement)	6	26 157	0,990	0,4469
Résidus	32	140 900		
Total	39	217 800		
	Indice de Shannon			
	dl	SC	F-ratio	p (perm)
Traitement	1	0,0170	0,0903	0,7756
Site(Traitement)	6	1,1270	1,0922	0,3867
Résidus	32	5,5033		
Total	39	6,6472		
	Indice de Piérou			
	dl	SC	F-ratio	p (perm)
Traitement	1	0,0852	1,8050	0,2310
Site(Traitement)	6	0,2797	2,5473	<b>0,0388</b>
Résidus	32	0,5857		
Total	39	0,9496		

dl = degré de liberté ; SC = somme des carrés

Les valeurs significatives sont présentées en caractère gras.

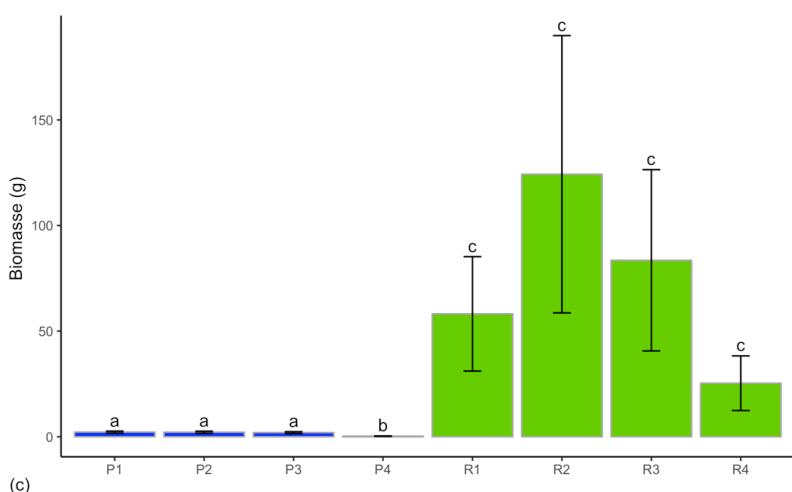
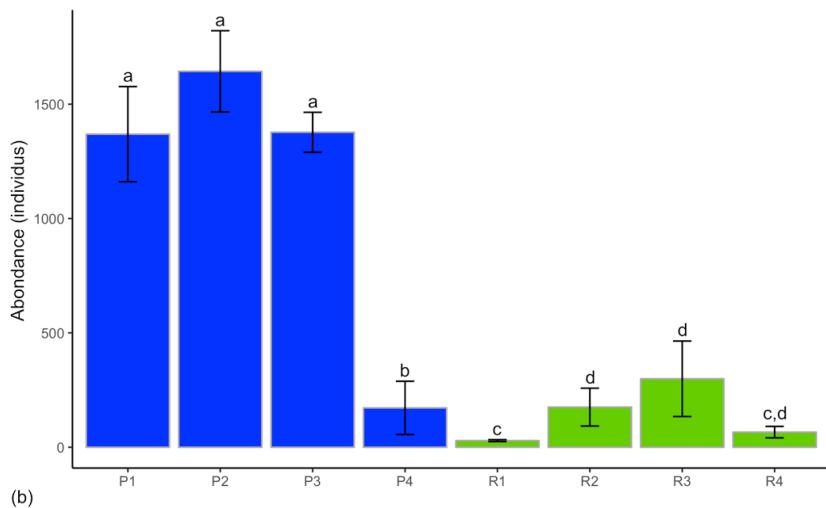
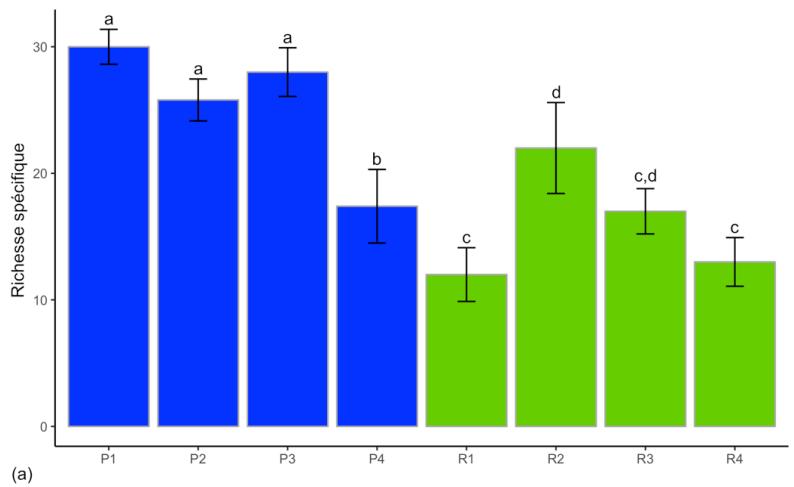


Figure 0-21 : Valeur de la richesse spécifique (a), l'abondance (b) et la biomasse (c), (moyenne  $\pm$  erreur-type) des communautés benthiques des sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et références (R1, R2, R3, R4)

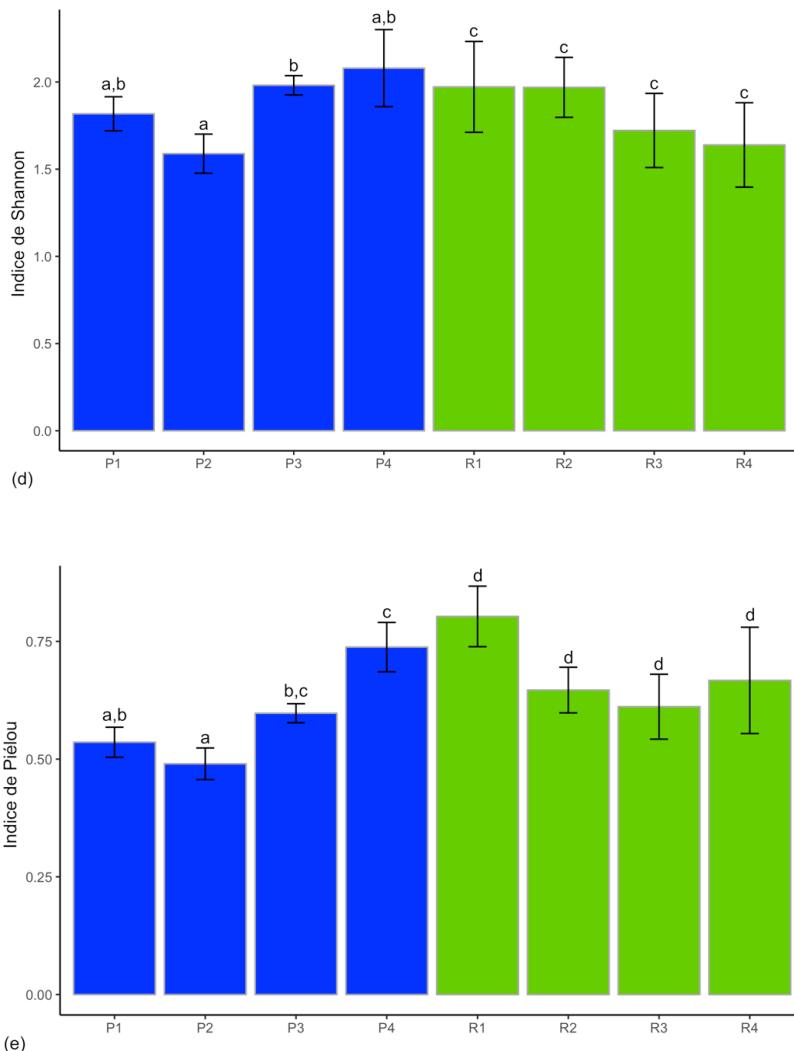


Figure 0-22 : Indices de Shannon (d) et de Piérou (e) (moyenne  $\pm$  erreur-type) des communautés benthiques des sites potentiellement perturbés (P1, P2, P3, P4) et références (R1, R2, R3, R4)

Les lettres représentent les groupes significatifs de sites, mis en évidence par le test *a posteriori* de Tukey.

### Ensemble des communautés

La PERMANOVA multivariée, qui a pris en compte la totalité de l'assemblage benthique, a été effectuée sur les données d'abondance (transformées par le logarithme) et sur la présence/absence des organismes. Les relations entre les stations, calculées avec les distances de Bray-Curtis, peuvent être visualisées sur le dendrogramme issu de l'analyse CLUSTER de la figure 5-23. Les résultats de la PERMANOVA sont compilés dans le tableau 5-6.

Une différence significative entre les sites potentiellement perturbés et références a été détectée pour les abondances et les présences/absences. Ce résultat peut aussi être observé globalement avec les analyses CLUSTER et SIMPER. Les tests *a posteriori* montrent que les couples de sites P1/P2, R1/R3, R1/R4 et R2/R3 forment des groupes significatifs (tableau 5-7). Les résultats des analyses faites sur les abondances et les présences/absences sont semblables, ce qui indique que les différences

d'assemblages sont dues à la fois aux abondances des taxons et à la composition spécifique de ces assemblages.

*Tableau 5-6 : Résultats de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) multivariée testant l'effet du Traitement et du Site (Traitement) sur les assemblages benthiques des stations échantillonnées en 2014 (logarithme des abondances ou présence/absence)*

	Abondances (logarithme)			
	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Traitement	1	32 272	6,9796	<b>0,0290</b>
Site(Traitement)	6	27 743	2,6235	<b>0,0001</b>
Résidus	32	56 399		
Total	39	116 410		
	Présences/absences			
	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Traitement	1	20 453	5,5912	<b>0,0282</b>
Site(Traitement)	6	21 948	2,2915	<b>0,0001</b>
Résidus	32	51 083		
Total	39	93 484		

dl = degré de liberté ; SC = somme des carrés

Les valeurs significatives sont présentées en caractère gras.

*Tableau 5-7 : Résultats des tests a posteriori de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) multivariée testant l'effet du Traitement et du Site (Traitement) sur les assemblages benthiques des stations échantillonnées en 2014 (logarithme des abondances ou présence/absence)*

	Abondances (logarithme)		Présences/absences	
	t	p(perm)	t	p(perm)
P1 – P2	1,0411	0,3563	0,9968	0,4882
P1 – P3	1,5688	<b>0,0175</b>	1,4949	<b>0,0244</b>
P1 – P4	2,0433	<b>0,0076</b>	1,8388	<b>0,0073</b>
P2 – P3	1,8951	<b>0,0092</b>	1,8515	<b>0,0084</b>
P2 – P4	2,1418	<b>0,0070</b>	1,8973	<b>0,0082</b>
P3 – P4	2,2429	<b>0,0081</b>	2,0366	<b>0,0086</b>
R1 – R2	1,4857	<b>0,0083</b>	1,6120	<b>0,0070</b>
R1 – R3	1,3281	0,0502	1,2459	0,0630
R1 – R4	1,1112	0,2204	1,1337	0,2010
R2 – R3	1,1180	0,2143	1,2267	0,1296
R2 – R4	1,7828	<b>0,0074</b>	1,6854	<b>0,0081</b>
R3 – R4	1,3940	<b>0,0152</b>	1,1387	0,2017

Les valeurs significatives sont présentées en caractère gras.

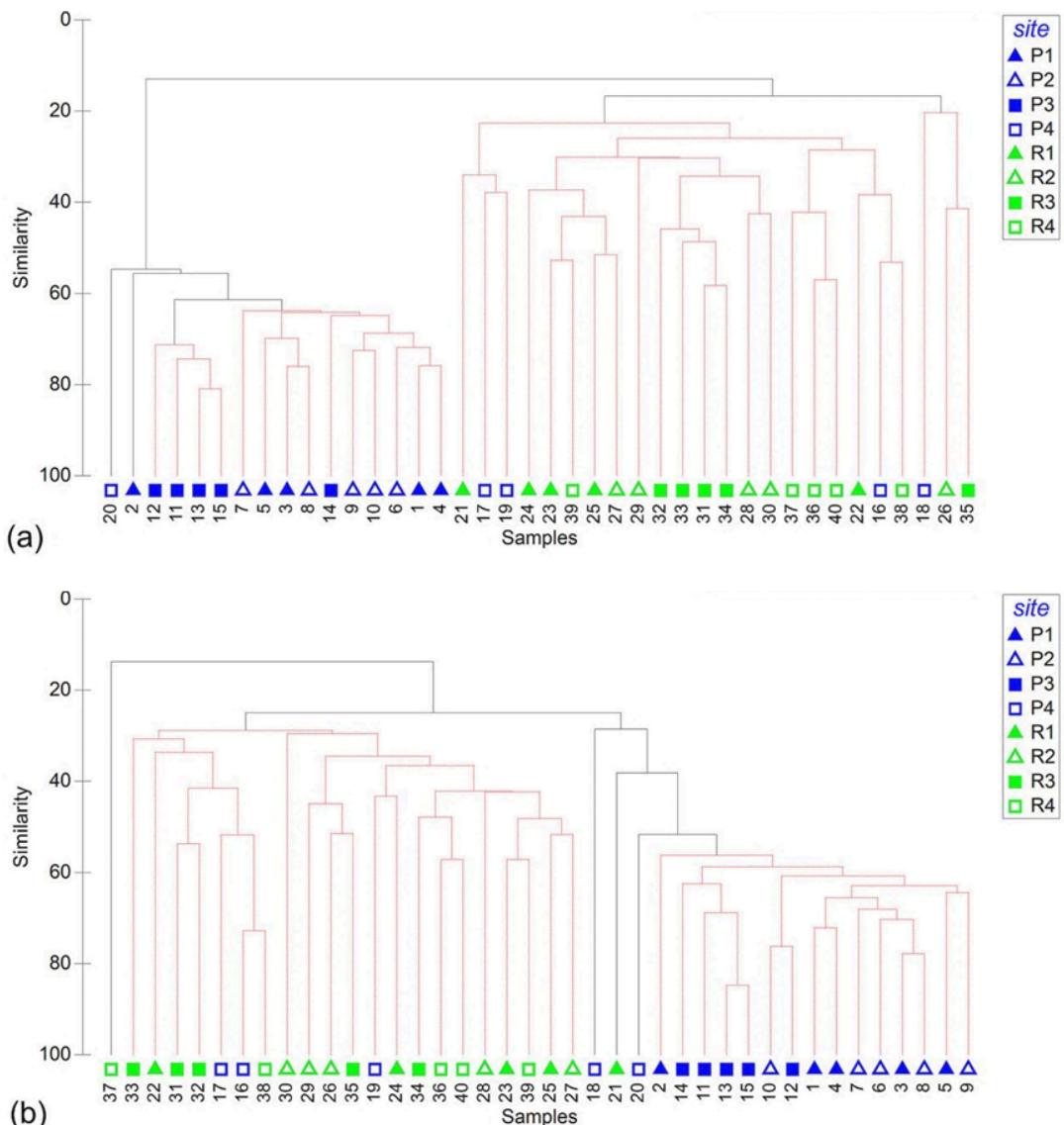


Figure 0-23 : Dendrogrammes des stations échantillonnées en 2014, basés sur les distances de Bray-Curtis calculées avec une routine CLUSTER sur le logarithme des abondances des organismes benthiques (a) et sur leur présence/absence (b)

Les lignes rouges correspondent aux résultats des analyses SIMPROF.

La procédure SIMPER révèle que le polychète *Bipalponephthys neotena* est le taxon qui contribue le plus à la dissimilarité entre les sites potentiellement perturbés et références (tableau 5-8). Cette espèce a été retrouvée en grand nombre dans la baie des Chaleurs, sur d'anciens sites de décharge suggérant un style de vie opportuniste et montrant une grande résistance à l'augmentation des concentrations résultant des activités anthropiques (Pocklington, 1989). Le polychète *Scoloplos armiger* quant à lui est un bon indicateur de pollution dans un milieu du fait de sa résistance aux faibles concentrations d'oxygène (Pocklington, 1989). Il est souvent considéré comme un indicateur de la seconde phase de succession des espèces dans le modèle de Pearson & Rosenberg (1978), tout comme le polychète *Prionospio steenstrupi*.

À noter que les taxons qui contribuent le plus à la dissimilarité entre les sites sont plus abondants dans les sites potentiellement perturbés, à l'exception du bivalve *Spisula solidissima* (la mactre de l'Atlantique) qui est plus abondante dans les sites références (tableau 5-8). Plusieurs études, dont celle de Bourassa *et al.* (2008), ont relevé la présence de *Mactromeris polynyma* dans la baie de Sept-Îles, contrairement à cette présente étude. Néanmoins, la présence de stries sur les dents latérales des individus prélevés dans le cadre de ce projet indique bel et bien que les mactres retrouvées sont des *Spisula solidissima* (Bousfield, 1964).

*Tableau 5-8 : Similarité des assemblages benthiques entre les sites potentiellement perturbés et les sites références de la campagne 2014, calculée par la procédure SIMPER*

	Potentiellement perturbé	Référence
Potentiellement perturbé	<p><u>Similarité moyenne = 41,8 %</u></p> <p><i>Bipalponephrys neotena</i> (41,4 %)  <i>Nephtys</i> sp. (33,7 %)  <i>Prionospio steenstrupi</i> (6,5 %)  <i>Scoloplos cf. armiger/acutus</i> (3,7 %)  <i>Phoronida</i> (3,2 %)  <i>Phyllodoce groenlandica</i> (2,2 %)</p>	<p><u>Dissimilitude moyenne = 95,87 %</u></p> <p><i>Bipalponephrys neotena</i> (28,2 %)  <i>Nephtys</i> sp. (22,9 %)  <i>Prionospio steenstrupi</i> (5,9 %)  <i>Scoloplos cf. armiger/acutus</i> (4,5 %)  <i>Spisula solidissima</i> (3,9 %)  <i>Phoronida</i> (3,6 %)</p>
Référence		<p><u>Similarité moyenne = 18,1 %</u></p> <p><i>Spisula solidissima</i> (36,4 %)  <i>Phoxocephalus holbolli</i> (15,4 %)  <i>Echinarachnius parma</i> (12,1 %)  <i>Harpacticoida</i> (8,5 %)  <i>Polygordius</i> sp (4,8 %)  <i>Scoloplos cf. armiger/acutus</i> (2,5 %)</p>

Les principaux taxons qui contribuent à la similarité ou la dissimilarité entre les sites ont été indiqués.

### 5.3.1.3. Interprétation générale pour la campagne de 2014

L'échantillonnage de paramètres physico-chimiques et de biodiversité benthique de la campagne de 2014 a permis de réaliser des comparaisons entre des sites potentiellement perturbés et références. De façon globale, plusieurs différences ont pu être mises en évidence entre ces deux types de milieux, en particulier au niveau de leur contenu en matière organique, de la concentration de certains métaux lourds et de leurs assemblages benthiques.

Une forte concentration en matière organique, des sédiments très fins et la présence d'espèces de petite taille sont des éléments indicateurs d'une perturbation dans le milieu. Il existe une grande diversité dans la sensibilité des espèces benthiques et donc de leur réponse à une perturbation, qu'elle soit de nature anthropique ou naturelle (Pearson et Rosenberg, 1978 ; Gray *et al.*, 1989 ; Dauer, 1993). Pearson et Rosenberg (1978) ont montré qu'une succession de communautés est généralement observée le long d'un gradient d'enrichissement organique. En conditions considérées « normales » (stade 3), la communauté est diversifiée, avec une biomasse importante et une abondance modérée. Selon ce modèle, une augmentation de la concentration en matière organique est suivie d'une diminution de la diversité et de la biomasse, en faveur de fortes abondances d'espèces dites opportunistes, en particulier certaines familles de polychètes. Les résultats obtenus révèlent ce type de schéma avec de fortes abondances d'organismes, de faibles valeurs de biomasse et des espèces connues comme opportunistes dans les sites potentiellement perturbés (figures 5-21 et 5-22, tableau 5-8).

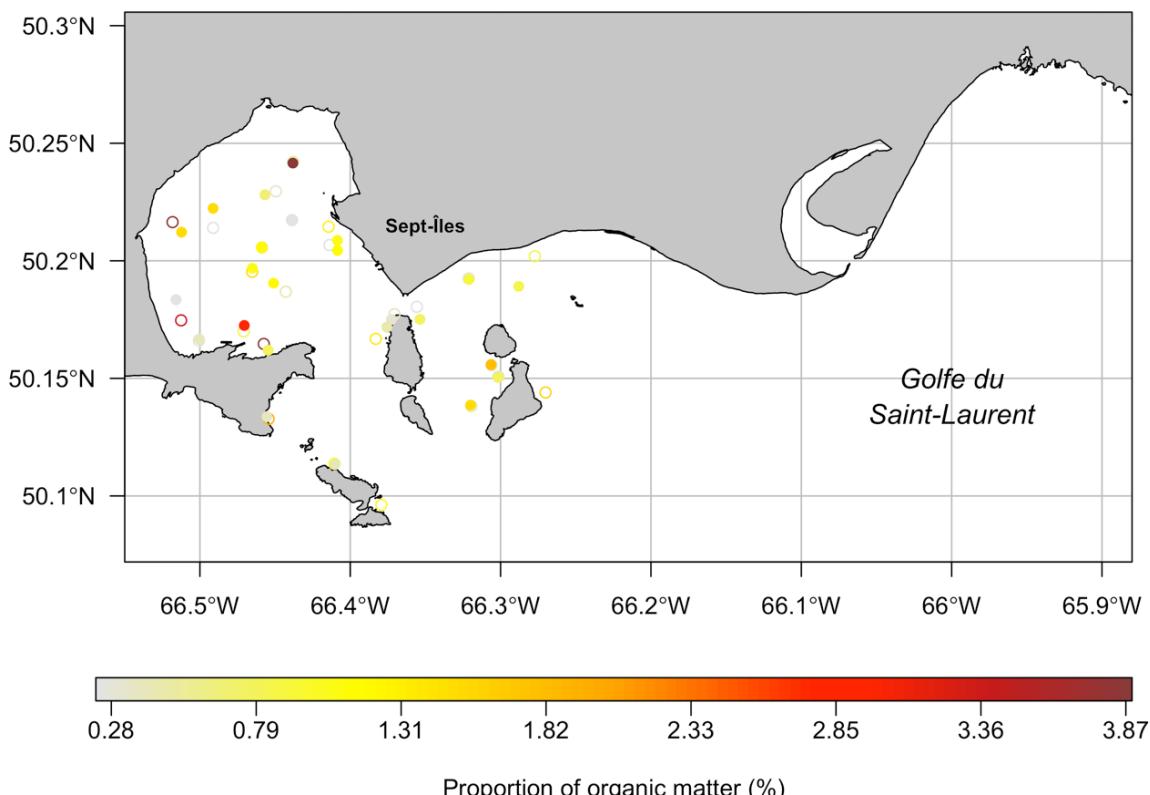
## 5.3.2. Campagnes 2016 et 2017

### 5.3.2.1. Caractérisation des sédiments

#### Matière organique

Pour les stations échantillonnées lors des campagnes 2016 et 2017 dans la baie de Sept-Îles (BSI), le contenu moyen en matière organique du sédiment a été respectivement de  $1,12 \pm 1,05\%$  en 2016, et de  $1,12 \pm 0,81\%$  en 2017. Les valeurs obtenues à chaque station sont présentées à la figure 5-15. Le contenu moyen en matière organique pour les stations de la rivière Manitou (MR) échantillonnées en 2016 et 2017 ainsi que pour les stations de la côte de Port-Cartier (CPC) et du secteur Pentecôte (BDA) de 2016, sont respectivement de  $0,24 \pm 0,07\%$ ,  $0,27 \pm 0,06\%$  et de  $0,44 \pm 0,24\%$ ,  $0,38 \pm 0,09\%$ .

La concentration en matière organique est en moyenne plus importante à BSI que dans les autres régions (figure 5-24). De plus, de fortes concentrations sont détectées au fond de la baie comparativement aux stations dans l'archipel. En particulier, les zones proches des herbiers de zostères et en face du secteur de l'Aluminerie Alouette semblent avoir les plus hautes valeurs de matière organique. Cet état peut s'expliquer par un hydrodynamisme plus faible dans la baie, et/ou par une plus forte accumulation de matière à ces endroits grâce aux apports terrigènes, anthropiques et à la décomposition d'organismes (zostères, faune, etc.). Des analyses d'isotopes stables pourraient permettre de connaître l'origine de cette matière organique. (Voir au chapitre 4, la section isotopes).



## Pigments chlorophylliens

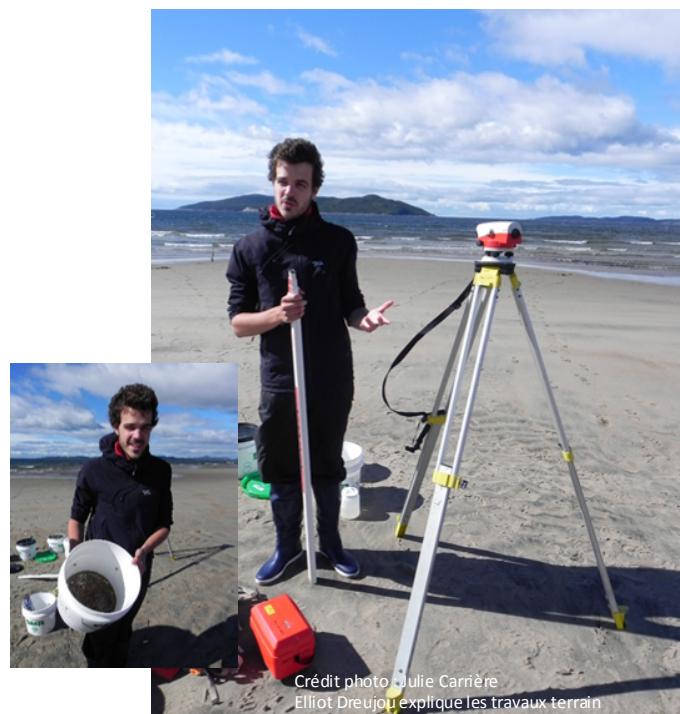
La concentration moyenne en chlorophylle *a* dans les sédiments a été de  $2,37 \pm 1,7 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$  en 2016 et de  $18,7 \pm 27,6 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$  en 2017 pour les stations à BSI. Pour les stations de MR échantillonnées en 2016 et 2017, les concentrations moyennes en chlorophylle *a* ont été respectivement de  $4,88 \pm 1,94 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$  et  $40,8 \pm 13,3 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$  et pour les stations de CPC et BDA en 2016 respectivement de  $5,31 \pm 5,74 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$  et  $1,58 \pm 1,10 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$ . La figure 5-25a présente les concentrations en chlorophylle *a* à chaque station échantillonnée en 2016 et 2017.

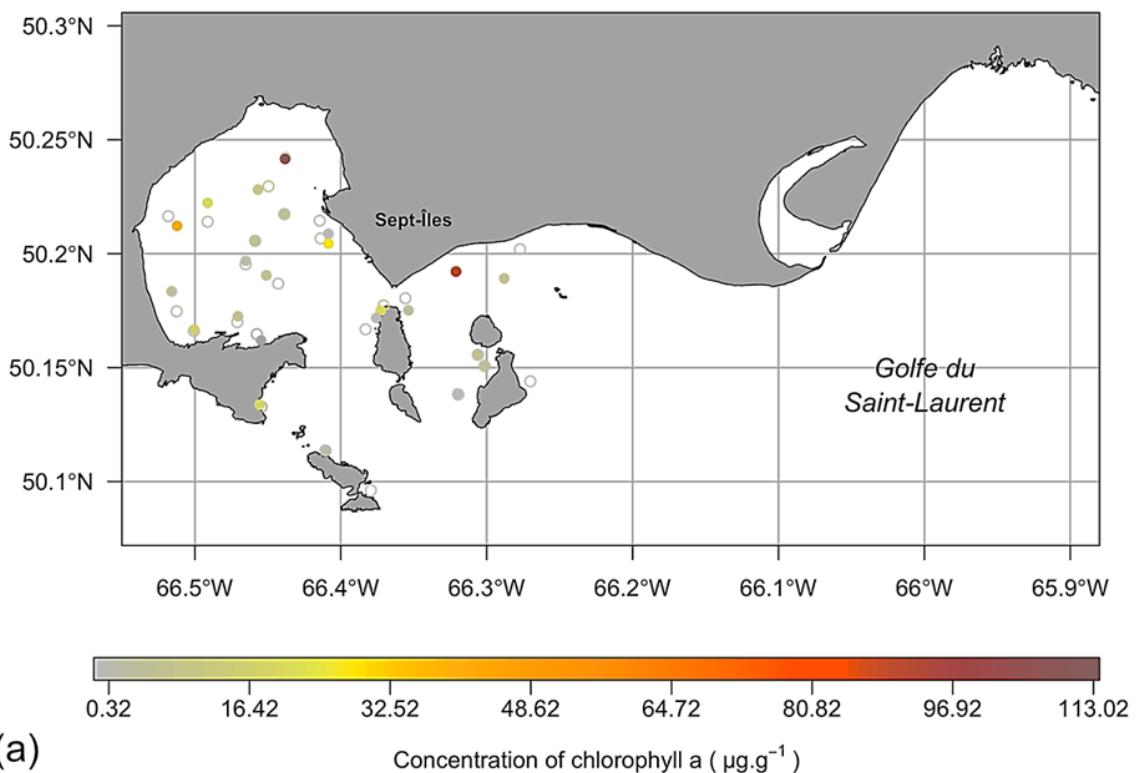
Les concentrations en phaeopigments dans les sédiments de BSI ont été de  $3,58 \pm 2,25 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$  en 2016 et de  $30,7 \pm 46,4 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$  en 2017. À MR, les valeurs ont été de  $1,59 \pm 0,78 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$  en 2016 et  $22,9 \pm 17 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$  en 2017. Les valeurs pour CPC et BDA en 2016 ont été respectivement de  $2,86 \pm 1,63 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$  et  $1,07 \pm 0,77 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$ . La figure 5-25b présente les concentrations en phaeopigments à chaque station échantillonnée en 2016 et 2017.

Une première analyse permet de montrer que les plus hautes valeurs moyennes de chlorophylle *a* sont trouvées à CPC et MR, et celles de phaeopigments à BSI et CPC. Une plus forte concentration au fond de la baie et au nord de la Pointe Noire est observée, selon un schéma identique à la matière organique (figures 5-25a et 5-25b).

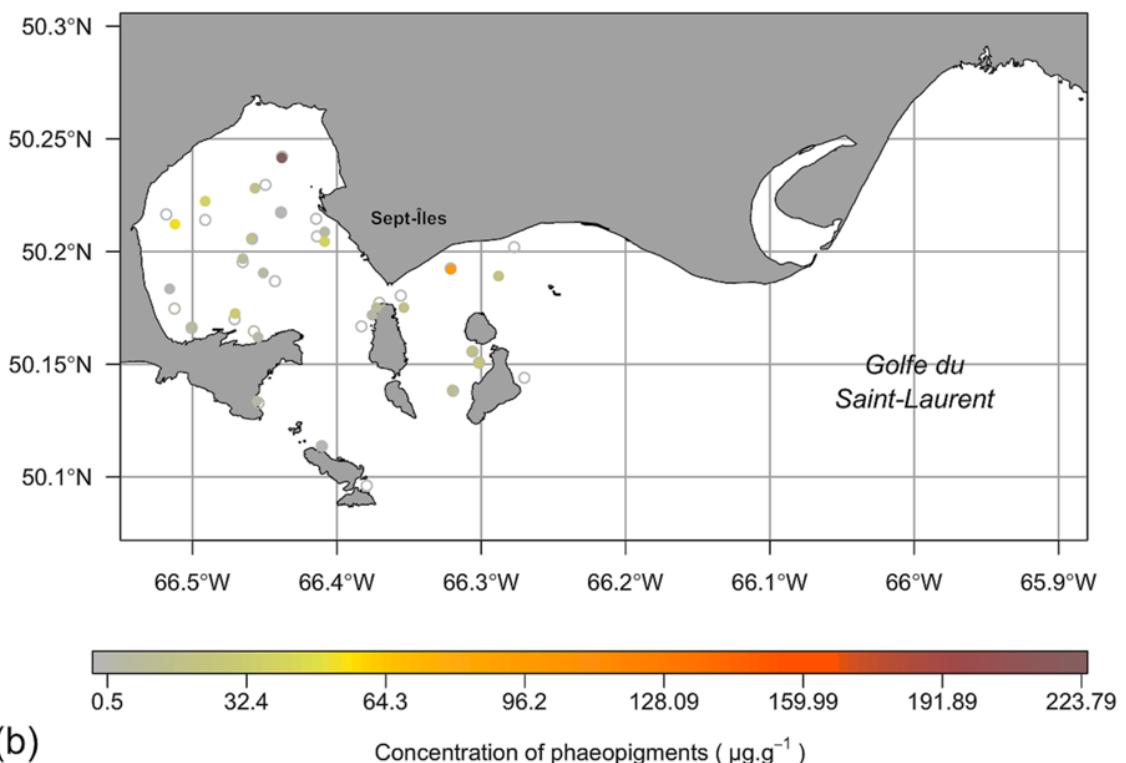
Les hypothèses dans la section précédente peuvent être aussi évoquées pour cette section, car les organismes photosynthétiques du sédiment et de la colonne d'eau peuvent être favorisés par un faible hydrodynamisme et un apport accru en nutriments.

Il est à noter que les valeurs de pigments aux stations échantillonnées en 2017 sont significativement plus élevées que celles échantillonnées en 2016, et notamment des valeurs maximales particulièrement élevées. Ce résultat pourrait être expliqué par l'hypothèse que la production primaire de la colonne d'eau ait été particulièrement faible en 2016 ou particulièrement importante en 2017, ce qui aurait modifié la quantité de pigments conviés vers le sédiment.





(a)



(b)

Figure 0-25 : Concentration en chlorophylle a (a) et en phaeopigments (b) ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 (cercles vides) et 2017 (cercles pleins)

## Granulométrie

Les stations échantillonnées lors des campagnes 2016 et 2017 se trouvent à différentes profondeurs et sont réparties à travers la totalité de la baie, ce qui explique que la composition des sédiments analysés est diversifiée. Alors qu'à certaines stations le substrat est dominé par des sédiments très fins ( $< 63 \mu\text{m}$ ), à d'autres il s'agit de sable très fin à grossier ( $63 - 2\,000 \mu\text{m}$ ).

Les contenus en gravier, sable et vase à BSI sont représentés aux figures 5-26 et 5-27.

De façon générale, toutes les stations possèdent peu de gravier (figure 5-26a). Une concentration élevée en sable est détectée à CPC, MR et BDA, avec des valeurs plus faibles à BSI (figure 5-27b), tandis que des valeurs élevées de vase ne sont détectées qu'à BSI et en particulier au fond de la baie (figure 5-27c).

Une teneur plus élevée en grosses particules est directement reliée à un hydrodynamisme élevé dans la zone, et ceci semble être le cas pour les stations à CPC, MR et BDA. Le plus faible hydrodynamisme de BSI, expliqué par des concentrations plus importantes en fines particules, est consistant avec les hypothèses précédentes à propos du contenu en matière organique et en pigments photosynthétiques dans le sédiment.

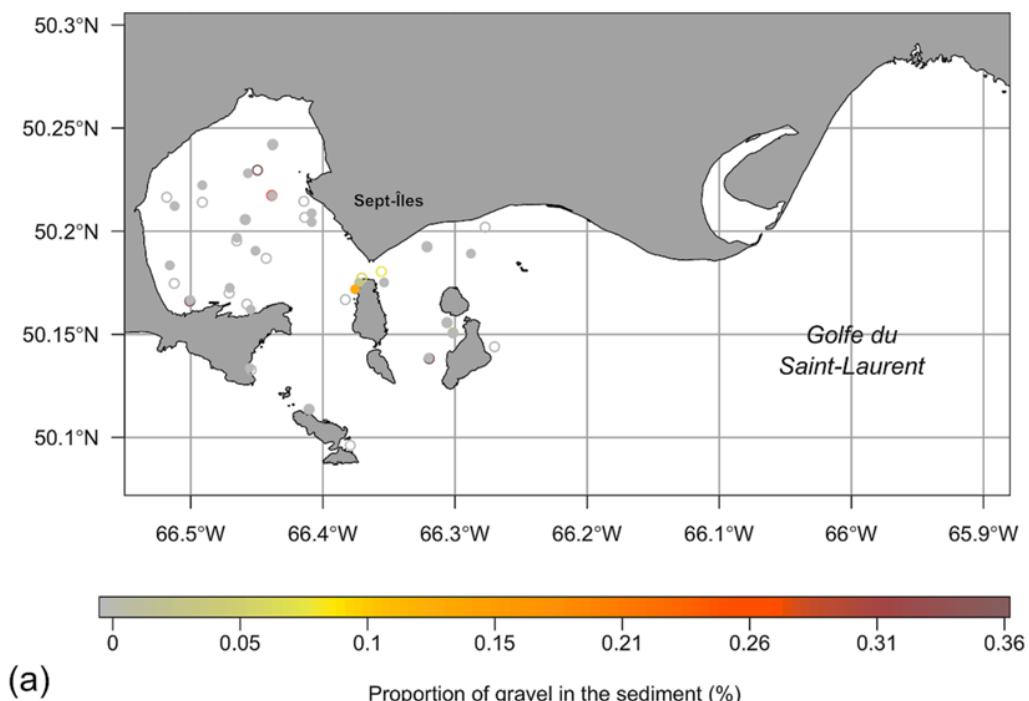


Figure 0-26 : Contenu en gravier (a) (%) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 (cercles vides) et 2017 (cercles pleins)

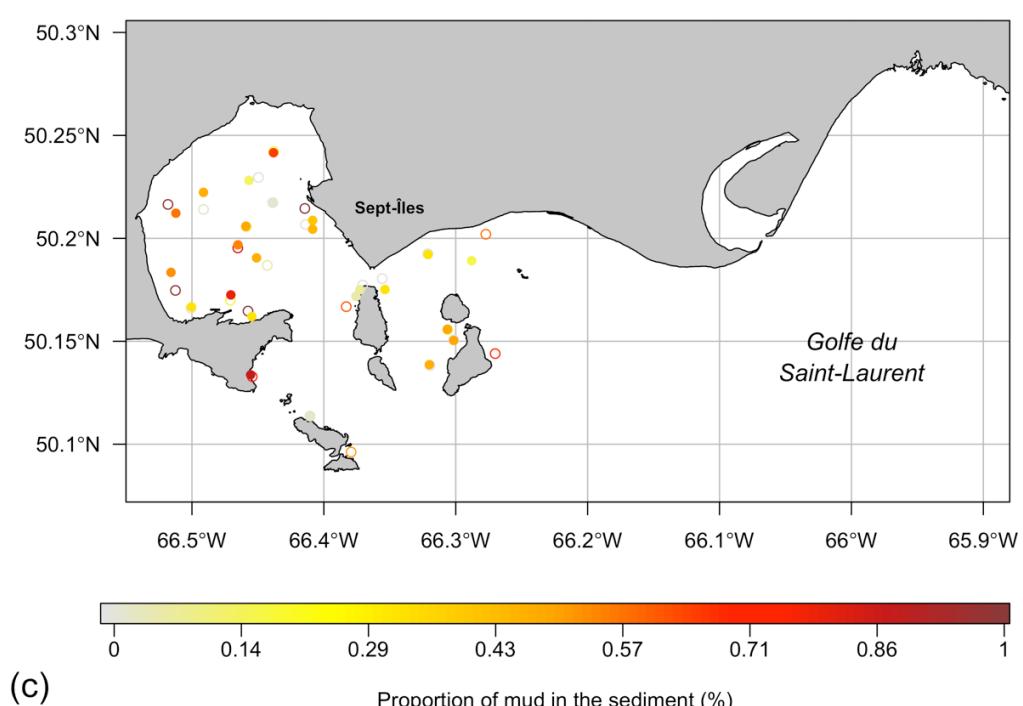
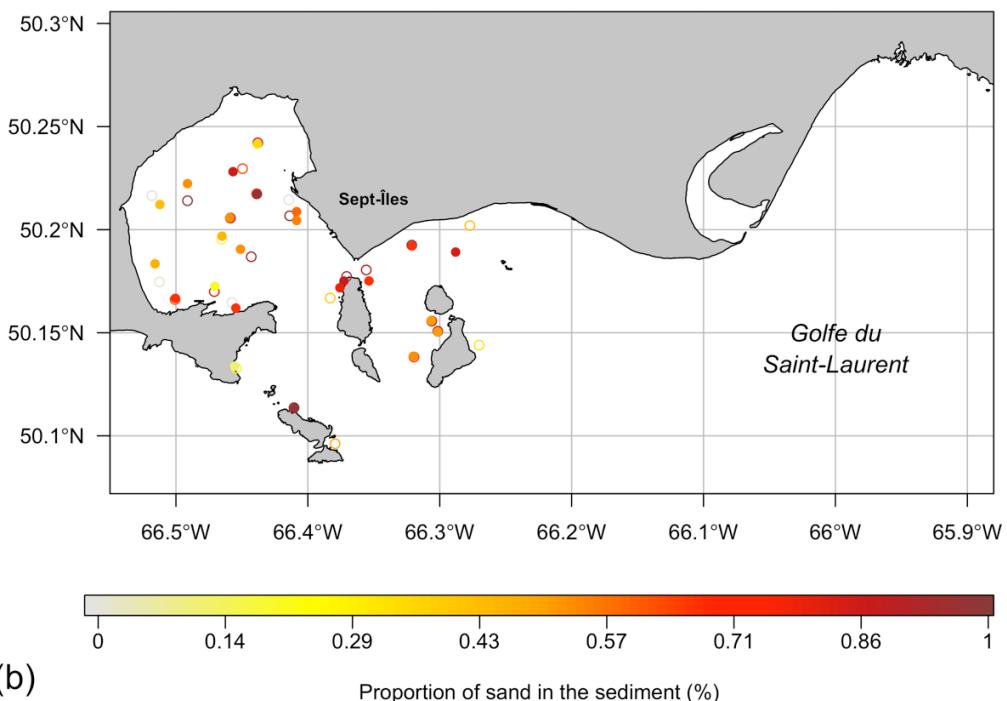


Figure 0-27 : Contenu en sable (b) et en vase (c) (%) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 (cercles vides) et 2017 (cercles pleins)

## Métaux lourds

Les concentrations des métaux étudiés à chaque station échantillonnée dans la baie de Sept-Îles en 2016 sont présentées aux figures 5-28, 5-29, 5-30, 5-31 et 5-32.

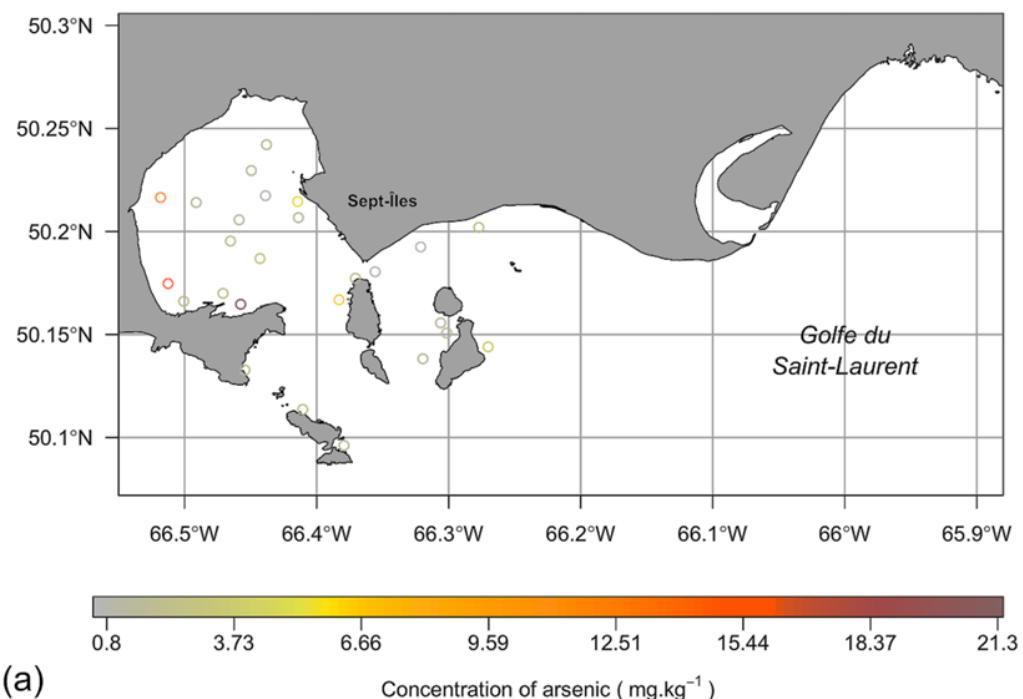
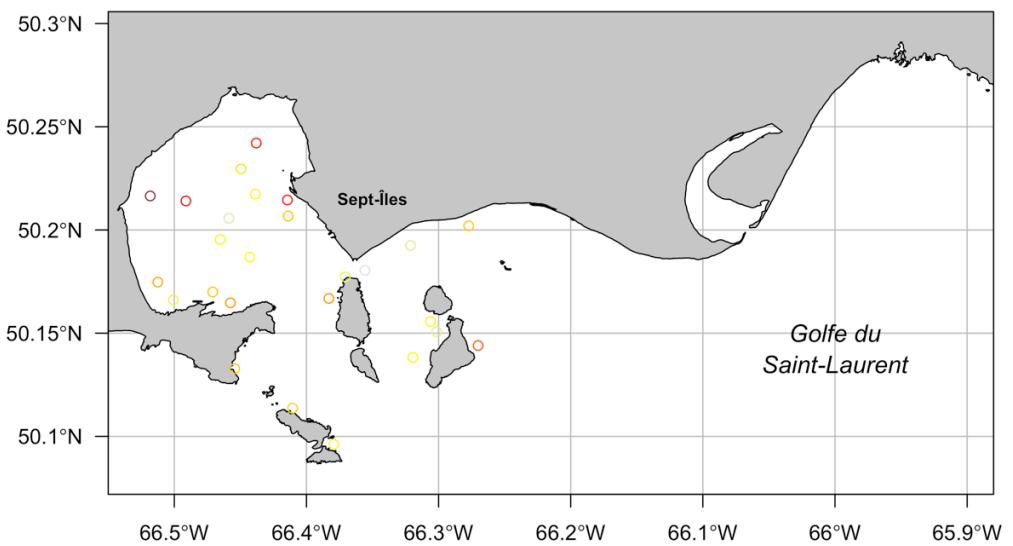


Figure 0-28: Contenu en arsenic (a) (mg.kg<sup>-1</sup>) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016

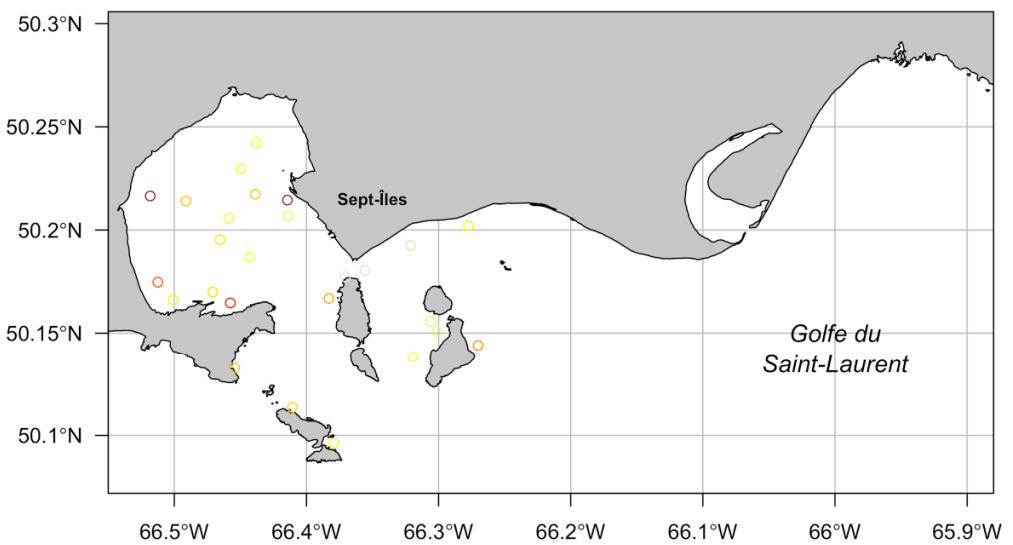


Crédit photo : Julie Carrière



(b)

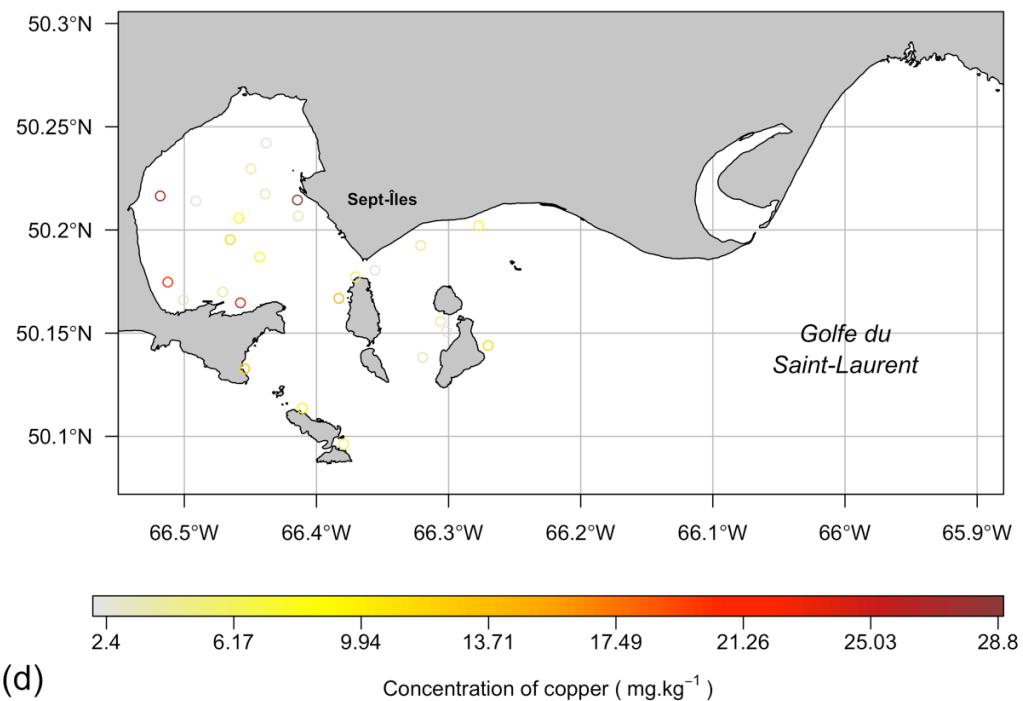
Concentration of cadmium ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )



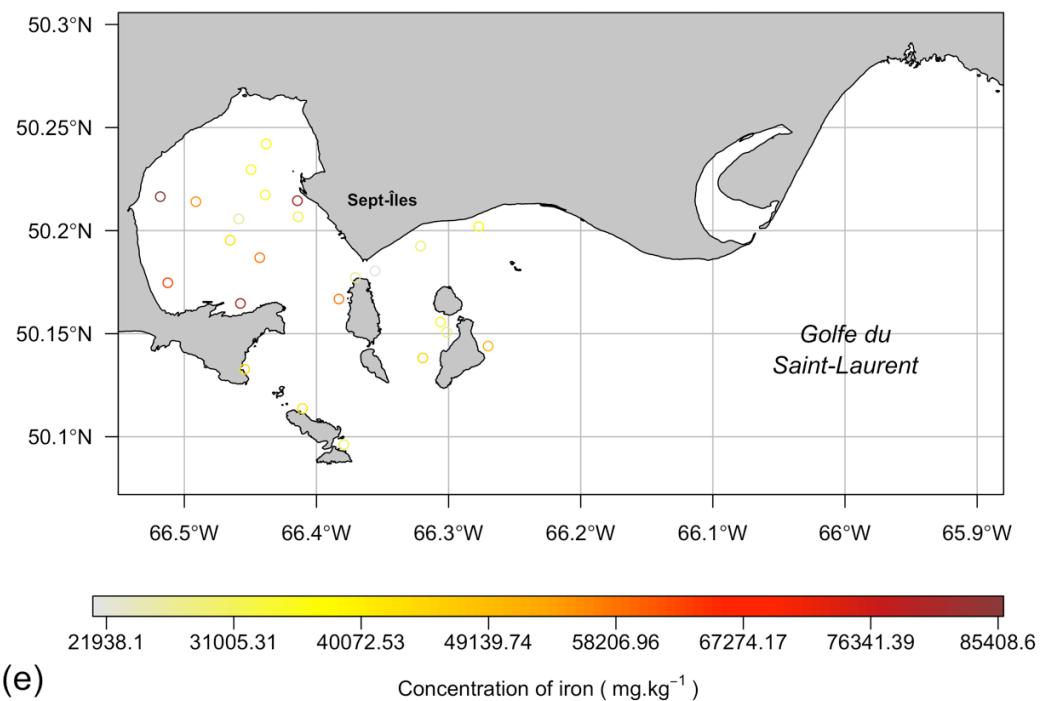
(c)

Concentration of chromium ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )

Figure 0-29 : Contenu en cadmium (b) et chrome (c), ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016



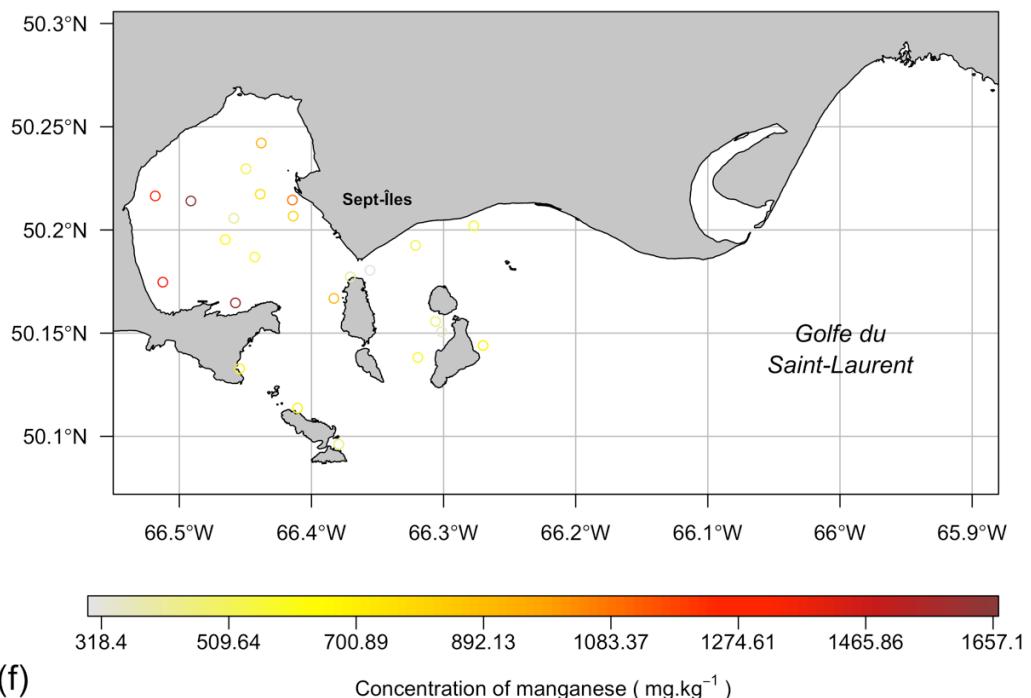
(d)

Concentration of copper ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )

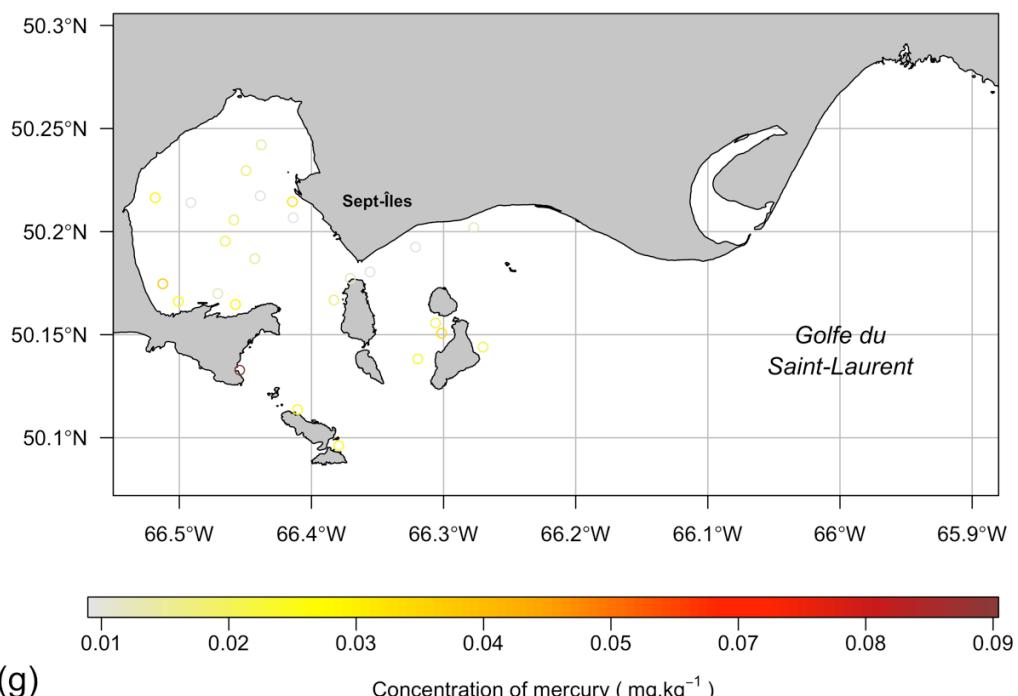
(e)

Concentration of iron ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )

Figure 0-30 : Contenu en cuivre (d) et fer (e) ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016

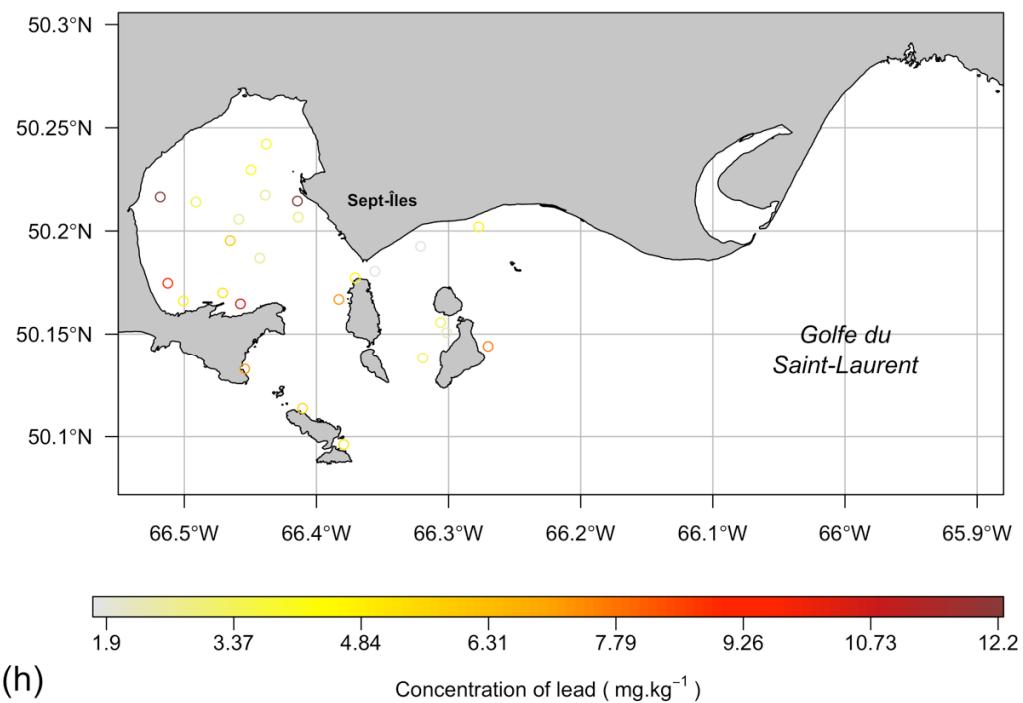


(f)



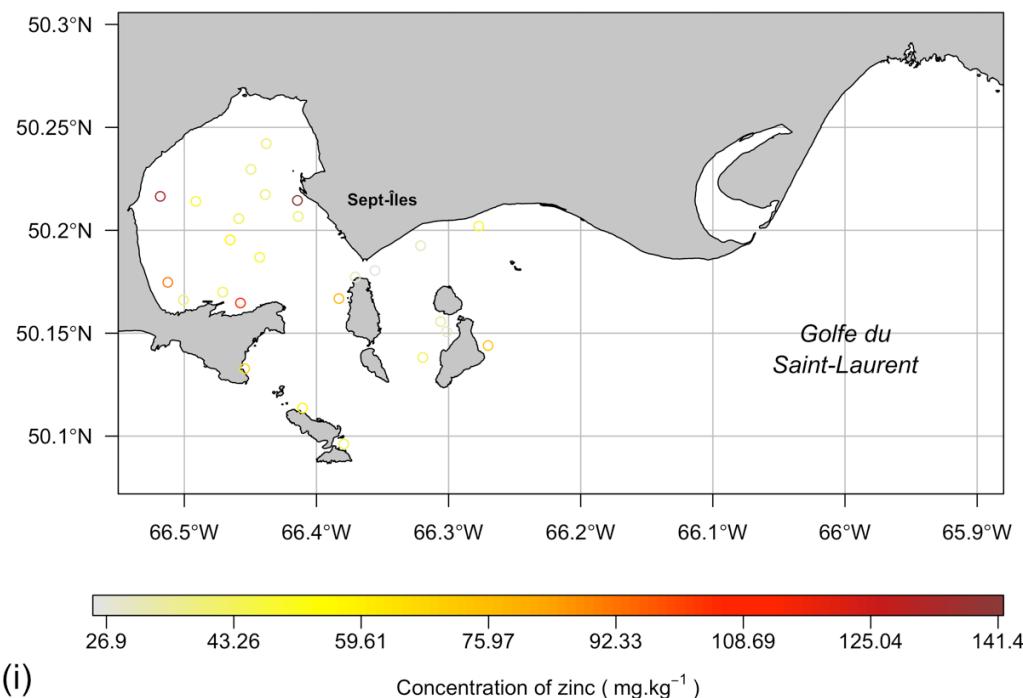
(g)

Figure 0-31 : Contenu en manganèse (f) et mercure (g) ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016



(h)

Concentration of lead ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )



(i)

Concentration of zinc ( $\text{mg.kg}^{-1}$ )

Figure 0-32 : Contenu en plomb (h) et zinc (i) ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016

Les valeurs précédentes correspondent aux échantillons prélevés à la surface du sédiment. Des échantillons en profondeur (3 cm) ont aussi été analysés à chaque station.

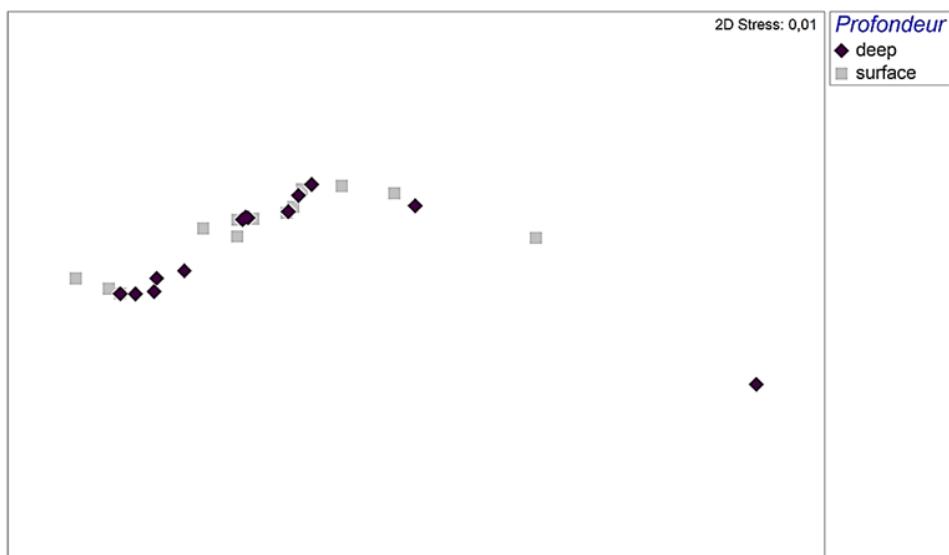
La classification CLUSTER et le test SIMPROF réalisés sur ces données n'ont pas établi de regroupement significatif des échantillons de surface et ceux de profondeur (le nMDS est présenté à la figure 5-33), indiquant une homogénéité des concentrations en métaux lourds dans le sédiment. Ce résultat est aussi obtenu par la PERMANOVA multivariée réalisée sur les concentrations de chaque métal (tableau 5-9).

*Tableau 5-9 : Résultats de l'analyse de variance multiple par permutation (PERMANOVA) testant l'effet de la Profondeur d'échantillonnage sur les concentrations en métaux lourds des sédiments des stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016*

**Concentrations en As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Hg, Pb et Zn**

	dl	SC	F-ratio	p
Profondeur	1	$2,804 \times 10^7$	0,0483	0,8406
Résidus	24	$1,395 \times 10^{10}$		
Total	25	$1,397 \times 10^{10}$		

dl = degré de liberté ; SC = somme des carrés



*Figure0-33 : Cadrage multidimensionnel non-métrique (nMDS) des échantillons de surface (carrés noirs) et des échantillons profonds (losanges noirs) collectés aux stations échantillonnées dans la baie de Sept-Îles (BSI) en 2016*

### 5.3.2.2. Caractérisation de la faune benthique

#### Indices de diversité

Les échantillonnages de 2016 et 2017 ont répertorié respectivement 66 et 91 taxons, répartis dans 9 phylums différents (tableau 5-10). Les valeurs de ces indices pour chaque région en 2016 et 2017 sont présentées dans le tableau 5-11.

Tableau 5-10 : Abondance et biomasse de chaque phylum présent dans les échantillons collectés en 2016 et 2017

	2016	2017	
	Abondance (individus)	Biomasse (g)	
Annelida	231 (37,62 %)	820 (31,88 %)	37,84 (9,74 %)
Arthropoda	129 (21,01 %)	890 (34,60 %)	1,51 (0,39 %)
Chordata	-	1 (0,04 %)	2,99 (0,77 %)
Cnidaria	-	2 (0,08 %)	0,01 (< 0,01 %)
Echinodermata	46 (7,49 %)	79 (3,07 %)	320,16 (82,42 %)
Mollusca	202 (32,90 %)	447 (17,38 %)	25,20 (6,23 %)
Nematoda	2 (0,33 %)	328 (12,75 %)	< 0,01 (< 0,01 %)
Nemertea	1 (0,16 %)	4 (0,16 %)	1,71 (0,44 %)
Platyhelminthes	3 (0,49 %)	-	-
Sipuncula	-	1 (0,04 %)	< 0,01 (< 0,01 %)
<b>Total</b>	<b>614</b>	<b>2 572</b>	<b>388,42</b>

La contribution de chaque phylum à l'abondance et la biomasse totales est indiquée.

Tableau 5-11 : Valeurs des indices de diversité pour les stations échantillonnées en 2016 et 2017

	2016				2017	
	BSI	CPC	MR	BDA	BSI	MR
S	5,96 ± 3,18	3,67 ± 2,08	4,33 ± 1,53	2,33 ± 1,53	11 ± 5,62	6,4 ± 3,44
N	21,40 ± 18,8	6,67 ± 4,16	7 ± 1	5,33 ± 2,89	96 ± 95,4	53,6 ± 47,2
H'	1,32 ± 0,53	1,02 ± 0,62	1,35 ± 0,35	0,52 ± 0,59	1,58 ± 0,69	1,2 ± 0,47
J'	0,81 ± 0,20	0,85 ± 0,23	0,95 ± 0,07	0,48 ± 0,43	0,68 ± 0,24	0,67 ± 0,13

BSI = baie de Sept-Îles ; CPC = côte de Port-Cartier ; MR = baie de la rivière Manitou ; BDA = secteur Pentecôte ; S = richesse spécifique ; N = abondance ; H' = indice de Shannon ; J' = indice de Piélou

Selon la classification de Guille (1970), dans les échantillons de 2016 aucun taxon n'est désigné « courant », 16 taxons sont « constants » à travers les stations et 50 taxons sont « rares ». Pour les échantillons de 2017, 1 taxon est « courant », 32 taxons sont « constants » et 58 taxons sont « rares ». Les courbes d'accumulation n'atteignent pas de plateau, donc il reste encore des espèces à découvrir (figure 5-34).

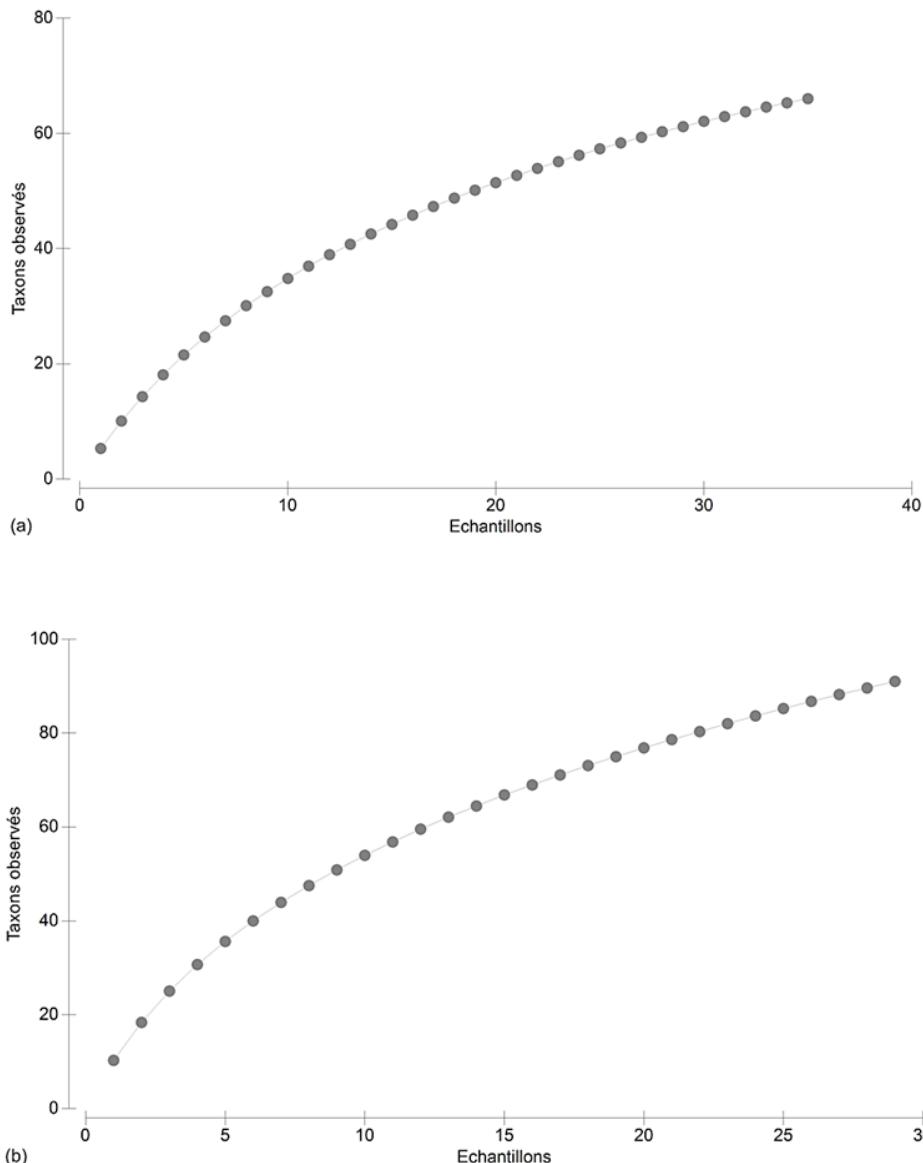


Figure 0-34 : Courbes d'accumulation des taxons échantillonnés en 2016 (a) et 2017 (b)

Les indices de diversité ont été calculés pour chaque station, et leurs valeurs sont présentées aux figures 5-35 et 5-36. La richesse spécifique et l'abondance sont plus élevées dans la BSI (figures 5-35a et 5-35b), en particulier pour les stations échantillonnées pour la campagne 2017. Ce dernier résultat peut s'expliquer par le fait que la campagne 2017 a inclus les espèces de tailles comprises entre 500 µm et 1 mm, au contraire de la campagne 2016. L'indice de Shannon possède des valeurs moyennes dans toutes les régions, et les valeurs maximales sont concentrées dans la BSI (figure 5-36c). Pour l'indice de Piélou, des valeurs élevées sont détectées dans toutes les régions (figure 5-36d). Ce résultat soutient l'hypothèse que les communautés de stations échantillonnées ne possèdent pas d'espèces particulièrement dominantes. Il n'y a pas de tendance claire qui se dégage de ces résultats, ce qui laisse penser que les indices de diversité pourraient ne pas être informatifs pour répondre à nos objectifs.

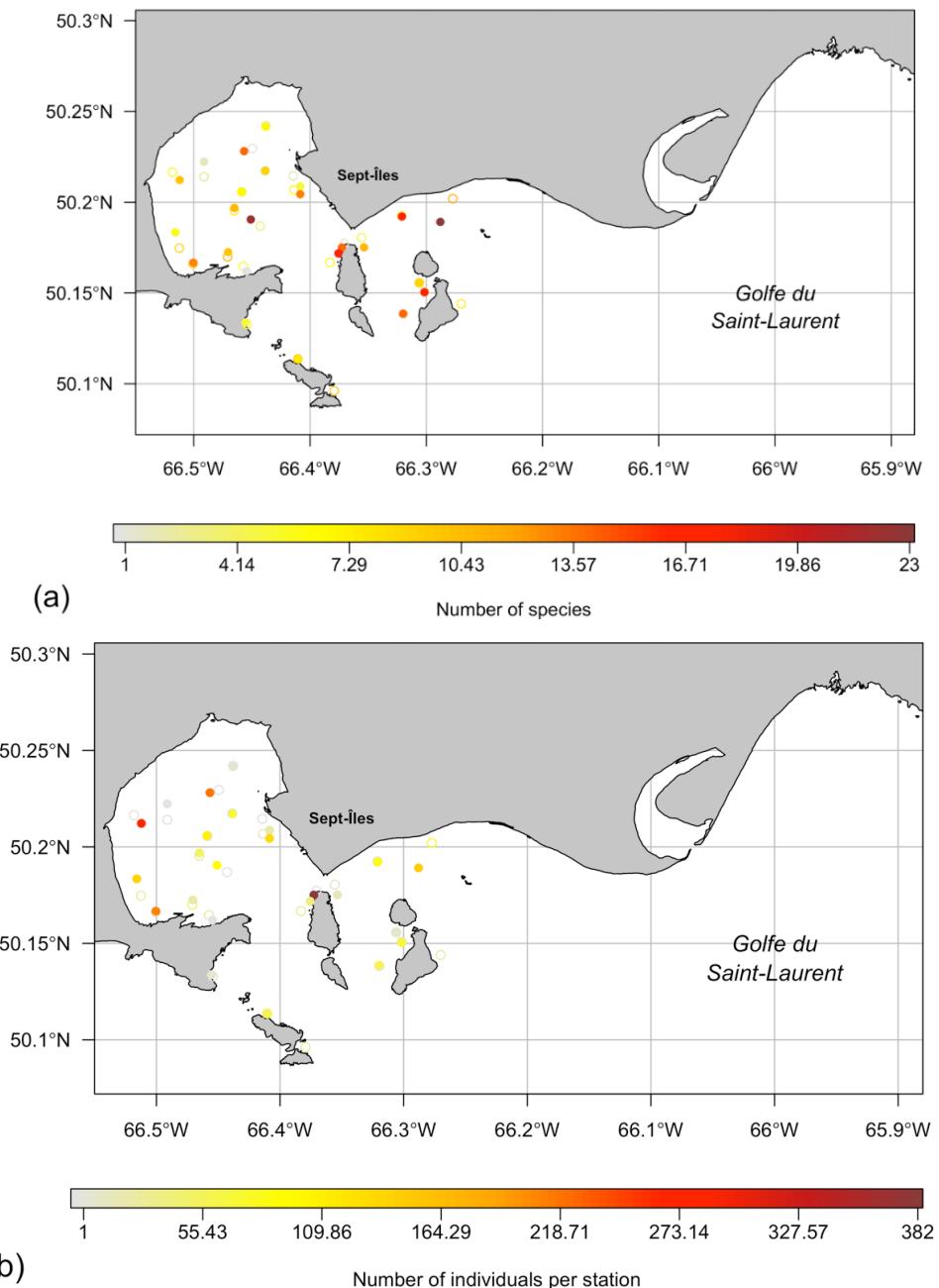


Figure 0-35 : Valeur de la richesse spécifique (a) et de l'abondance (b) aux stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 et 2017

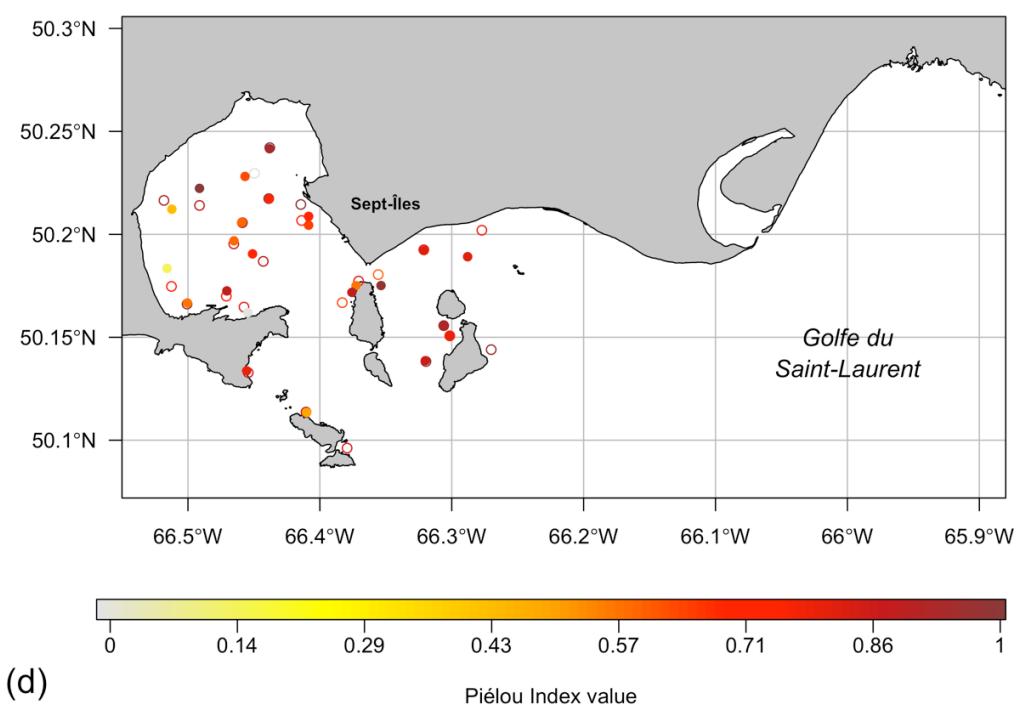
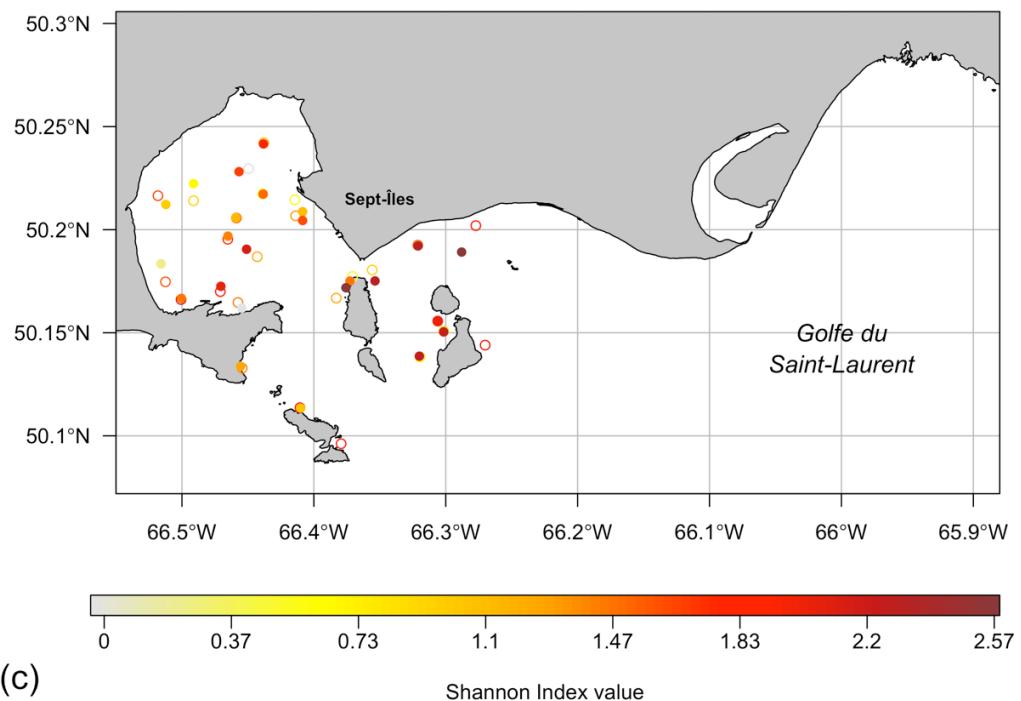


Figure 0-36 : Valeur des indices de Shannon (c) et de Piélou (d) aux stations de la baie de Sept-Îles (BSI) échantillonnées en 2016 et 2017

## Ensemble des communautés

Pour chaque campagne, une routine CLUSTER/SIMPER a été réalisée sur les assemblages benthiques au moyen des distances de Bray-Curtis calculées sur les données d'abondances (transformées par le logarithme) et sur la présence/absence des organismes.

Il n'est pas possible d'effectuer de PERMANOVA pour tester les différences entre chaque région d'échantillonnage, car le plan expérimental n'est pas équilibré (23 stations à BSI contre 3 stations dans les autres régions), ce qui rendrait l'analyse de variance peu informative.

SIMPER est une routine permettant de décrire les variables qui contribuent le plus à la similarité entre les groupes de stations obtenus par les nMDS et cluster.

Bray-Curtis : Mesure permettant de calculer la dissimilarité entre deux stations, en considérant les abondances des espèces présentes à chaque station.

Il est cependant possible de discerner certains groupes de stations grâce aux classifications hiérarchiques. La figure 5-37 présente les résultats pour les stations de la campagne 2016 et la figure 5-38 ceux des stations de la campagne 2017.

Pour les stations de la campagne 2016, il est possible d'observer deux groupes principaux : un premier avec la plupart des stations de BSI et un autre contenant le reste des stations. Ces deux groupes de stations sont retrouvés à la fois pour les abondances ou les présences/absences, avec plusieurs sous-groupes obtenus par les tests SIMPROF (figures 5-37a et 5-37b) :

- Groupe A (14 stations) :
  - Stations de BSI : 112, 114, 115, 120, 121, 122, 126
  - Stations de CPC, BDA et MR : 45, 56, 63, 71, 87, 90, 100
- Groupe B (19 stations) :
  - Stations de BSI : 101, 102, 103, 104, 105, 106, 108, 109, 110, 111, 113, 116, 117, 118, 119, 123, 124, 125
  - Station de MR : 65

Pour les stations de la campagne 2017, le premier groupe contient la majorité des stations de BSI et le second possède toutes les stations de MR et les restantes de BSI. Là encore, ces deux groupes principaux sont retrouvés à la fois pour les abondances ou les présences/absences, en excluant les stations 127, 193 et 196 (figures 5-38a et 5-38b) :

- Groupe C (10 stations) :
  - Stations de BSI : 187, 188, 195, 228, 230
  - Stations de MR : 251, 254, 255, 257, 260
- Groupe D (17 stations) :
  - Stations de BSI : 132, 139, 154, 156, 171, 176, 177, 186, 194, 196, 197, 198, 206, 211, 221, 231, 236

Les stations placées dans chaque groupe ne semblent pas présenter de regroupement géographique particulier au sein des régions.

Il est à noter que les groupes obtenus sont plus robustes pour les stations de la campagne 2017 que pour celles de la campagne 2016. En effet, la similarité entre les stations au sein des groupes (axe vertical) y est plus élevée (15 % en 2017 contre moins de 5 % en 2016) et les tests SIMPROF distinguent plus de sous-groupes en 2016 qu'en 2017.

Ces résultats laissent supposer que les assemblages d'espèces présents à BSI sont globalement différents de ceux présents à CPC, MR et BDA, mais que certaines stations au sein de la BSI partagent des similarités avec les autres régions.



Crédit photo : Julie Carrière  
David Poissant



Crédit photo : Julie Carrière  
Elliot Dreujou

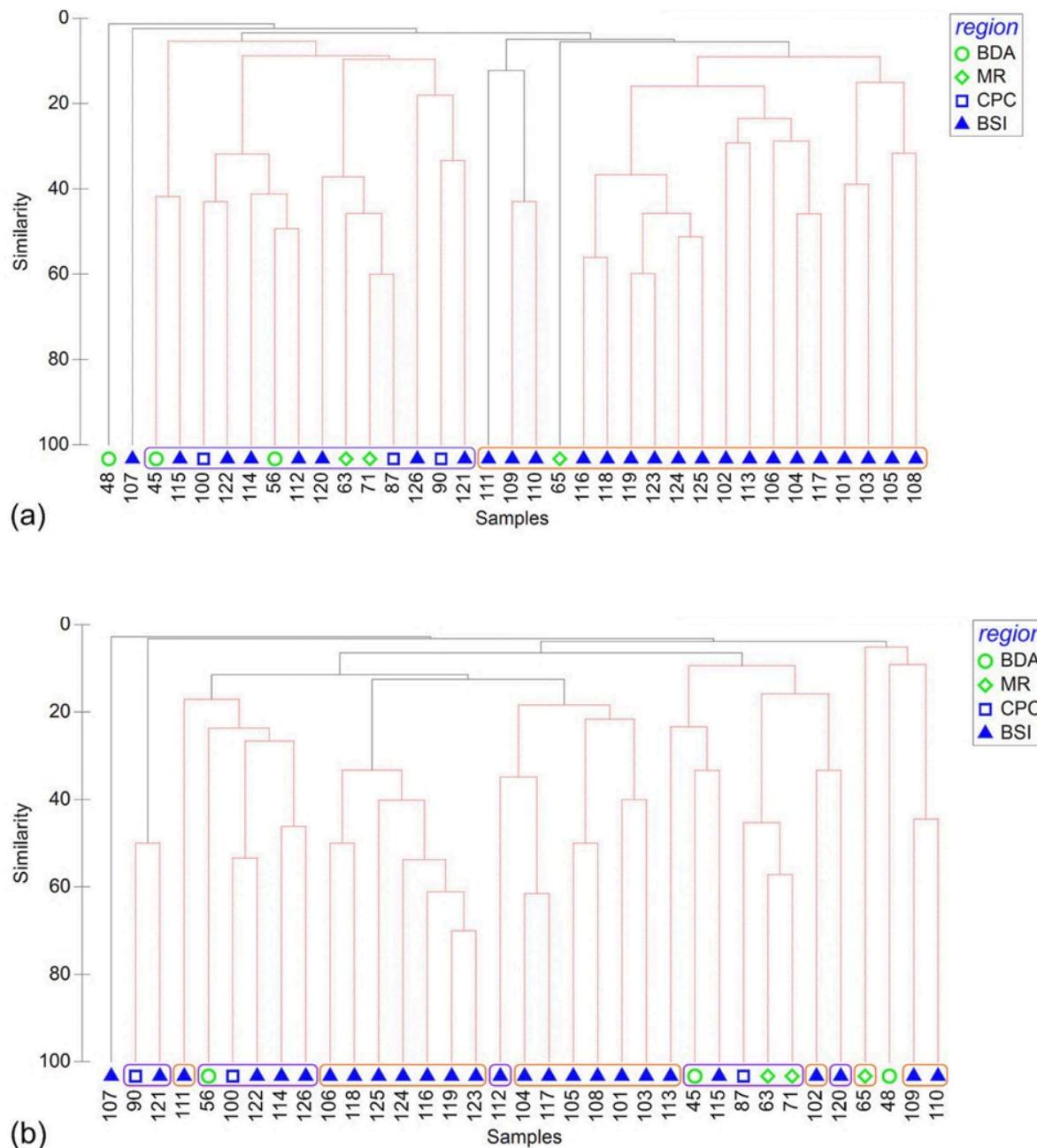


Figure 0-37 : Dendrogrammes des stations échantillonnées en 2016, basés sur les distances de Bray-Curtis calculées avec une routine CLUSTER sur le logarithme des abondances des organismes benthiques (a) et sur leur présence/absence (b)

Note : Les lignes rouges et les cercles colorés correspondent aux groupes obtenus avec l'analyse SIMPROF.

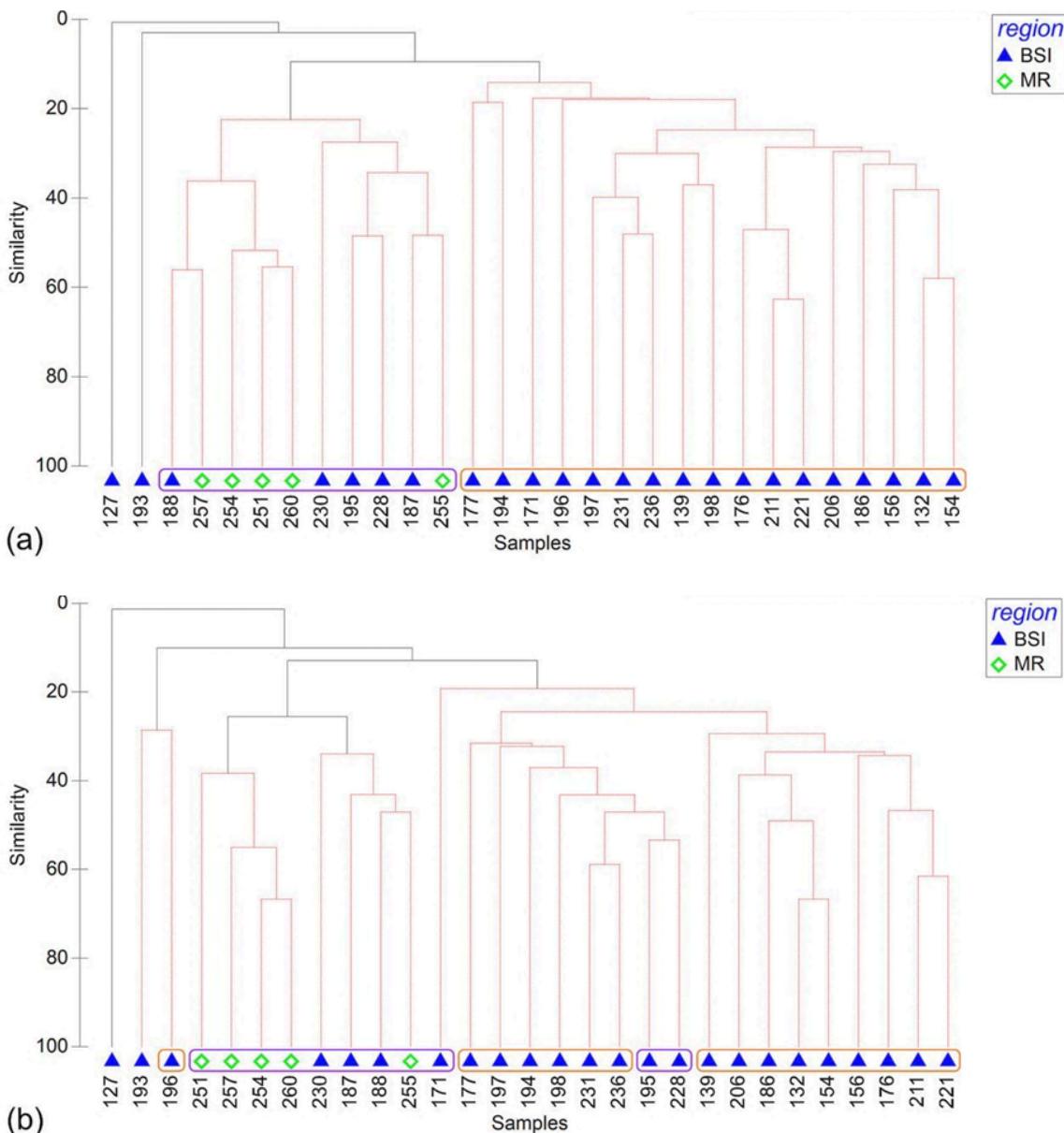


Figure 0-38 : Dendrogrammes des stations échantillonnées en 2017, basés sur les distances de Bray-Curtis calculées avec une routine CLUSTER sur le logarithme des abondances des organismes benthiques (a) et sur leur présence/absence (b)

Note : Les lignes rouges et les cercles colorés correspondent aux groupes obtenus avec l'analyse SIMPROF.

Les routines SIMPER ont été effectuées sur les groupes obtenus par les tests SIMPROF pour chaque campagne. Les résultats sont présentés au tableau 5-12 pour la campagne 2016 et au tableau 5-13 pour la campagne 2017.

Pour la campagne 2016, la similarité du groupe A (constitué de la presque totalité des stations hors de la BSI) est principalement due à l'oursin plat *Echinarachnius parma*, au ver trompette *Cistenides granulata* et à l'oursin vert *Strongylocentrotus* sp. (tableau 5-12). Pour le groupe B (qui contient toutes les autres stations de BSI), celui-ci est principalement décrit par les bivalves *Macoma calcarea* et *Ennucula tenuis* et le polychète *Scoloplos cf. armiger/acutus* (tableau 5-12). La plupart de ces espèces sont caractérisées par Borja *et al.* (2000) comme insensibles à une perturbation, mis à part *Scoloplos armiger* qui y est tolérant et *Strongylocentrotus* sp. qui y est très sensible. Ce résultat permet de supporter l'hypothèse que les stations du groupe A subissent une plus faible « perturbation » que celles du groupe B. De plus, il est intéressant de noter que certaines stations de la BSI sont présentes dans le groupe A, ce qui permet de supposer que ces perturbations pourraient être localisées dans des zones spécifiques de la BSI et non dans la totalité de l'étendue considérée (tableau 5-12, figure 5-37).

Pour les communautés échantillonnées lors de la campagne 2017, les résultats nous indiquent que la similarité des stations du groupe C (toutes les stations de MR et quelques-unes de BSI) est principalement due à la présence de nématodes, de l'oursin plat *Echinarachnius parma* et de la clovisse arctique *Mesodesma arctatum* (tableau 5-13). Le groupe D (uniquement des stations de BSI) est principalement défini par le polychète *Bipalponephthys neotena*, le cumacé *Eudorellopsis integra* et le bivalve *Macoma calcarea* (tableau 5-13). La classification de Borja *et al.* (2000) indique que ces six espèces sont toutes indifférentes à la perturbation, même si *B. neotena* est connue pour être particulièrement opportuniste dans des zones perturbées (Pocklington, 1989). Une ressemblance peut être notée entre la composition des groupes A et C d'une part, et celle des groupes B et D d'autre part. Ces résultats pourraient indiquer que les stations du groupe B sont moins perturbées que les stations du groupe D. Cependant, la différence entre les communautés de chaque groupe pourrait s'expliquer par d'autres processus, comme l'hydrodynamisme plus faible dans la BSI, protégée par l'archipel des Sept-Îles, qu'à MR, plus exposée aux courants le long de la côte du Saint-Laurent.

*Tableau 5-12 : Similarité des assemblages benthiques entre les groupes obtenus pour les stations de la campagne 2016, calculés par la procédure SIMPER*

	Groupe A	Groupe B
Groupe A	<u>Similarité moyenne = 12,58 %</u> <i>Echinarachnius parma</i> (35,85 %) <i>Cistenides granulata</i> (32,58 %) <i>Strongylocentrotus</i> sp. (12,63 %) <i>Amphipolis squamata</i> (5,19 %) <i>Mesodesma arctatum</i> (3,88 %)	<u>Dissimilitude moyenne = 97,84 %</u> <i>Cistenides granulata</i> (8,37 %) <i>Echinarachnius parma</i> (7,83 %) <i>Macoma calcarea</i> (6,65 %) <i>Scoloplos cf. armiger/acutus</i> (6,22 %) <i>Ennucula tenuis</i> (5,78 %) <i>Thyasira</i> sp. (5,2 %)
Groupe B		<u>Similarité moyenne = 10 %</u> <i>Macoma calcarea</i> (27,09 %) <i>Ennucula tenuis</i> (13,65 %) <i>Scoloplos cf. armiger/acutus</i> (12,3 %) <i>Thyasira</i> sp. (11,66 %) <i>Nephtys caeca</i> (10,67 %) <i>Protomedieia grandimana</i> (6,21 %)

Les principaux taxons qui contribuent à la similarité ou la dissimilarité entre les groupes ont été indiqués.

Tableau 5-13 : Similarité des assemblages benthiques entre les groupes obtenus pour les stations de la campagne 2017, calculés par la procédure SIMPER

	<b>Groupe C</b>	<b>Groupe D</b>
<b>Groupe C</b>	<u>Similarité moyenne = 41,8 %</u> Nematoda (45,24 %) <i>Echinarachnius parma</i> (37,43 %) <i>Mesodesma arctatum</i> (6,8 %) <i>Phoxocephalus holbolli</i> (3,66 %)	<u>Dissimilitude moyenne = 95,79 %</u> Nematoda (17,28 %) <i>Bipalponephthys neotena</i> (13,14 %) <i>Eudorellopsis integra</i> (10,11 %) <i>Echinarachnius parma</i> (6,32 %) <i>Mesodesma arctatum</i> (5,72 %) <i>Macoma calcarea</i> (3,93 %)
<b>Groupe D</b>		<u>Similarité moyenne = 15,37 %</u> <i>Bipalponephthys neotena</i> (41,38 %) <i>Eudorellopsis integra</i> (23,34 %) <i>Macoma calcarea</i> (9,31 %) Amphipoda (3,80 %) <i>Ennucula tenuis</i> (2,48 %) Harpacticoida (2,13 %)

Les principaux taxons qui contribuent à la similarité ou la dissimilitude entre les groupes ont été indiqués.

### 5.3.2.3. Liens entre l'habitat et les communautés

#### Effets des paramètres du sédiment

Afin d'augmenter la puissance des tests statistiques réalisés dans cette section, les données des campagnes 2016 et 2017 ont été fusionnées. Les variables ont été transformées grâce au logarithme ou à la racine quatrième, afin de respecter les conditions d'application des modèles linéaires utilisés.

Dans un premier temps, des régressions linéaires simples ont été effectuées afin de mesurer la corrélation entre les paramètres du sédiment et les indices de diversité, et leur évolution l'un par rapport à l'autre. Le tableau 5-14 regroupe les résultats de chaque régression, et les relations significatives sont présentées aux figures 5-39 à 5-42.

Les régressions simples ont mis en évidence des relations significatives pour 12 couples de variables sur 28 (tableau 5-14), cependant les  $R^2$  de chaque régression varient entre 4,9 et 35,2 %, ce qui rend les relations peu significatives dans leur ensemble (figures 5-39 à 5-42). La profondeur de la station a une influence positive significative pour tous les indices de diversité sauf l'abondance. Ce résultat est en accord avec de nombreuses études écologiques réalisées dans des écosystèmes diversifiés (lire par exemple Rackocinski *et al.*, 1993 ; Oug, 1998). La concentration en matière organique, en chlorophylle *a* et en phaeopigments du sédiment influence positivement plusieurs indices (tableau 5-14). Ces composés sont des sources de nourriture importante pour les organismes benthiques ce qui peut expliquer la corrélation positive entre la concentration en pigment et les indices de diversité. Le contenu en gravier et en sable a une influence négative sur tous les indices de diversité, mais ces relations ne sont pas significatives. En revanche, la concentration en particules très fines possède une influence significativement positive sur l'abondance et la diversité de Shannon (tableau 5-14). Ces résultats peuvent être reliés à la préférence de type de sédiment des espèces benthiques, où les grosses particules induisent un stress physique sur les organismes.

Tableau 5-14 : Résultats des régressions simples effectuées sur les résultats des campagnes 2016 et 2017, afin d'analyser les liens entre les indices de diversité et les paramètres du sédiment

	S			N			H'			J'	
	slope	p		slope	p		slope	p		slope	p
Profondeur	0,71	<b>0,0008</b>		0,43	0,2066		0,70	<b>&lt; 0,0001</b>		0,16	<b>0,0040</b>
% (MO)	0,35	<b>0,0175</b>		0,37	0,1067		0,27	<b>0,0079</b>		0,05	0,1925
[Chla]	0,07	0,4803		0,32	<b>0,0236</b>		- 0,07	0,2766		- 0,05	<b>0,0461</b>
[Phaeo]	0,32	<b>0,0006</b>		0,56	<b>&lt; 0,0001</b>		0,13	<b>0,0401</b>		< - 0,01	0,8503
% (Gravier)	- 2,17	0,1033		- 4,81	<b>0,0182</b>		- 0,94	0,3062		0,06	0,8655
% (Sable)	- 0,30	0,4285		- 0,27	0,6489		- 0,27	0,2991		- 0,10	0,3000
% (Vase)	1,09	<b>0,0063</b>		1,34	<b>0,0314</b>		0,65	<b>0,0185</b>		0,03	0,7804

S = richesse spécifique ; N = abondance ; H' = indice de Shannon ; J' = indice de Piérou

Les coefficients de régression pour chaque variable sélectionnée ont été indiqués et les valeurs significatives sont indiquées en gras.

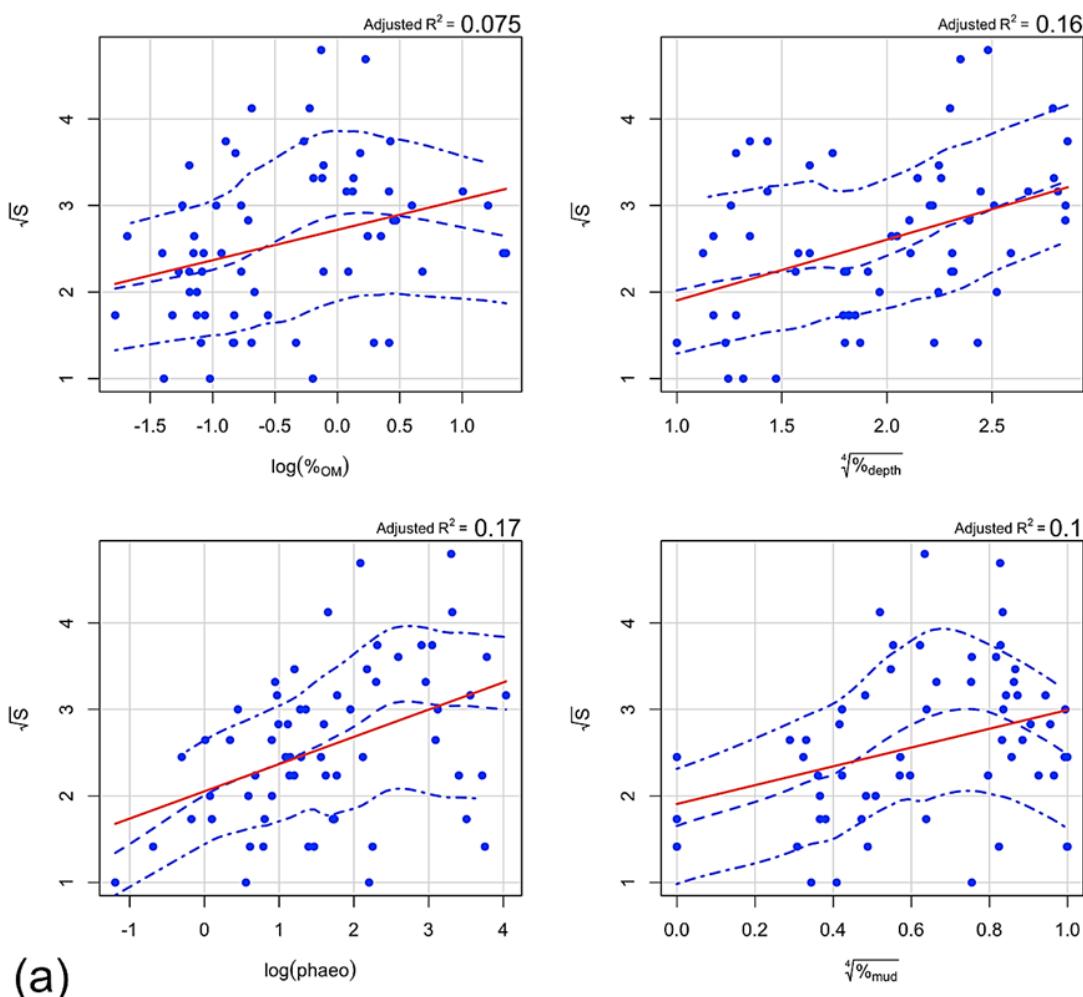
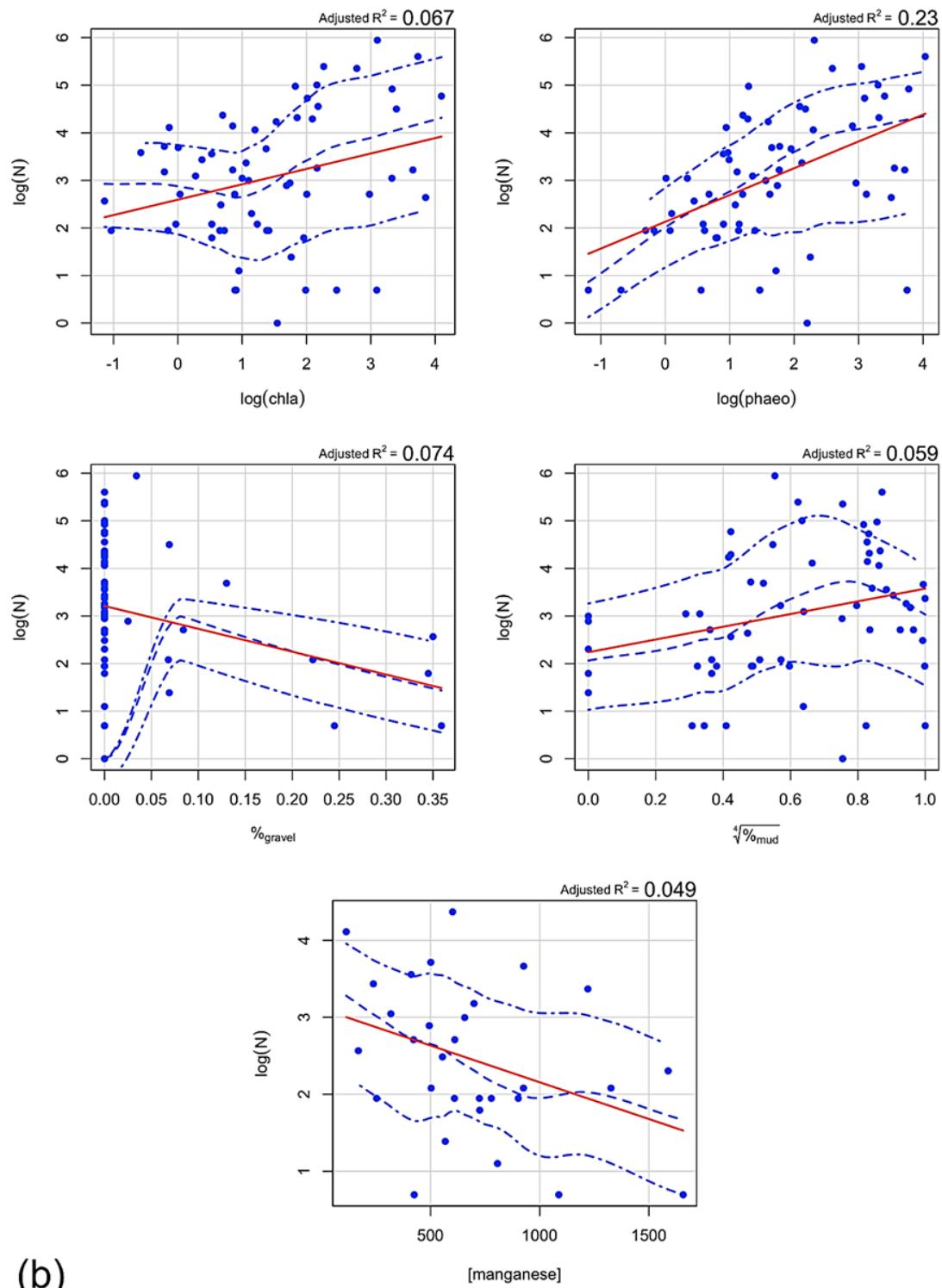


Figure 0-39 : Représentation des relations significatives entre les paramètres du sédiment, les concentrations en métaux lourds et la richesse spécifique (a) pour les stations échantillonnées en 2016 et 2017



(b)

Figure 0-40 : Représentation des relations significatives entre les paramètres du sédiment, les concentrations en métaux lourds et l'abondance (b) pour les stations échantillonnées en 2016 et 2017

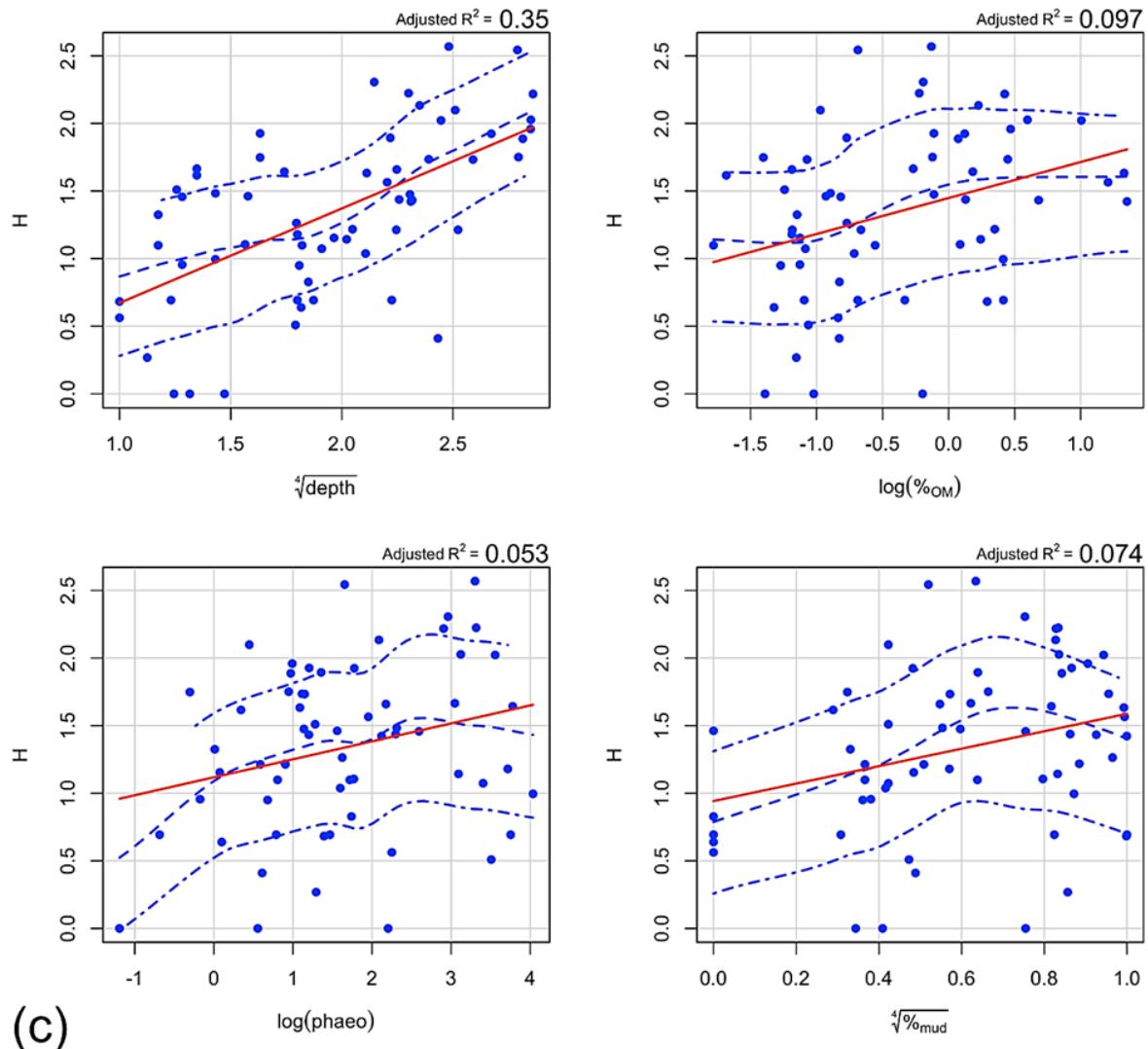


Figure 0-41 : Représentation des relations significatives entre les paramètres du sédiment, les concentrations en métaux lourds et l'indice de Shannon (c) pour les stations échantillonnées en 2016 et 2017

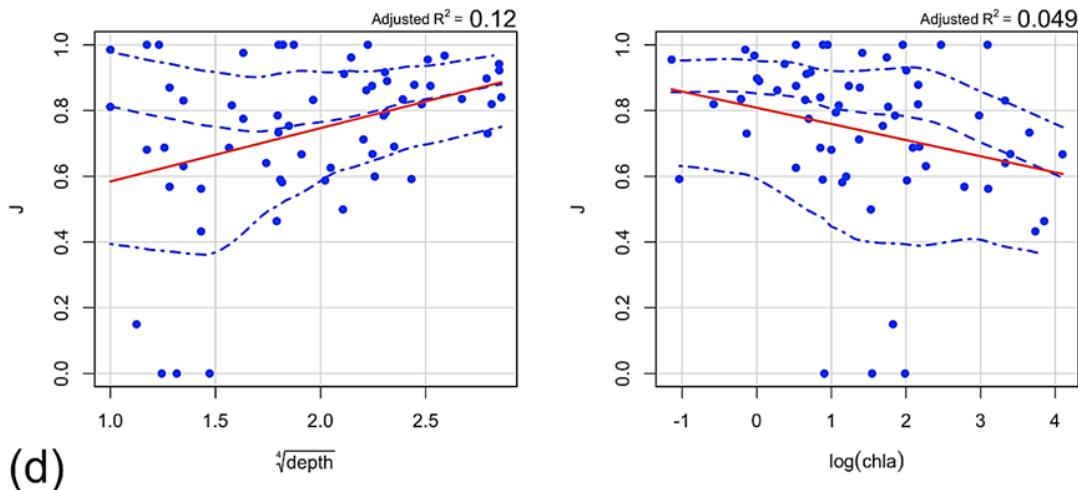


Figure 0-42 : Représentation des relations significatives entre les paramètres du sédiment, les concentrations en métaux lourds et l'indice de Piélou (d) pour les stations échantillonnées en 2016 et 2017

Des régressions linéaires multiples ont été effectuées pour connaître l'évolution de chaque indice de diversité lorsque l'ensemble des paramètres du sédiment varient. Le modèle avec l'AIC le plus bas a été sélectionné par la procédure step-wise pour sélectionner les variables explicatives les plus significatives. Le tableau 5-15 présente les variables sélectionnées pour chaque indice de diversité, ainsi que les valeurs d'intercept et les coefficients.

Les  $R^2$  ajustés des régressions multiples sont proches de 25 %, ce qui indique une significativité relativement correcte des résultats.

La profondeur a un effet sur la richesse spécifique, l'indice de Shannon et l'indice de Piélou (tableau 5-15). Ce résultat étant identique à celui des régressions simples, le rôle de la profondeur comme facteur influençant la diversité benthique est renforcé.

La concentration en phaeopigments est aussi significative pour la richesse spécifique et l'abondance (tableau 5-15).

La procédure step-wise est une des méthodes utilisées pour sélectionner les variables les plus significatives d'un modèle de régression. Cette méthode est utilisée dans l'étude des corrélations entre plusieurs variables (régressions). Elle cherche à réduire un modèle complexe avec beaucoup de variables explicatives (par exemple la salinité, la température ...), en un modèle plus explicatif et moins complexe (avec seulement certaines variables, qui sont les plus significatives).

Il est à noter que le contenu en matière organique n'est pas inclus dans ces modèles, ce qui laisse penser que ce paramètre a un rôle structurant sur la diversité (voir régressions simples), mais moins important que les autres, lorsque considéré avec l'ensemble des paramètres.

Les contenus en sable et en vase influencent chaque indice de diversité, mais les tests ne sont pas tous significatifs (tableau 5-15).

Tableau 5-15 : Résultats des régressions multiples effectuées sur les résultats des campagnes 2016 et 2017, afin d'analyser les liens entre les indices de diversité et les paramètres du sédiment

	S		N		H'		J'	
<i>R</i> <sup>2</sup> ajusté	0,3395		0,2536		0,3819		0,1275	
	slope	p	slope	p	slope	p	slope	p
Intercept	- 0,63	0,3930	- 0,001	0,9992	- 0,82	0,0931	0,74	<b>0,0013</b>
Profondeur	0,57	<b>0,0030</b>			0,65	< 0,0001	0,17	<b>0,0030</b>
% (MO)								
[Chla]								
[Phaeo]	0,21	<b>0,0162</b>	0,47	<b>0,0015</b>				
% (Gravier)								
% (Sable)	1,21	<b>0,0265</b>	1,62	0,0693	0,57	0,1030	- 0,26	0,1128
% (Vase)	1,52	<b>0,0168</b>	1,98	0,0535	0,83	<b>0,0315</b>	- 0,28	0,1174

S = richesse spécifique ; N = abondance ; H' = indice de Shannon ; J' = indice de Piélou  
Les coefficients de régression pour chaque variable sélectionnée ont été indiqués.

Une régression multiple multivariée par DistLM a été réalisée pour expliquer les liens entre les assemblages d'espèces et les paramètres du sédiment. Une procédure step-wise a été effectuée, et le AIC a été utilisé comme critère de sélection.

La figure 5-43 présente les résultats de la dbRDA effectuée sur ces résultats.

Les variables sélectionnées sont :

- la profondeur,
- le pourcentage en matière organique,
- le contenu en chlorophylle *a* et
- le pourcentage de gravier (résultats identiques pour le logarithme des abondances ou les présences/absences).

Selon la position des points dans le plan obtenu par les axes de la dbRDA, il est possible d'observer que la profondeur et le pourcentage de matière organique jouent un rôle important dans la structure des assemblages d'espèces, en particulier pour les stations de BSI où une forte variabilité est observée au sein du groupe (figure 5-43).

Les communautés de CPC, MR et BDA semblent être particulièrement discriminées par un contenu en chlorophylle *a* élevé et peu de matière organique.

Le pourcentage de gravier, bien que significatif, ne possède pas d'influence importante sur les assemblages d'espèces.

Il est important de noter que ce modèle n'explique que 11,2 % de la variabilité totale, ce qui indique qu'il ne peut pas expliquer une part importante de la variabilité du système.

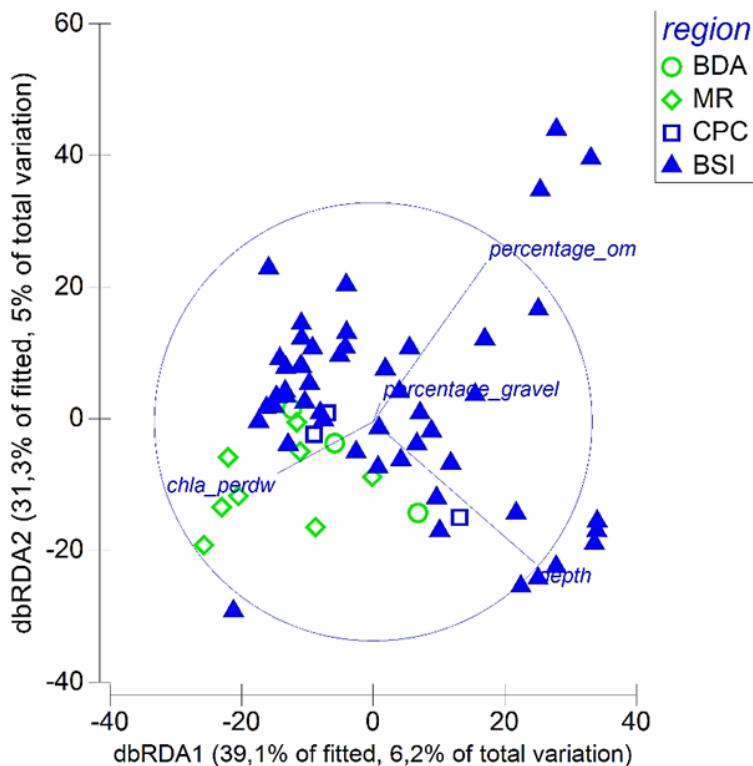


Figure 0-43 : Analyse de redondance basée sur les distances (dbRDA) étudiant les relations entre les assemblages d'espèces et les paramètres du sédiment aux stations échantillonnées lors des campagnes 2016 et 2017

### Influence des métaux lourds

Cette section ne concerne que les stations de la campagne 2016 où des échantillons ont été collectés pour les analyses de métaux lourds. Pour ces régressions, les variables ont été transformées au besoin grâce au logarithme ou à la racine quatrième afin de respecter les conditions d'application des modèles linéaires utilisés.

Des régressions linéaires simples ont été effectuées pour mesurer la corrélation entre les concentrations de métaux lourds et les indices de diversité. Le tableau 5-16 regroupe les résultats de chaque régression, et les figures 5-39 à 5-42 présentent les relations significatives.

Les résultats de ces régressions n'ont pu mettre en évidence qu'une seule relation significative négative parmi les 36 combinaisons, entre l'abondance et la concentration en manganèse (tableau 5-16, figure 5-41). Il est à noter néanmoins que, même si les relations ne sont pas significatives, tous les métaux sauf le mercure, semblent avoir des impacts négatifs (non-significatifs) sur la richesse spécifique, l'abondance et l'indice de Shannon ; et positifs sur l'indice de Piélou. Ces résultats pourraient être expliqués par trois hypothèses :

- les espèces qui composent cette communauté sont impactées par les métaux lourds, mais la diversité totale ne change pas ;
- les métaux lourds n'ont pas d'influence structurante sur les communautés ou
- les relations entre paramètres de diversité et concentrations en métaux ne sont pas linéaires.

D'après la littérature, la première hypothèse semblerait la plus plausible, car il a été montré que des successions écologiques peuvent avoir lieu sous l'effet d'un gradient de concentration en métaux lourds (lire par exemple Rakocinski *et al.*, 1997 ; Calabretta et Oviatt, 2008).

Certaines espèces pourraient ainsi être privilégiées par rapport à d'autres en fonction de leur tolérance physiologique aux métaux lourds, et des espèces opportunistes pourraient aussi en bénéficier.

Concernant la troisième hypothèse, des recherches plus approfondies sont nécessaires pour confirmer si d'autres modèles mathématiques (comme des relations logistiques) sont plus significatifs que les modèles linéaires.

Enfin, il est important de mentionner que l'étude actuelle ne prend en compte que la macrofaune benthique, or les métaux lourds peuvent aussi avoir des rôles structurants sur d'autres classes de taille d'organismes, comme la méiofaune ou le phytobenthos.

*Tableau 5-16 : Résultats des régressions simples effectuées sur les résultats des campagnes 2016 et 2017, afin d'analyser les liens entre les indices de diversité et les paramètres du sédiment*

Paramètres	S		N		H'		J'	
	slope	p	slope	p	slope	p	slope	p
[Arsenic]	- 2,90	0,0716	- 0,63	0,2460	- 0,44	0,1330	- 0,03	0,7620
[Cadmium]	- 13,03	0,2402	- 5,27	0,1490	- 0,84	0,6750	1,34	0,0693
[Chrome]	- 0,03	0,1230	- 0,01	0,1640	< - 0,01	0,4810	< 0,01	0,1280
[Cuivre]	- 0,77	0,3204	- 0,27	0,2820	- 0,02	0,8340	0,04	0,3890
[Mercure]	0,33	0,6933	0,25	0,3594	0,14	0,3421	0,03	0,6355
[Plomb]	- 1,81	0,0538	- 0,53	0,0927	- 0,18	0,2870	0,03	0,6260
[Zinc]	- 1,56	0,1273	- 0,49	0,1600	- 0,12	0,5246	0,09	0,1930
[Fer]	- 1,68	0,1090	- 0,50	0,1556	- 0,16	0,3870	0,08	0,2690
[Manganèse]	- 0,01	0,0832	< - 0,01	<b>0,0436</b>	< - 0,01	0,3190	< 0,01	0,1910

S = richesse spécifique ; N = abondance ; H' = indice de Shannon ; J' = indice de Piélou

Les coefficients de régression pour chaque variable sélectionnée ont été indiqués et les valeurs significatives sont indiquées en gras.

Des régressions multiples ont été effectuées pour connaître l'évolution de chaque indice de diversité lorsque l'ensemble des concentrations en métaux lourds varient. Le modèle avec l'AIC le plus bas a été sélectionné par une procédure step-wise pour identifier les métaux les plus significatifs.

Le tableau 5-17 présente les métaux sélectionnés pour chaque indice de diversité, et les coefficients ont été obtenus par des régressions simples entre les deux variables.

Il est à noter que les concentrations des métaux sont fortement corrélées entre elles, ce qui peut apporter un biais dans la régression.

Ces résultats montrent que les indices de diversité ont une relation positive avec de nombreux métaux, en particulier le cadmium et le mercure.

Cependant, aucune tendance robuste ne ressort de cette analyse, ce qui semble indiquer que les indices de diversité ne sont pas de bons indicateurs écologiques de l'effet des métaux lourds sur les communautés benthiques.

Tableau 5-17 : Résultats des régressions multiples effectuées sur les résultats des campagnes 2016 et 2017, afin d'analyser les liens entre les indices de diversité et les concentrations de métaux lourds

R <sup>2</sup> ajusté	S		N		H'		J'	
	0,1730		0,2047		0,1176		0,2488	
	slope	p	slope	p	slope	p	slope	p
Intercept	11,44	<b>0,0116</b>	3,98	<b>0,0215</b>	3,14	<b>&lt; 0,0001</b>	1,08	<b>&lt; 0,0001</b>
[Arsenic]			1,88	0,1183	- 0,65	<b>0,0372</b>	- 0,46	<b>0,0071</b>
[Cadmium]	35,42	0,1111	13,15	0,1060				
[Chrome]								
[Cuivre]	2,25	0,1260						
[Mercure]	1,22	0,1478	0,48	0,0826	0,27	0,0816		
[Plomb]	- 5,72	<b>0,0215</b>	- 1,57	0,0380				
[Zinc]								
[Fer]								
[Manganèse]	< - 0,01	0,1882	< - 0,01	<b>0,0382</b>				

S = richesse spécifique ; N = abondance ; H' = indice de Shannon ; J' = indice de Piélou

Les coefficients de régression pour chaque variable sélectionnée ont été indiqués et les valeurs significatives sont indiquées en gras

Une régression multiple multivariée par DistLM a été effectuée pour expliquer les liens entre les assemblages benthiques et les concentrations en métaux lourds dans le sédiment. Une procédure step-wise a été effectuée, et le R<sup>2</sup> ajusté a été utilisé comme critère de sélection. Les métaux lourds sélectionnés sont le zinc, le cuivre, le plomb et l'arsenic, et ils sont significatifs à la fois pour les abondances ou les données transformées en présences/absences. La figure 5-44 présente les résultats de la dbRDA effectuée sur ces résultats. Les concentrations en arsenic et en plomb (expliquant le plus l'axe vertical) ne semblent pas avoir d'effet particulièrement discriminant sur les communautés de BSI, en revanche les concentrations en cuivre et en plomb semblent pouvoir les discriminer (expliquant le plus l'axe horizontal). Enfin, il est à noter qu'aucune conclusion robuste ne peut être apportée pour les stations de MR et CPC car le nombre de stations échantillonnées y est trop faible.

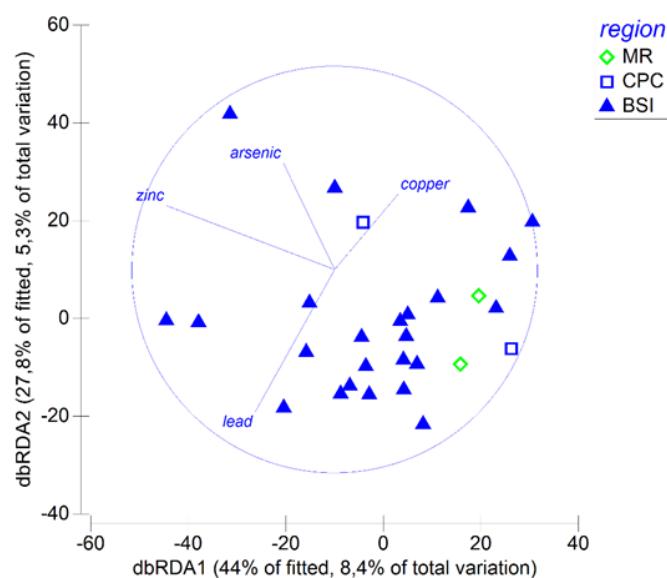


Figure 0-44 : Analyse de redondance basée sur les distances (dbRDA) étudiant les relations entre les assemblages d'espèces et concentrations de métaux lourds aux stations échantillonnées lors des campagnes 2016 et 2017

### 5.3.3. Comparaison des campagnes 2014, 2016 et 2017

#### 5.3.3.1. Paramètres du sédiment

Afin de permettre les comparaisons entre les trois campagnes, les concentrations en chlorophylle *a* et en phaeopigments ont été retirées de l'analyse, car manquantes pour les stations de la campagne 2014.

La PERMANOVA multivariée a mis en évidence une différence significative entre les campagnes au niveau de leurs paramètres sédimentaires (tableau 5-18). En particulier, cette différence se trouve au niveau de la campagne 2014, qui est significativement différente des campagnes 2016 et 2017 (tableau 5-19). Ceci peut s'expliquer par le fait que la campagne 2014 n'a pas suivi le même plan expérimental que les autres. En effet, le but de cette campagne a été de comparer deux types de zones qui partagent des caractéristiques physico-chimiques semblables, tandis que les campagnes 2016 et 2017 ont cherché à obtenir un portrait global de la zone d'étude ce qui a permis d'échantillonner des stations aux caractéristiques plus diverses.

*Tableau 5-18 : Résultats de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) multivariée testant l'effet de la Campagne sur les paramètres du sédiment des stations échantillonnées lors des trois campagnes*

	Abondances (logarithme)			
	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Campagne	2	103	12,624	<b>0,0001</b>
Résidus	101	412		
Total	103	515		

dl = degré de liberté ; SC = somme des carrés

Les valeurs significatives sont présentées en caractère gras.

*Tableau 5-19 : Résultats des tests a posteriori de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) multivariée testant l'effet de la Campagne sur les paramètres du sédiment des stations échantillonnées lors des trois campagnes*

	t	p(perm)
14 – 16	4,2211	<b>0,0001</b>
14 – 17	4,2233	<b>0,0001</b>
16 – 17	1,0903	0,3063

Les valeurs significatives sont présentées en caractère gras.

#### 5.3.3.2. Ensemble des communautés

Deux PERMANOVAs multivariées ont été effectuées pour mettre en évidence les différences significatives entre les assemblages d'espèces collectées

- a. lors des campagnes 2014 et 2017 (espèces plus grandes que 500 µm), et
- b. des campagnes 2016 et 2017 (plus grandes que 1 mm).

Les résultats de la première analyse sont compilés dans le tableau 5-20, et ceux de la seconde dans le tableau 5-21. Les résultats montrent que les communautés échantillonnées lors des campagnes 2014 et 2017 sont significativement différentes (abondances ou présences/absences ; tableau 5-20), de même que pour les communautés des campagnes 2016 et 2017 (abondances ou présences/absences ; tableau 5-21). Ces résultats pourraient être expliqués par l'hypothèse évoquée au paragraphe précédent. Cependant, le fait que les communautés des campagnes 2016 et 2017 ne soient pas identiques, alors que leur plan d'échantillonnage est identique, supposerait plutôt une faible stabilité

interannuelle des communautés benthiques dans la baie de Sept-Îles. D'autres études sont cependant nécessaires pour tester cette hypothèse.

*Tableau 0-20 : Résultats de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) multivariée testant l'effet de la Campagne sur les assemblages d'espèces supérieures à 500 µm des stations échantillonnées en 2014 et 2017 (logarithme des abondances ou présence/absence)*

	Abondances (logarithme)			
	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Campagne	1	37 492	11,4600	<b>0,0001</b>
Résidus	67	219 200		
Total	68	256 690		
Présences/absences				
	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Campagne	1	46 337	16,5410	<b>0,0001</b>
Résidus	67	187 690		
Total	68	234 030		

dl = degré de liberté ; SC = somme des carrés

Les valeurs significatives sont présentées en caractère gras.

*Tableau 0-21 : Résultats de l'analyse de variance par permutation (PERMANOVA) multivariée testant l'effet de la Campagne sur les assemblages d'espèces supérieures à 1 mm des stations échantillonnées en 2016 et 2017 (logarithme des abondances ou présence/absence)*

	Abondances (logarithme)			
	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Campagne	1	18 453	4,5773	<b>0,0001</b>
Résidus	62	249 950		
Total	63	268 410		
Présences/absences				
	dl	SC	F-ratio	p(perm)
Campagne	1	20 151	5,2878	<b>0,0001</b>
Résidus	62	236 280		
Total	63	256 430		

dl = degré de liberté ; SC = somme des carrés

Les valeurs significatives sont présentées en caractère gras.

## 5.4. Constats et recommandations

Il est à rappeler que, dans le cadre de la campagne réalisée en 2014, les sédiments et communautés ont été caractérisés au sein de sites potentiellement perturbés et de sites considérés comme peu perturbés (références). Pour les campagnes de 2016 et 2017, l'objectif a été d'obtenir un portrait des communautés benthiques et des sédiments à l'échelle de la baie complète (baie de Sept-Îles et archipel à son entrée). Des différences significatives ont été détectées entre la campagne de 2014 et celles de 2016 et 2017 au niveau de leurs paramètres sédimentaires et de leurs communautés, ce qui peut s'expliquer par le fait que la campagne 2014 n'a pas suivi le même plan expérimental que les autres.

### Campagne de 2014

Les tests statistiques démontrent une différence significative du contenu en **matière organique** selon les sites et, globalement, les valeurs sont plus élevées dans les sites potentiellement perturbés. Cela pourrait être attribué à plusieurs facteurs. Des analyses complémentaires devront être réalisées afin de déterminer l'importance et la source des apports en matière organique (terrigène, anthropique, marine) et l'hydrodynamisme dans la baie de Sept-Îles. D'autre part, la variance plus élevée dans les

sites potentiellement perturbés pourrait indiquer une hétérogénéité plus importante du milieu, comparativement aux stations des sites références plus semblables.

Concernant la **granulométrie du sédiment**, les sites sont majoritairement de type vase et argile (particules < 63 µm), avec peu de sable et de gravier. Les sites potentiellement perturbés semblent plus uniformes et composés de sédiments plus fins comparativement aux sites de référence.

Les tests statistiques sur les **métaux lourds** indiquent une différence entre les sites potentiellement perturbés et les sites références uniquement pour les concentrations en cuivre et en zinc. Les concentrations en métaux sont globalement plus élevées dans les sites potentiellement perturbés que dans les sites références.

Au niveau de la **diversité**, 159 taxons ont été identifiés, répartis dans 12 phylums. Parmi ces taxons, 11 sont dits « courants » (fréquence supérieure à 50 %), 46 sont « constants » (entre 11 et 49 %) et 102 sont « rares » (inférieure à 10 %). D'autres espèces resteraient à être identifiées dans la baie de Sept-Îles. Par ailleurs, la biomasse des organismes benthiques est significativement différente entre les sites potentiellement perturbés et les sites références ; cela pourrait s'expliquer par la présence exclusive de l'oursin plat *Echinorachnius parma* dans les sites références : 96,8 %.

Des tests statistiques sur l'**ensemble des communautés** ont démontré une différence significative, entre les sites potentiellement perturbés et références, détectée pour les abondances et les présences/absences (dues à la fois aux abondances des taxons et à la composition spécifique de ces assemblages.). Le polychète *Bipalponephthys neotena* est le taxon qui contribue le plus à la dissimilarité entre les sites potentiellement perturbés et références. Il s'agit d'une espèce *a priori* opportuniste et montrant une grande résistance à l'augmentation des concentrations résultant des activités anthropiques.

Ainsi, plusieurs différences ont pu être mises en évidence entre les sites potentiellement perturbés et références, en particulier au niveau de leur contenu en matière organique, de la concentration de certains métaux lourds et de leurs assemblages benthiques. Une forte concentration en matière organique, des sédiments très fins et la présence d'espèces de petite taille sont des éléments indicateurs d'une perturbation dans le milieu.

## Campagnes de 2016 et 2017

La concentration en **matière organique** est en moyenne plus importante dans les stations de la baie (notamment dans le fond de la baie) que dans les autres régions.

Concernant les **pigments chlorophylliens**, les plus hautes valeurs moyennes de chlorophylle *a* sont trouvées à CPC et MR, et celles de phaeopigments à BSI et CPC. Une plus forte concentration au fond de la baie et au nord de la Pointe Noire est observée, selon un schéma similaire à la matière organique.

Les stations échantillonnées lors des campagnes 2016 et 2017 l'ont été à différentes profondeurs et réparties à travers la totalité de la baie ; la **granulométrie** des sédiments analysés est ainsi diversifiée. De façon générale, toutes les stations possèdent peu de gravier. Une concentration élevée en sable est détectée à CPC, MR et BDA, avec des valeurs plus faibles à BSI, tandis que des valeurs élevées de vase ne sont détectées qu'à BSI et en particulier au fond de la baie. Une teneur plus élevée en grosses particules est directement reliée à un hydrodynamisme élevé dans la zone, et ceci semble être le cas pour les stations à CPC, MR et BDA.



Au niveau de la **diversité des communautés benthiques**, en 2016, 66 taxons ont été identifiés, répartis dans 9 phylums différents. Aucun taxon n'est désigné « courant », 16 taxons sont « constants » à travers les stations et 50 taxons sont « rares ». En 2017, ce sont 91 taxons qui ont été déterminés, répartis dans 9 phylums différents. 1 taxon est « courant », 32 taxons sont « constants » et 58 taxons sont « rares ». Il resterait encore des espèces à découvrir.

Des tests statistiques sur **l'ensemble des communautés** ont permis de démontrer que les stations ne semblent pas présenter de regroupement géographique particulier. Les assemblages d'espèces présents à BSI sont globalement différents de ceux présents à CPC, MR et BDA, mais que certaines stations au sein de la BSI partagent des similarités avec les autres régions.

Enfin, afin d'étudier les **effets des paramètres du sédiment**, les données des campagnes 2016 et 2017 ont été fusionnées. Le rôle de la profondeur comme facteur influençant la diversité benthique a notamment été mis en évidence.

Concernant l'**influence des métaux lourds**, au sein des stations de 2016, une seule relation significative négative parmi les 36 combinaisons a été démontrée, entre l'abondance et la concentration en manganèse.

Les résultats des régressions multiples, effectuées pour connaître l'évolution de chaque indice de diversité lorsque l'ensemble des concentrations en métaux lourds varient, montrent que les indices de diversité ont une relation positive avec de nombreux métaux, en particulier le cadmium et le mercure. Cependant, aucune tendance robuste ne ressort de cette analyse, ce qui semble indiquer que les indices de diversité ne sont pas de bons indicateurs écologiques de l'effet des métaux lourds sur les communautés benthiques.

L'analyse statistique effectuée pour expliquer les liens entre les assemblages benthiques et les concentrations en métaux lourds dans le sédiment montrent que les concentrations en arsenic et en plomb ne semblent pas avoir d'effet particulièrement discriminant sur les communautés de BSI ; en revanche les concentrations en cuivre et en plomb semblent pouvoir les discriminer.

Dans le cadre de l'Observatoire environnemental de la baie de Sept-Îles, le mandat consistait à établir un portrait de la communauté benthique dans la baie, exposé dans le présent chapitre.

Pour une étape ultérieure, il serait judicieux de réaliser une revue de littérature approfondie portant sur la toxicité des éléments présents dans les sédiments (métaux, HAP, etc.) vis-à-vis des différentes espèces benthiques identifiées dans la baie. À travers les études déjà existantes, il serait possible d'identifier des concentrations pour chaque substance à ne pas dépasser afin de ne pas impacter les espèces composant la communauté benthique de la zone d'étude. Pour les espèces n'ayant pas l'objet d'études de recherche, il serait envisageable de réaliser des protocoles d'essai afin de mesurer les effets toxiques des substances chez ces organismes en laboratoire.

Par ailleurs, il est recommandé de poursuivre le suivi de l'état de la population benthique, et ce, de façon périodique.

## 5.5. Références bibliographiques

- Anderson M. J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology* 26, 32–46.
- Anderson, M.J. 2005. PERMANOVA: a FORTRAN computer program for permutational multivariate analysis of variance. Department of Statistics, University of Auckland, New Zealand.
- Anderson M. J., Gorley R. N., Clarke K. R. (2008). PERMANOVA+ for PRIMER: guide to software and statistical methods, PRIMER-E Ltd., Plymouth, UK.
- Appeltans W., Bouchet P., Boxshall G. A., Fauchald K., Gordon D. P., Hoeksema B. W., Poore G. C. B., van Soest R. W. M., Stöhr S., Walter T. C., Costello M. J. (2012). World Register of Marine Species. <http://www.marinespecies.org>.
- Archambault P., Banwell K., Underwood A. (2001). Temporal variation in the structure of intertidal assemblages following the removal of sewage. *Marine Ecology Progress Series* 222, 51–62.
- Bale A. J., Kenny A. J. (2005). "Sediment analysis and seabed characterisation". In: Eleftheriou A., McIntyre A. (eds). Methods for the study of Marine benthos. Blackwell publishing.
- Borja A., Franco J., Pérez V. (2000). A Marine Biotic Index to Establish the Ecological Quality of Soft-Bottom Benthos Within European Estuarine and Coastal Environments. *Marine Pollution Bulletin* 40, 1100–1114.
- Bourassa L., Giguère M., Brulotte S., Cyr C., Perreault L. (2008). Évaluation de la croissance, du taux d'exploitation et du recrutement à la pêche de la mactre de Stimpson (*Mactromeris polynyma*) de la Moyenne-Côte-Nord, Québec. Rapport technique canadiennes sciences halieutiques et aquatiques 3004.
- Bousfield E.L. (1964). Coquillages des côtes canadiennes de l'atlantique. Le musée canadien de la nature, Ottawa, 89 p.
- Brunel P., Bossé L., Lamarche G. (1998). Catalogue of the marine invertebrates of the Estuary and Gulf of Saint-Lawrence. Ottawa: NRC Research Press. 405 p.
- Calabretta C. J., Oviatt C. A. (2008). The response of benthic macrofauna to anthropogenic stress in Narragansett Bay, Rhode Island: a review of human stressors and assessment of community conditions. *Marine Pollution Bulletin* 56, 1680–1695.
- Clarke K. R., Gorley R. N. (2006). PRIMER v6: User Manual/Tutorial. PRIMER-E, Plymouth, UK, 190 p.
- Clarke K. R., Warwick R. M. (1994). Changes in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation. Plymouth Marine Laboratory. Plymouth, UK, 141 p.
- Clarke K. R., Warwick R. M. (2001). Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation, 2<sup>nd</sup> edition. PRIMER-E, Plymouth, UK, 175 p.
- Cranford P., Anderson R., Archambault P., Balch T., Bates S., Bugden G., Callier M. D., Carver C., Comeau L., Hargrave B., Harrison G., Horne E., Kepay P. E., Li W. K. W., Mallet A., Ouellette M., Strain P. (2006). Indicators and thresholds for use in assessing shellfish aquaculture impacts on fish habitat. DFO Canadian Science Advisory Secretariat Research Document 2006/034.
- Dauer D. M. (1993). Biological criteria, environmental health and estuarine microbenthic community structure. *Marine Pollution Bulletin* 26:5, 249–257.
- Dauvin J.-C., Bellan G., Bellan-Santini D. (2010). Benthic indicators: From subjectivity to objectivity – Where is the line? *Marine Pollution Bulletin* 60, 947–953.
- Davies B. E. (1974). Loss-on-ignition as an estimate of soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 38, 150–151.
- Downes B. J., Barmuta L. A., Fairweather P. G., Faith D. P., Keough M. J., Lake P. S., Mapstone B. D., Quinn G. P. (2002). Monitoring ecological impacts: concepts and practices in flowing waters. Cambridge University Press, Cambridge, 434 p.
- Drouin A., Archambault P., Sirois P. (2011). Distinction of nektonic and benthic communities between fish-present (*Salvelinus fontinalis*) and natural fishless lakes. *Boreal Environment Research* 16, 101-114.
- Fraschetti S., Bianchi C., Terlizzi A., Fanelli G., Morri C., Boero F. (2001). Spatial variability and human disturbance in shallow subtidal hard substrate assemblages: a regional approach. *Marine Ecology Progress Series* 212, 1–12.
- Gargas E. (1972). Measurement of microalgal primary production (phytoplankton and microbenthos) in the Smålandshavet (Denmark). *Ophelia* 10, 75-89.
- Glasby T. M. (1997). Analysing data from post-impact studies using asymmetrical analyses of variance: A case study of epibionts on marinas. *Australian Journal of Ecology* 22, 448–459.
- Grall J., Coïc N. (2005). Synthèse des méthodes d'évaluation de la qualité du benthos en milieu côtier. 90p.
- Gray J. S. (1979). Pollution-induced changes in populations. *Philosophical transaction of the Royal Society Series B* 286, 545-561.
- Gray J. S. (1989). Effects of environmental stress on species rich assemblages. *Biological Journal of the Linnean Society* 37, 19–32.

- Guille A. (1970). Bionomie benthique du plateau continental de la côte Catalane Française, II - les communautés de la macrofaune. Tome XXI.
- Hurlbert S. (1984). Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecological Monographs* 54, 187–211.
- Holm-Hansen O., Lorenzen C. J., Holmes R. W., Strickland J. D. H. (1965). Fluorimetric determination of chlorophyll. *ICES Journal of Marine Science* 30, 3-15.
- Leavitt P. R., Hodgson D. A. (2001). "Sedimentary Pigments". In: Smol J. P., Birks H. J., Last W. M. (eds). *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments, Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Leong L. S., Tanner P. A. (1999). Comparison of Methods for Determination of Organic Carbon in Marine Sediment. *Marine Pollution Bulletin* 38, 875–879.
- Lorenzen C. (1966). A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts* 13, 223–227.
- MacIntyre H. L., Geider R. J., Miller D. C. (1996). Microphytobenthos: the ecological role of the "secret garden" of unvegetated, shallow-water marine habitats. I. Distribution, abundance and primary production. *Estuaries* 19:2A, 186–201.
- Marcon, E. (2015). Mesures de la Biodiversité. Master. Kourou, France. Disponible au : [https://hal-agroparistech.archives-ouvertes.fr/cel-01205813/file/Mesures\\_de\\_la\\_Biodiversite.pdf](https://hal-agroparistech.archives-ouvertes.fr/cel-01205813/file/Mesures_de_la_Biodiversite.pdf)
- McArdle B. H., Anderson M. J. (2001). Fitting multivariate models to community data: a comment on distance-based redundancy analysis. *Ecology* 82:1, 290–297.
- Environnement Canada, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (2007). Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'application : prévention, dragage et restauration.
- Nowicki B. L., Nixon S. W. (1985). Benthic community metabolism in a coastal lagoon ecosystem. *Marine Ecology Progress Series* 22, 21–30.
- Oug E. (1998). Relating species patterns and environmental variables by canonical ordination: an analysis of soft-bottom macrofauna in the region of Tromsø, northern Norway. *Marine Environmental Research* 45, 29–45.
- Pearson T., Rosenberg R. (1978). Macrofaunal succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanography and Marine Biology Annual Review* 16, 229–311.
- Pettibone M. H. (1963). Marine polychaete worms of the New England region ; 1. Families Aphroditidae through Trochochaetidae, Smithsonian Institution, Washington, 356 p.
- Pocklington P. (1989). Polychaetes of Eastern Canada: An illustrated key to polychaetes of Eastern Canada including the Eastern Arctic. Pêches et Océans Canada, Mont-Joli, 274 p.
- Pohle G. W., Thomas MLH (2001). Marine biodiversity monitoring. Monitoring protocol for marine benthos: intertidal and subtidal macrofauna. A report by the marine biodiversity monitoring committee (Atlantic maritime ecological science cooperative, Huntsman marine science centre) to the ecological monitoring and assessment network of Environment Canada. <http://www.biomareweb.org/downloads/mbm.pdf>
- Quinn G. P., Keough M. J. (2002). Experimental design and data analysis for biologists. Cambridge University Press, Cambridge, 560 p.
- Rakocinski C. F., Heard R. W., LeCroy S. E., McLellan J. A., Simons T. (1993). Seaward change and zonation of the sandy-shore macrofauna at Perdido Key, Florida, USA. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 36, 81–104.
- Rakocinski C. F., Brown S. S., Gaston G. R., Heard R. W., Walker W. W., Summers K. J. (1997). Macrofaunal responses to natural and contaminant related gradients in northern Gulf of Mexico estuaries. *Ecological Applications* 7, 1278–1298.
- Reuss N., Conley D. J. (2005). Effects of sediment storage conditions on pigment analyses. *Limnology and Oceanography: Methods* 3, 477–487.
- Riaux-Gobin C., Klein B. (1993). "Microphytobenthic Biomass Measurement Using HPLC and Conventional Pigment Analysis". In: Kemp P. F., Sherr B. F., Sherr E. B., Cole J. J. (eds). *Handbooks of Methods in Aquatic Microbial Ecology*. Lewis Publishers
- Robert P., McKindsey C. W., Chaillou G., Archambault P. (2013). Dose-dependent response of a benthic system to biodeposition from suspended blue mussel (*Mytilus edulis*) culture. *Marine Pollution Bulletin* 66, 92–104.
- Rosenberg R., Blomqvist M., Nilsson H. C., Cederwall H., Dimming A. (2004). Marine quality assessment by use of benthic species-abundance distributions: a proposed new protocol within the European Union Water Framework Directive. *Marine Pollution Bulletin* 49, 728–739.
- Snelgrove P. V. (1999). Getting to the bottom of marine biodiversity: sedimentary habitats. *BioScience* 49, 129–138.
- Underwood A. J. (1993a). How not to design an environmental monitoring program: a case study from the FAC (up in Botany Bay). *Australian Biologist* 6, 194–197.



- Underwood A. J. (1993b). The mechanics of spatially replicated sampling programs to detect environmental impacts in a variable world. *Australian Journal of Ecology* 18, 99-116.
- Underwood A. J. (1994). "Things environmental scientists (and statisticians) need to know to receive (and give) better statistical advice". In: Fletcher D. J., Manly B. F. J. (eds). Statistics in ecology and environmental monitoring. University of Otago Press, Dunedin.
- Underwood A. J. (2000a). Importance of experimental design in detecting and measuring stresses in marine populations. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery* 7, 3-24.
- Underwood A. J. (2000b). "Trying to detect impacts in marine habitats: comparisons with suitable reference areas". In: Sparks T. (ed). Statistics in Ecotoxicology. John Wiley & Sons, Toronto.
- Underwood A. J., Chapman M. G. (2003). Power, precaution, Type II error and sampling design in assessment of environmental impacts. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 296, 49-70.
- Varela M., Penas E. (1985). Primary production of benthic microalgae in an intertidal sand flat of the Ria de Arosa, NW Spain. *Marine Ecology Progress Series* 25, 111-119.
- Wentworth C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology* 30:5, 377-392.

## Annexe

*Annexe 5-1 : Index des stations échantillonnées lors des trois campagnes avec leurs coordonnées géographiques (degrés décimaux, référence WGS84), la profondeur et la synthèse des paramètres qui y ont été collectés.*

ID	Nom de la station	Campagne	Longitude (°O)	Latitude (°N)	Profondeur (m)	Benthos	Sédiments	Pigments	Métaux	Sonde YSI	Sonde CTD
1	2014_BSI_01	2014	-66,492	50,167	7,9	X	X		X	X	
2	2014_BSI_02	2014	-66,475	50,166	8,3	X	X		X	X	
3	2014_BSI_03	2014	-66,489	50,166	4,5	X	X		X	X	
4	2014_BSI_04	2014	-66,494	50,167	8,1	X	X		X	X	
5	2014_BSI_05	2014	-66,497	50,168	7,8	X	X		X	X	
6	2014_BSI_06	2014	-66,453	50,163	7,1	X	X		X	X	
7	2014_BSI_07	2014	-66,450	50,164	6,2	X	X		X	X	
8	2014_BSI_08	2014	-66,463	50,163	5,7	X	X		X	X	
9	2014_BSI_09	2014	-66,465	50,164	6,1	X	X		X	X	
10	2014_BSI_10	2014	-66,481	50,165	6,9	X	X		X	X	
11	2014_BSI_11	2014	-66,400	50,207	7,1	X	X		X	X	
12	2014_BSI_12	2014	-66,398	50,207	5,1	X	X		X	X	
13	2014_BSI_13	2014	-66,402	50,207	5,1	X	X		X	X	
14	2014_BSI_14	2014	-66,403	50,206	8,8	X	X		X	X	
15	2014_BSI_15	2014	-66,398	50,205	8,9	X	X		X	X	
16	2014_BSI_16	2014	-66,362	50,184	9,6	X	X		X	X	
17	2014_BSI_17	2014	-66,366	50,185	8,9	X	X		X	X	
18	2014_BSI_18	2014	-66,366	50,185	7,9	X	X		X	X	
19	2014_BSI_19	2014	-66,371	50,190	4,2	X	X		X	X	
20	2014_BSI_20	2014	-66,378	50,196	8,3	X	X		X	X	
21	2014_BSI_21	2014	-66,506	50,143	8,1	X	X		X	X	
22	2014_BSI_22	2014	-66,505	50,143	5,0	X	X		X	X	
23	2014_BSI_23	2014	-66,507	50,144	4,9	X	X		X	X	
24	2014_BSI_24	2014	-66,508	50,143	9,3	X	X		X	X	
25	2014_BSI_25	2014	-66,505	50,142	9,1	X	X		X	X	
26	2014_BSI_26	2014	-66,391	50,093	7,2	X	X		X	X	
27	2014_BSI_27	2014	-66,392	50,093	6,9	X	X		X	X	
28	2014_BSI_28	2014	-66,391	50,094	8,0	X	X		X	X	
29	2014_BSI_29	2014	-66,390	50,094	5,2	X	X		X	X	
30	2014_BSI_30	2014	-66,389	50,093	6,0	X	X		X	X	
31	2014_BSI_31	2014	-66,293	50,152	7,3	X	X		X	X	
32	2014_BSI_32	2014	-66,293	50,152	4,0	X	X		X	X	
33	2014_BSI_33	2014	-66,293	50,153	4,2	X	X		X	X	
34	2014_BSI_34	2014	-66,295	50,153	7,7	X	X		X	X	
35	2014_BSI_35	2014	-66,295	50,153	8,0	X	X		X	X	
36	2014_BSI_36	2014	-65,918	50,280	7,6	X	X		X	X	

Annexe 5-1 (suite)

ID	Nom de la station	Campagne	Longitude (°O)	Latitude (°N)	Profondeur (m)	Benthos	Sédiments	Pigments	Métaux	Sonde YSI	Sonde CTD
37	2014_BSI_37	2014	-65,917	50,281	5,5	X	X		X	X	
38	2014_BSI_38	2014	-65,920	50,282	5,4	X	X		X	X	
39	2014_BSI_39	2014	-65,920	50,279	8,8	X	X		X	X	
40	2014_BSI_40	2014	-65,916	50,279	8,1	X	X		X	X	
45	2016_BDA_05	2016	-67,159	49,770	4,7	X	X	X			X
48	2016_BDA_08	2016	-67,143	49,786	14,9	X	X	X			X
56	2016_BDA_16	2016	-67,129	49,766	35,0	X	X	X			X
63	2016_MR_05	2016	-65,245	50,287	11,0	X	X	X	X	X	
65	2016_MR_07	2016	-65,226	50,287	7,1	X	X	X	X	X	
71	2016_MR_13	2016	-65,241	50,275	25,4	X	X	X	X	X	
87	2016_CPC_11	2016	-66,866	50,010	10,9	X	X	X	X	X	
90	2016_CPC_14	2016	-66,787	50,028	12,3	X	X	X	X	X	
100	2016_CPC_24	2016	-66,757	50,007	45,0	X	X	X	X	X	
101	2016_BSI_01	2016	-66,458	50,165	28,5	X	X	X	X	X	
102	2016_BSI_02	2016	-66,491	50,214	2,7	X	X	X	X	X	
103	2016_BSI_03	2016	-66,513	50,175	23,6	X	X	X	X	X	
104	2016_BSI_04	2016	-66,518	50,216	19,9	X	X	X	X	X	
105	2016_BSI_05	2016	-66,439	50,217	2,3	X	X	X	X	X	
106	2016_BSI_06	2016	-66,438	50,242	1,9	X	X	X	X	X	
107	2016_BSI_07	2016	-66,450	50,230	3,0	X	X	X	X	X	
108	2016_BSI_08	2016	-66,414	50,215	1,0	X	X	X	X	X	
109	2016_BSI_09	2016	-66,414	50,207	1,9	X	X	X	X	X	
110	2016_BSI_10	2016	-66,371	50,177	1,0	X	X	X	X	X	
111	2016_BSI_11	2016	-66,277	50,202	7,1	X	X	X	X	X	
112	2016_BSI_12	2016	-66,356	50,180	10,7	X	X	X	X	X	
113	2016_BSI_13	2016	-66,321	50,193	6,2	X	X	X	X	X	
114	2016_BSI_14	2016	-66,443	50,187	40,5	X	X	X	X	X	
115	2016_BSI_15	2016	-66,459	50,206	28,3	X	X	X	X	X	
116	2016_BSI_16	2016	-66,465	50,195	32,7	X	X	X	X	X	
117	2016_BSI_17	2016	-66,383	50,167	17,6	X	X	X	X	X	
118	2016_BSI_18	2016	-66,454	50,133	28,8	X	X	X	X	X	
119	2016_BSI_19	2016	-66,411	50,114	51,0	X	X	X	X	X	
120	2016_BSI_20	2016	-66,301	50,151	11,7	X	X	X	X	X	
121	2016_BSI_21	2016	-66,320	50,138	24,5	X	X	X	X	X	
122	2016_BSI_22	2016	-66,306	50,156	24,2	X	X	X	X	X	
123	2016_BSI_23	2016	-66,379	50,096	62,7	X	X	X	X	X	
124	2016_BSI_24	2016	-66,270	50,144	65,9	X	X	X	X	X	
125	2016_BSI_25	2016	-66,471	50,170	61,0	X	X	X	X	X	
126	2016_BSI_26	2016	-66,501	50,166	39,7	X	X	X	X	X	
127	2017_BSI_01	2017	-66,455	50,162	2,4	X	X	X			X
132	2017_BSI_06	2017	-66,471	50,173	35,8	X	X	X			X
139	2017_BSI_13	2017	-66,500	50,167	2,7	X	X	X			X

Annexe 5-1 (suite)

ID	Nom de la station	Campagne	Longitude (°O)	Latitude (°N)	Profondeur (m)	Benthos	Sédiments	Pigments	Métaux	Sonde YSI	Sonde CTD
154	2017_BSI_28	2017	-66,465	50,197	26,0	X	X	X			X
156	2017_BSI_30	2017	-66,451	50,191	30,5	X	X	X			X
171	2017_BSI_45	2017	-66,373	50,175	4,2	X	X	X			X
176	2017_BSI_50	2017	-66,302	50,150	28,0	X	X	X			X
177	2017_BSI_51	2017	-66,306	50,156	66,0	X	X	X			X
186	2017_BSI_60	2017	-66,320	50,139	66,9	X	X	X			X
187	2017_BSI_61	2017	-66,410	50,113	19,7	X	X	X			X
188	2017_BSI_62	2017	-66,456	50,134	10,4	X	X	X			X
193	2017_BSI_67	2017	-66,491	50,222	10,5	X	X	X			X
194	2017_BSI_68	2017	-66,438	50,242	5,1	X	X	X			X
195	2017_BSI_69	2017	-66,438	50,217	2,5	X	X	X			X
196	2017_BSI_70	2017	-66,409	50,209	6,0	X	X	X			X
197	2017_BSI_71	2017	-66,408	50,204	9,2	X	X	X			X
198	2017_BSI_72	2017	-66,457	50,228	3,3	X	X	X			X
206	2017_BSI_80	2017	-66,354	50,175	21,2	X	X	X			X
211	2017_BSI_85	2017	-66,288	50,189	37,9	X	X	X			X
221	2017_BSI_95	2017	-66,321	50,192	29,7	X	X	X			X
228	2017_BSI_102	2017	-66,516	50,183	1,6	X	X	X			X
230	2017_BSI_104	2017	-66,376	50,172	60,6	X	X	X			X
231	2017_BSI_105	2017	-66,512	50,212	4,2	X	X	X			X
236	2017_BSI_110	2017	-66,459	50,206	16,7	X	X	X			X
251	2017_MR_10	2017	-65,256	50,292	10,5	X	X	X			X
254	2017_MR_13	2017	-65,239	50,285	13,3	X	X	X			X
255	2017_MR_14	2017	-65,242	50,274	25,5	X	X	X			X
257	2017_MR_16	2017	-65,220	50,284	10,3	X	X	X			X
260	2017_MR_19	2017	-65,207	50,287	3,3	X	X	X			X