

Chapitre 4

# QUALITÉ DES SÉDIMENTS



Crédit photo : Elliot Dreujou

Crédit photo : Julie Carrière

Crédit photo : Julie Carrière

## Table des matières

|  |            |
|--|------------|
| Liste des figures .....  | 215        |
| Liste des tableaux .....   | 217        |
| <b>4        QUALITÉ DES SÉDIMENTS .....</b>  | <b>219</b> |
| PARTIE I : Portrait général .....  | 220        |
| Introduction .....   | 220        |
| 4.1        Sites et stratégie d'échantillonnage .....  | 220        |
| 4.2        Résultats .....   | 222        |
| 4.2.1        Granulométrie .....   | 222        |
| 4.2.2        Minéralogie de la fraction argileuse (< 2µm) des sédiments de la baie de Sept-Îles .....                            | 225        |
| 4.2.2.1        Méthode préparatoire .....  | 225        |
| 4.2.2.2        Résultats et interprétation .....   | 225        |
| 4.2.3        Caractérisation chimique des sédiments .....  | 229        |
| 4.2.3.1        Métaux avec critères établis .....  | 230        |
| 4.2.3.1.1        Dépassement du critère de concentration seuil produisant un effet (CSE) .....                                   | 230        |
| 4.2.3.1.2        Dépassement des autres critères .....   | 231        |
| 4.2.3.1.3        Argiles postglaciaires et normalisation sur la base du fer des métaux avec critères établis .....               | 234        |
| 4.2.3.1.4        Facteurs d'enrichissement des métaux avec critères établis .....  | 238        |
| 4.2.3.1.5        Facteurs d'enrichissement des métaux avec critères établis : Sédiment de surface vs sédiment plus profond ..... | 242        |
| 4.2.3.2        Autres éléments quantifiés dans les échantillons de la campagne 2016 .....  | 246        |
| 4.2.3.2.1        Facteurs d'enrichissement de l'ensemble des métaux et métalloïdes .....   | 255        |
| 4.2.3.2.2        Composés organiques de l'étain et du plomb .....  | 258        |
| 4.2.3.2.3        Facteur d'enrichissement du fer dans les échantillons .....   | 261        |
| 4.2.3.2.4        Titane et molybdène : indicateurs de processus sédimentaire .....   | 262        |
| 4.2.4        Hydrocarbures linéaires (alcanes) et aromatiques polycycliques (HAP) .....  | 265        |
| 4.2.4.1        Hydrocarbures aliphatiques (alcanes) .....  | 266        |
| 4.2.4.2        Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) .....   | 268        |
| 4.2.5        Matière organique et isotopes stables du carbone et de l'azote .....  | 275        |
| 4.3        Constats et recommandations de la Partie I .....  | 281        |
| 4.3.1.1        Partie I : Portrait général .....   | 281        |
| 4.4        Partie II : Sources potentielles de l'arsenic .....   | 292        |
| 4.4.1        Introduction .....  | 292        |
| 4.4.2        Objectif .....  | 300        |
| 4.4.3        Sites et échantillonnage .....  | 300        |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 4.5     | Résultats et discussion .....  | 303 |
| 4.5.1   | Minéralogie de la fraction argileuse (< 2µm) des sédiments de rivières de Sept-Îles .... | 303 |
| 4.5.1.1 | Méthode préparatoire .....   | 303 |
| 4.5.1.2 | Résultats et interprétation .....  | 304 |
| 4.5.2   | Paramètres physico-chimiques, métaux dissous et particulaire de l'eau des rivières ....  | 307 |
| 4.6     | Constats et recommandations de la Partie II.....   | 314 |
| 4.7     | Références.....  | 316 |
|         | Annexes 4 .....  | 317 |
|         | Annexes 4A : cartes .....  | 317 |

Les autres annexes du chapitre 4 sont incluses dans le Volume 2.

## Liste des figures

|   |     |
|---|-----|
| Figure 4-1 : Ensemble des sites échantillonnés dans la baie de Sept-Îles.....   | 221 |
| Figure 4-2 : Ensemble des sites échantillonnés dans la baie Port-Cartier en 2016, pour le sédiment de surface .....   | 222 |
| Figure 4-3 : Granulométrie des échantillons de sédiment de surface de la baie de Sept-Îles, campagne 2014.....  | 223 |
| Figure 4-4 : Granulométrie des échantillons de sédiment de surface de la baie de Sept-Îles, campagne 2016.....  | 224 |
| Figure 4-5 : Localisation des échantillons analysés (A), cartes de distribution relative d'argiles (B-D), et cartes de la caractérisation des illites : Indice d'Esquevin (E) et cristallinité (F) .....  | 227 |
| Figure 4-6 : Teneur relative d'illite vs. l'indice d'Esquevin (A) et cristallinité de l'illite (B) des sédiments de la baie de Sept-Îles .....  | 228 |
| Figure 4-7 : Rapport Illite/chlorite-kaolinite de la fraction argileuse des sédiments .....   | 229 |
| Figure 4-8 : Relation entre la concentration en chrome et celle du nickel (en mg/kg de poids sec) dans .....  | 235 |
| Figure 4-9 : Concentration moyenne du chrome (en mg/kg de poids sec ; ± écart-type) selon le type de sédiment de surface, campagne 2014 et 2016.....  | 236 |
| Figure 4-10 : Relation entre les concentrations de l'aluminium et du magnésium (en mg/kg de poids sec) selon la nature de l'échantillon de sédiment, campagnes 2014 et 2016 .....   | 237 |
| Figure 4-11 : Facteur d'enrichissement des huit éléments avec critères établis pour la qualité du sédiment marin, dans la couche de surface et la couche de fond des sites situés dans la baie de Sept-Îles et à proximité (campagne 2016) .....  | 243 |
| Figure 4-12 : Facteur d'enrichissement des huit éléments avec critères établis pour la qualité du sédiment marin, dans la couche de surface et la couche de fond des sites situés dans la baie de Sept-Îles et à proximité (campagne 2016) .....  | 244 |
| Figure 4-13 : Facteur d'enrichissement des huit éléments avec critères établis pour la qualité du sédiment marin, dans la couche de surface et la couche de fond des sites situés à l'embouchure de la rivière Pentecôte (campagne 2016) .....  | 245 |
| Figure 4-14 : Matrice de corrélation de l'ensemble des éléments quantifiés pour les échantillons de la campagne de 2016, incluant la fraction argile des échantillons P1C, P2A, P3A et P4D de 2014.....   | 254 |
| Figure 4-15 : Relation entre la concentration en plomb et la concentration en baryum, pour tous les échantillons analysés de la campagne de 2016, incluant la fraction argile des échantillons P1C, P2A, P3A et P4D de 2014 .....   | 255 |
| Figure 4-16 : Schéma de la dégradation du tributylétain par la perte successive d'un groupe butyle .....  | 258 |
| Figure 4-17 : Identification du tétraéthylplomb (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> Pb) par chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse. A) chromatogramme obtenu de l'analyse de l'extrait du sédiment de référence PACS-2; B) chromatogramme obtenu de l'analyse de l'extrait de la fraction argileuse du sédiment P1C2014; C) spectre de masse du composé apparaissant à 6,5 minutes dans les chromatogrammes A et C, identifié comme étant le tétraéthylplomb par la recherche de la librairie de spectres de masse de l'instrument analytique..... | 260 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 4-18 : Facteur d'enrichissement en fer des échantillons sur la base de la teneur en fer des argiles postglaciaires de la région.....  | 262 |
| Figure 4-19 : Rapport molaire 100Ti/Al du sédiment de surface des échantillons de la campagne 2016 .....   | 264 |
| Figure 4-20 : Relation entre la concentration en arsenic et le rapport molaire 100Ti/Al du sédiment pour tous les échantillons de la campagne 2016.....  | 264 |
| Figure 4-21 : Concentration totale des hydrocarbures aliphatiques en µg/kg de sédiment sec .....   | 266 |
| Figure 4-22 : Ratios des concentrations totales des hydrocarbures aliphatiques (alcanes) dans le sédiment de la couche de surface sur les concentrations totales des hydrocarbures aliphatiques dans le sédiment de la couche de fond .....  | 267 |
| Figure 4-23 : Ratios de la somme des concentrations des hydrocarbures alcanes légers sur la somme des concentrations des hydrocarbures lourds ( $\Sigma C10-C23/\Sigma C24-C40$ ).....   | 268 |
| Figure 4-24 : Concentration totale des hydrocarbures aromatiques polycycliques en µg/kg de sédiment sec .....  | 270 |
| Figure 4-25 : Indice de diagnostic basé sur la concentration de l'anthracène et du phénanthrène (ANT/ANT + PHE). ....  | 272 |
| Figure 4-26 : Indice de diagnostic basé sur la concentration du rétène et du chrysène (RET/RET + CHY) .....  | 273 |
| Figure 4-27 : Relation entre le contenu en carbone total du sédiment et la concentration en hydrocarbures aliphatiques (A) et hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP (B).....   | 274 |
| Figure 4-28 : Relation entre les concentrations du carbone total et de l'azote total dans les échantillons de sédiment de surface des campagnes 2014 et 2016.....  | 276 |
| Figure 4-29 : Comparaison de la concentration en carbone (%) dans le sédiment des échantillons de 2016, avant (C total) et après le traitement à l'acide dilué pour éliminer les carbonates (Corg).....  | 277 |
| Figure 4-30 : Relation entre les valeurs du rapport des isotopes stables du carbone ( $^{13}C/^{12}C$ ou $\delta^{13}C$ ) et de l'azote ( $^{15}N/^{14}N$ ou $\delta^{15}N$ ) pour les échantillons de sédiment global des campagnes de 2014 et 2016.....  | 278 |
| Figure 4-31 : Comparaison de la signature du rapport des isotopes stables du carbone $\delta^{13}C$ dans le sédiment des échantillons de 2016, avant ( $^{13}C_{total}$ ) et après le traitement à l'acide dilué pour éliminer les carbonates ( $^{13}C_{org}$ ) .....   | 280 |
| Figure 4-32 : Synthèse des données recueillies dans les sédiments de la baie de Sept-Îles – 2013, 2014, 2016 et 2017. ....   | 281 |
| Figure 4-33 : Concentration d'effets rares (CER) des métaux normalisés, Métaux dont la concentration mesurée est au seuil normalisé d'effets rares (MDDELCC) ; Lorsque plus d'un métal est au seuil de concentration d'effets rares à une station, les métaux sont représentés par les parts divisées dans un même point. ....   | 282 |
| Figure 4-34 : Concentration seuil produisant un effet (CSE) des métaux normalisés, Métaux dont la concentration mesurée est au seuil normalisé produisant un effet (MDDELCC).....  | 282 |
| Figure 4-35 : Métaux dont la concentration mesurée est au seuil normalisé produisant un effet (MDDELCC), Concentration d'effets occasionnels (CEO) des métaux normalisés.....  | 283 |
| Figure 4-36 : Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) totaux, Concentrations en hydrocarbures aromatiques polycycliques totaux (µg/kg) aux stations et représentées par classes de concentration .....   | 285 |
| Figure 4-37: Concentration d'effets rares (CER) des seuils normalisés de concentration en hydrocarbures ; Hydrocarbures aromatiques polycycliques dont la concentration mesurée est au seuil normalisé d'effets rares (MDDELCC) ; Lorsque plus d'un métal est au seuil de concentration d'effets rares à une station, les métaux sont représentés par des parts divisées dans un même point..... | 285 |
| Figure 4-38: Concentration seuil produisant un effet (CSE) des seuils normalisés de concentration en hydrocarbures ; Hydrocarbures aromatiques polycycliques dont la concentration mesurée est au seuil normalisé produisant un effet (MDDELCC).....   | 286 |
| Figure 4-39 : Concentration d'effets occasionnels (CEO) des seuils normalisés de concentration en hydrocarbures ; Hydrocarbures aromatiques polycycliques dont la concentration mesurée est au seuil normalisé d'effets occasionnels (MDDELCC).....  | 286 |
| Figure 4-40 : Seuil de contamination modérée en HAP totaux ; Stations où la concentration en hydrocarbures aromatiques polycycliques totaux est sous le seuil de contamination et au-dessus du seuil pour une contamination modérée (Mora et al. 2010) .....   | 287 |
| Figure 4-41 : Matière organique ; Pourcentage de matière organique contenu dans les sédiments des stations échantillonnées, représenté par classes de pourcentages .....   | 287 |
| Figure 4-42 : Distribution de l'arsenic selon les classes de concentration (mg/kg) prédictes dans le sédiment de la baie de Sept-Îles par une méthode d'interpolation, à partir des mesures réalisées sur les échantillons prélevés en 2013, 2014 et 2016.....   | 292 |
| Figure 4-43 : Profil de l'arsenic dans le sédiment marin du golfe du St-Laurent et du fjord du Saguenay, tiré de Gobeil 1996.....  | 293 |
| Figure 4-44 : Voies de transformation redox de l'arsenic (As) dans le sédiment marin, sous l'influence du manganèse (Mn) et du fer (Fe).....   | 294 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 4-45 : Relation entre les concentrations de l'arsenic et du manganèse (A), et .....  | 295 |
| Figure 4-46 Relation entre les concentrations du manganèse et du fer dans les échantillons de sédiment global (fond et surface) de la baie de Sept-Îles prélevés en 2016.....   | 296 |
| Figure 4-47 : Image Landsat/Copernicus datée 13 octobre 2006, .....   | 297 |
| Figure 4-48 : Embouchure H = rivière Hall; R = rivière des Rapides; F = rivière Au Foin; P = rivière du Poste (Source : Google Earth, Images Landsat/Copernicus datées 30 décembre 1997(A) et 10 mai 2016 (B) .....   | 298 |
| Figure 4-49 : Image Landsat/Copernicus datée 24 août 2010, tirée de Google Earth .....  | 299 |
| Figure 4-50 : Localisation des cinq sites d'échantillonnage sur les rivières, en novembre 2017.....   | 300 |
| Figure 4-51 : Détail du site d'échantillonnage de la rivière des Rapides (Source : Google Earth) .....  | 301 |
| Figure 4-52 : Détail du site d'échantillonnage de la rivière du Poste (Source : Google Earth) .....   | 301 |
| Figure 4-53 : Détail du site d'échantillonnage de la rivière Au Foin (Source : Google Earth).....   | 302 |
| Figure 4-54 : Détail du site d'échantillonnage de la rivière Hall (Source : Google Earth).....  | 302 |
| Figure 4-55 : Détail du site d'échantillonnage de la rivière Moisie (Source : Google Earth) .....   | 303 |
| Figure 4-56 : Localisation des échantillons analysés (A), cartes de distribution relative d'argiles (B-D), et cartes de la caractérisation des illites : Indice d'Esquevin (E) et cristallinité (F) .....   | 305 |
| Figure 4-57 : Teneur relative d'illite vs. l'indice d'Esquevin (A) et cristallinité de l'illite (B) des sédiments de la région de Sept-Îles .....   | 306 |
| Figure 4-58 : Relation entre les concentrations du bore (B) et du sodium (Na) dans la phase dissoute de l'eau des rivières .....  | 309 |
| Figure 4-59 : Relation entre les concentrations totales de l'arsenic et du fer dans la phase dissoute de l'eau des rivières -La concentration de l'arsenic dans l'échantillon de la rivière Moisie a été extrapolée comme étant la moitié de la limite de détection de cet élément, soit 0,01 µg/L..... | 309 |
| Figure 4-60 : Relation entre la concentration en chrome et celle du nickel dans le sédiment de surface des échantillons des cinq rivières.....  | 312 |
| Figure 4-61 : Relation entre la concentration en magnésium et celle de l'aluminium dans le sédiment de surface des échantillons des cinq rivières.....  | 312 |
| Figure 4-62 : Relation entre la concentration en manganèse et celle de l'arsenic dans les argiles de quatre rivières et du site du Vieux Poste (A) et le sédiment de surface des échantillons des cinq rivières (B) .....   | 313 |
| Figure 4-63 : Relation entre la concentration en manganèse et celle du fer dans les argiles de quatre rivières et du site Vieux Poste (A) et le sédiment de surface des échantillons des cinq rivières (B) .....  | 314 |

## Liste des tableaux

|   |     |
|---|-----|
| Tableau 4-1 : Minéralogie de la fraction argileuse des sédiments de la baie de Sept-Îles .....  | 226 |
| Tableau 4-2 : Définitions des critères pour l'évaluation de qualité des sédiments marins au Québec (Environnement Canada et MDDEP, 2007).....   | 229 |
| Tableau 4-3 : Concentrations des métaux et métalloïde (mg/kg, poids sec) associées aux critères pour la qualité des sédiments marins et teneurs naturels dans les argiles marines postglaciaires (Saulnier et Gagnon, 2006 ; Environnement Canada et MDDEP, 2007) .....   | 230 |
| Tableau 4-4 : Sédiment couche de surface. Concentration (mg/kg, poids sec) des métaux et métalloïdes ayant des critères pour la qualité des sédiments marins.....   | 232 |
| Tableau 4-5 : Sédiment couche de fond. Concentration (mg/kg, poids sec) des métaux et métalloïde ayant des critères pour la qualité des sédiments marins.....   | 233 |
| Tableau 4-6 : Sédiment de la fraction argile de la couche de surface,.....  | 233 |
| Tableau 4-7 : Argiles postglaciaires. Concentration (mg/kg, poids sec) des métaux et métalloïde, ayant des valeurs de critères de qualité pour les sédiments marins, dans l'échantillon global (Vieux Poste) et pour la fraction argileuse (rivière Ste-Marguerite) ..... | 238 |
| Tableau 4-8 : Codification du facteur d'enrichissement d'un élément dans le sédiment, selon la sévérité .....   | 238 |
| Tableau 4-9 : Sédiment couche de surface. Facteur d'enrichissement des métaux et métalloïde normés.....   | 239 |
| Tableau 4-10 : Sédiment couche de fond. Facteur d'enrichissement des métaux et métalloïde avec critères établis ..  | 241 |
| Tableau 4-11 : Sédiment couche de surface, fraction argileuse. Facteur d'enrichissement des métaux et métalloïde avec critères établis. ..  | 242 |
| Tableau 4-12 : Argiles postglaciaires. Concentration (mg/kg, poids sec) des métaux alcalins et alcalino-terreux.....  | 247 |
| Tableau 4-13 : Ensemble des échantillons de sédiment de la campagne 2016. Concentration (mg/kg, poids sec) des métaux alcalins et alcalino-terreux (échantillons d'argile case en bleu). ....   | 248 |
| Tableau 4-14 : Argiles postglaciaires. Concentration (mg/kg, poids sec) des métaux et métalloïdes sans critères établis pour la qualité du sédiment marin .....   | 250 |



|   |     |
|---|-----|
| Tableau 4-15 : Ensemble des échantillons de sédiment de la campagne 2016. Concentration (mg/kg, poids sec) des métaux et métalloïdes sans critères établis pour la qualité du sédiment marin. Note : concentration pour l'aluminium et le fer exprimée en g/kg..... | 250 |
| Tableau 4-16 : Facteurs d'enrichissement des échantillons de sédiment de la campagne 2016 et 2014, pour les éléments ayant dépassé le seuil de FE= 5 (enrichissement modérément sévère) au moins une fois....   | 256 |
| Tableau 4-17 : Concentrations des hydrocarbures aromatiques polycycliques ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ , poids sec) associées aux critères pour la qualité des sédiments marins.....   | 265 |
| Tableau 4-18 : Ensemble des échantillons de sédiment de la campagne 2016. Concentration ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ , poids sec) des hydrocarbures aromatiques polycycliques normés (9 sur 13), ayant dépassés au moins une fois l'un des critères.....               | 271 |
| Tableau 4-19 : Résumé de l'ensemble des données recueillies pour les stations de suivi .....  | 288 |
| Tableau 4-20 : Minéralogie de la fraction argileuse des sédiments de la région de Sept-Îles .....   | 304 |
| Tableau 4-21 : Rapport d'intensités des argiles et caractérisation des illites, suivant l'indice d'Esquevin et cristallinité, des sédiments de la région de Sept-Îles. I: illite, K: kaolinite, C: chlorite .....   | 306 |
| Tableau 4-22 : Caractéristiques physico-chimiques des rivières.....   | 307 |
| Tableau 4-23 Concentration des métaux alcalins et alcalino-terreux dans la phase dissoute, moyenne de deux sous-échantillons par site .....   | 308 |
| Tableau 4-24 : Concentration des métaux alcalins et alcalino-terreux dans la phase particulaire, moyenne de trois sous-échantillons par site .....  | 308 |
| Tableau 4-25 : Concentration des métaux et métalloïdes dans la phase dissoute, moyenne de deux sous-échantillons par site .....   | 310 |
| Tableau 4-26 : Concentration des métaux et métalloïdes dans la phase particulaire, moyenne de trois sous-échantillons par site .....  | 310 |
| Tableau 4-27 : Concentration des métaux et métalloïdes dans le sédiment de surface .....  | 311 |
| Tableau 4-28 : Concentration des métaux et métalloïdes dans les argiles .....   | 311 |

## CHAPITRE 4

### QUALITÉ DES SÉDIMENTS

Auteurs :



Collaboration à la rédaction des sections 4.3 et 4.6 :

Collaboration avec les auteurs à la stratégie d'échantillonnage, à l'élaboration du protocole, aux travaux terrain et à l'interprétation des résultats :

Coordination avec collaborateurs :

Construction de la base de données :

Analyses granulométriques :

Analyses de laboratoire :

Travaux terrain

Cartes

Richard Saint-Louis, PhD, Professeur en chimie, chimiste agréé, Département de biologie, chimie et géographie, Université du Québec à Rimouski

Jean-Carlos Montero-Serrano, PhD., Professeur en géologie marine, Institut des Sciences de la Mer de Rimouski –UQAR

Julie Carrière, Ph.D., directrice du projet et directrice de l'INREST,  
Aurélie Le Hénaff, coordonnatrice de l'INREST

Julie Carrière, Ph.D., directrice du projet et directrice de l'INREST, Philippe Archambault, professeur à l'Université Laval, Elliot Dreujou, étudiant au doctorat à UQAR et à l'Université Laval, Geneviève Faille, coordonnatrice à l'OGSL,

INREST : 2013, 2014, 2016 et 2017 : Julie Carrière, Sophie Huguet, Aurélie Le Hénaff  
OGSL : 2013, 2014 et 2016 : Claude Tremblay, Geneviève Faille, Anne-Sophie Sainte-Marie

Laurence Paquette (INREST), Aurélie Le Hénaff (INREST), Kim Aubut-Demers (INREST)

Elliot Dreujou (2016, 2017), Gonzalo Bravo, Valérie De Carufel (2016), Chantal Méthot, Lisa Tréau de Coeli (2014)

Mathieu Babin M. Sc. chimiste Laboratoire de chimie marine et spectrométrie de masse (LCM-S)

Elliot Dreujou (2016, 2017), Lisa Tréau de Coeli (2014), Dany Levesque, Mathilde Dulude, Serge Gallienne (capitaine)

Auteure : Laurence Paquette, Collaborateurs : Richard St-Louis, professeur à l'UQAR, Geneviève Faille, coordonnatrice à l'OGSL, Elliot Dreujou, étudiant au doctorat à UQAR et à l'Université Laval, Philippe Archambault, professeur à l'Université Laval, Julie Carrière, directrice de projet et directrice de l'INREST

Approuvé par l'INREST :

Julie Carrière, Ph. D., directrice de projet et directrice de l'INREST

Exemple de sédiments retrouvés en zones perturbées



Exemple de sédiments retrouvés en zones non perturbées



Crédit photo : Julie Carrière

## PARTIE I : Portrait général

### Introduction

La baie de Sept-Îles a une longue histoire de développement économique lié aux ressources naturelles, en phase avec les cycles de l'économie mondiale. Elle est toujours le siège d'activités industrielles (transport maritime, terminaux miniers, aluminerie) et urbaines (trafic routier, ruissellements des surfaces asphaltées, rejets d'égout, émissions de combustibles fossiles, et autres) ; cette sollicitation crée une pression anthropique qui pourrait s'accroître sur l'écosystème de la baie. Une équipe pluridisciplinaire a été formée en 2013-2014 afin d'établir un portrait de l'état de la qualité des sédiments et de comprendre les changements temporels des communautés benthiques en lien avec les activités humaines autour de la zone à l'étude. Sous la direction de l'INREST, cette équipe compte des spécialistes de l'université du Québec à Rimouski, de l'Institut des sciences de la mer / UQAR, de l'université Laval, de l'Observatoire global du Saint-Laurent ainsi que de l'INREST. Des membres de l'équipe du Port de Sept-Îles et de la Corporation de protection de l'environnement de Sept-Îles ont également collaboré.

Les deux campagnes de 2013 et 2014 ont permis d'obtenir des données de base essentielles afin d'établir un portrait préliminaire. Le but spécifique de la troisième campagne de prélèvements (juin à août 2016) était de compléter et de raffiner le portrait des impacts des activités humaines sur le milieu. Ce document rapporte les résultats recueillis au cours des trois années d'échantillonnage soit 2013, 2014 et 2016.

### 4.1 Sites et stratégie d'échantillonnage

Pour la campagne d'échantillonnage de 2016, 38 sites ont été sélectionnés pour obtenir une couverture plus large de la zone d'étude (figures 4-1 et 4-2). La répartition des sites se définit comme suit :

- La baie de Sept-Îles : 24 sites (BSI 1 à 8) ;
- la baie Manitou (zone non impactée) : 3 sites (BM 2, 3 et 5) ;
- la baie Port-Cartier : 3 sites (BPC 4,5 et 8) ;
- l'embouchure de la rivière Pentecôte : 3 sites (PTRP 1, 2 et 3).

Ces sites s'ajoutent à ceux des campagnes de 2013 et 2014.

Les sites potentiellement perturbés sont situés en face de la compagnie minière Cliffs à l'époque et site du déversement de pétrole survenu en 2013 (P1), en face de l'aluminerie Alouette (P2), en face du rejet d'égouts de la Ville de Sept-Îles (P3) et en face de la compagnie minière IOC Rio Tinto (P4).

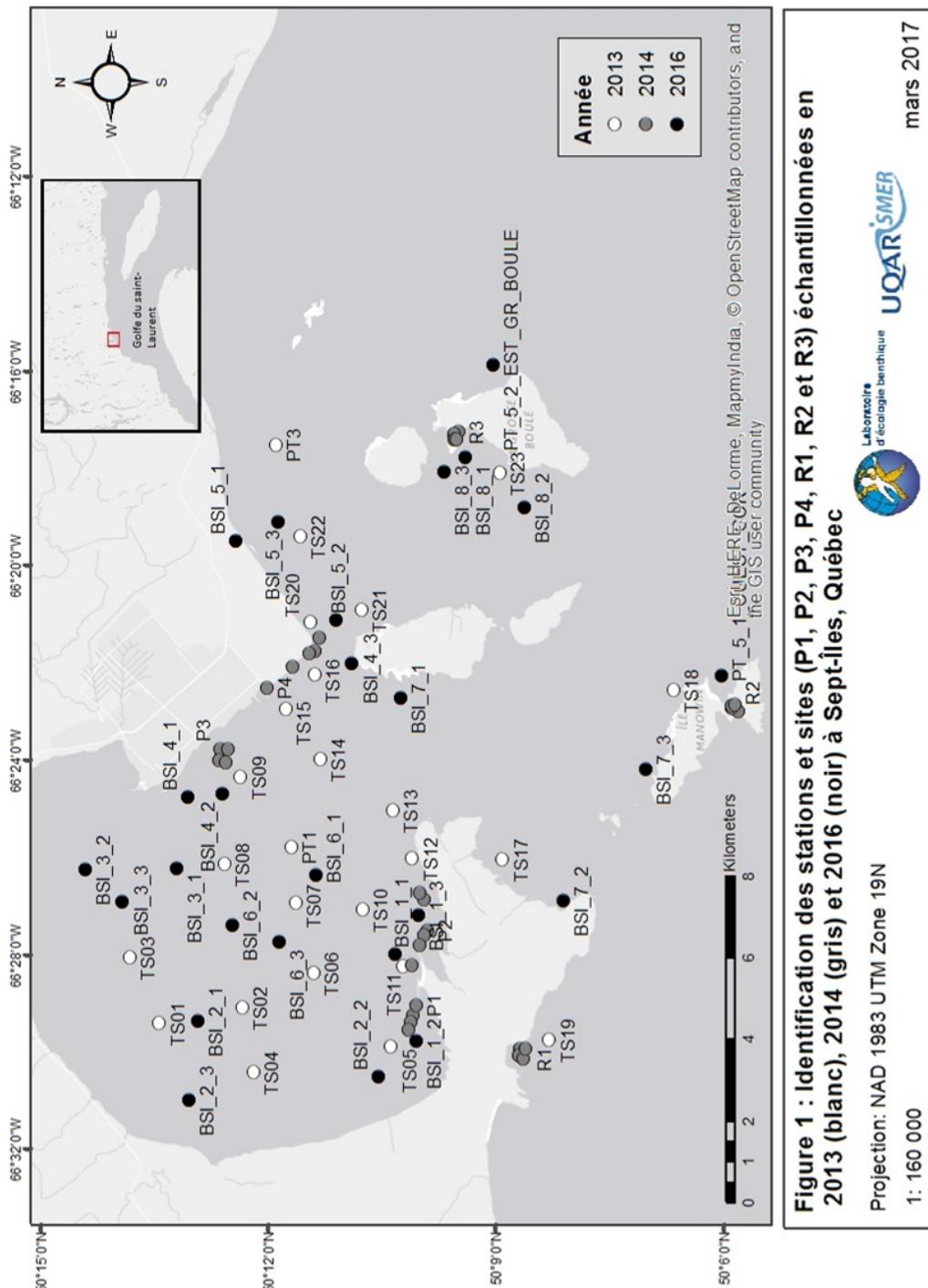
Les sites référence sont situés sur le côté sud de la péninsule de l'aluminerie Alouette (R1), sur l'île du Corossol (R2), sur l'île Grosse-Boule (R3), en région Matamek (R4), rivière Pentecôte (PTRP) et la baie Manitou.

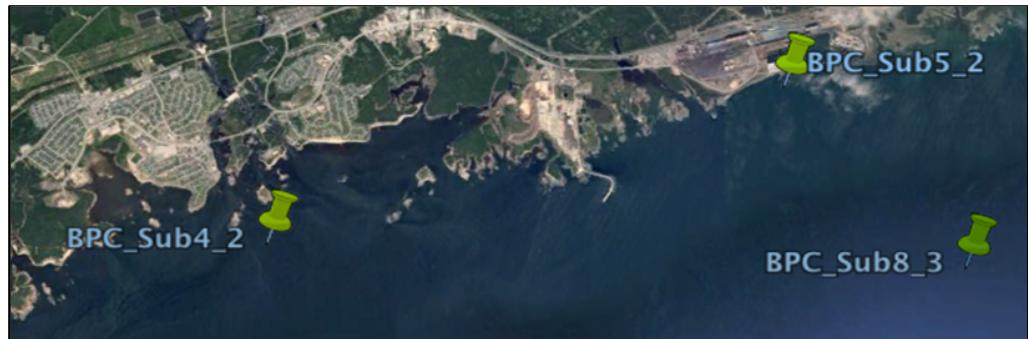
Lors de la campagne d'échantillonnage de l'été 2016, des échantillons d'argile postglaciaire ont été prélevés afin d'obtenir la signature chimique naturelle de cette région. Ces trois échantillons proviennent de la rivière Sainte-Marguerite et du site du Vieux-Poste.

Les échantillons pour les analyses physico-chimiques des sédiments ont été prélevés à l'aide d'une benne lors de l'échantillonnage du benthos (voir les détails des équipements à la section 5.2.2).

Pour 13 échantillons de 2016, le prélèvement réalisé avec la benne a été divisé en une couche surface (0-8 cm) et une couche fond (8-15 cm). L'objectif de cette division est de comparer la composition chimique du dépôt récent des sédiments à celle des sédiments accumulés par le passé.

Pour 9 échantillons de 2016, la couche de surface a été tamisée pour obtenir la fraction argile, selon le protocole décrit à la section 4.3.2.1. Ce traitement, pour obtenir la fraction argile du sédiment, a aussi été appliqué à quatre échantillons de la campagne de 2014 archivés (P1C, P2A, P3A et P4D). À noter que les échantillons prélevés aux sites P1, P2, P3, et P4 en 2014 ont été traités à nouveau en 2016 pour l'analyse de leur fraction argile.





*Figure 4-2 : Ensemble des sites échantillonnés dans la baie Port-Cartier en 2016, pour le sédiment de surface*

## 4.2 Résultats

### 4.2.1 Granulométrie (Auteur : Richard St-Louis, Ph.D.)

Les données brutes de granulométrie sont détaillées à l'annexe 4-B.

Les figure 4-3 et 4-4 regroupent la caractérisation granulométrique des échantillons respectivement des campagnes de 2014 et 2016 pour la baie de Sept-Îles, et la figure A4-66 (annexe 4-A) représente les classes de sédiments rencontrées aux stations de 2016.

Les classes de taille sont argile et vase, sable fin, sable moyen, sable grossier, sable très grossier, gravier et cailloux.

Ce sont 37 échantillons sur 66, soit 56 % des échantillons, qui ont été sélectionnés pour une caractérisation au niveau de l'argile et vase (particules de diamètre  $\leq 63 \mu\text{m}$ ).

La majorité des échantillons caractérisés comme étant argile et vase ont été prélevés lors de la campagne de 2014.

Les échantillons de sédiment de surface provenant des sites BSI\_1\_1, BSI\_1\_3, BSI\_2\_1, BSI\_3\_2 et BSI\_6\_1 sont les seuls échantillons de la campagne 2016 à être un sédiment argile et vase dans la baie de Sept-Îles.

L'échantillon de sédiment de surface prélevé en 2016 au site BPC\_5\_2 (baie de Port-Cartier) est un sédiment argile et vase alors que les deux autres échantillons de la baie de Port-Cartier sont du sable moyen.

Ces disparités entre les sédiments de la campagne de 2014 et 2016 dans la baie de Sept-Îles s'expliquent probablement par un régime de courants hétérogènes et complexes ; les sites de la campagne de 2014 correspondent surtout à des zones d'accumulation de la fraction fine du sédiment, en particulier les sites possiblement perturbés par les activités anthropiques (P1 à P4).

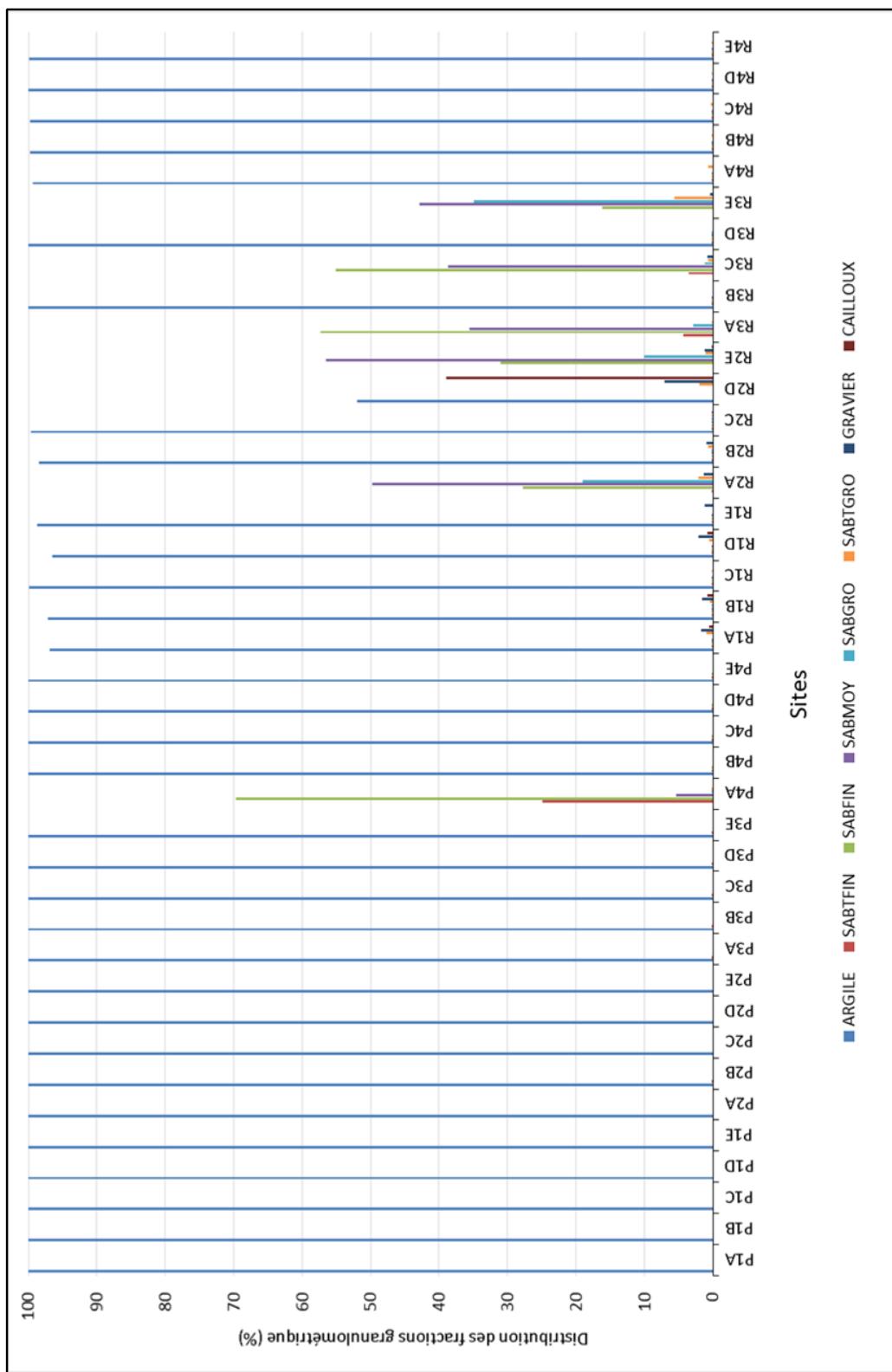


Figure 4-3 : Granulométrie des échantillons de sédiment de surface de la baie de Sept-Îles, campagne 2014

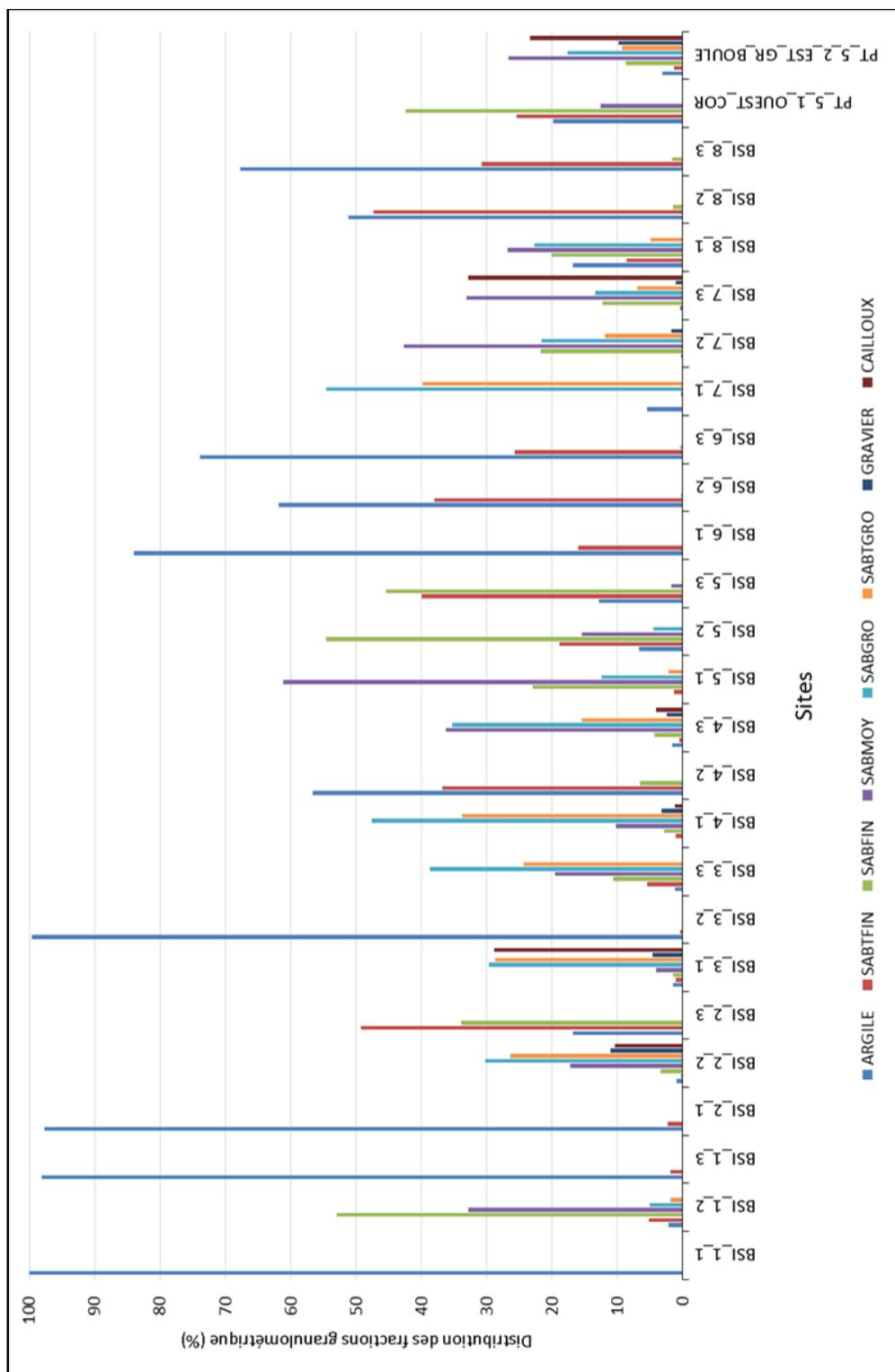


Figure 4-4 : Granulométrie des échantillons de sédiment de surface de la baie de Sept-Îles, campagne 2016

## 4.2.2 Minéralogie de la fraction argileuse (< 2µm) des sédiments de la baie de Sept-Îles (Auteur : J-C Montero-Serrano, Ph.D.)

La minéralogie de la fraction argileuse fait référence à la minéralogie des phyllosilicates compris dans la fraction de la taille des argiles (généralement les grains inférieurs à 2 µm). Les minéraux argileux sont identifiés par diffraction des rayons X selon le protocole expérimental adapté par Bout-Roumazeilles *et al.* (1999) et Montero-Serrano *et al.* (2009). Un total de 18 échantillons sur 25 ont été analysés par diffraction des rayons X afin de déterminer la minéralogie du cortège argileux (figure 4-5). Les échantillons BPC\_4\_2\_SURF, BM\_3\_1, BSI\_5\_1\_SURF, PTRP1\_SURF, R1B et R3B n'avaient pas assez d'argiles pour permettre d'étudier le cortège argileux. Les échantillons étudiés de la campagne 2014 sont situés en face de la minière Cliffs à l'époque et site de déversement de pétrole survenu en 2013 (P1), en face de l'aluminerie Alouette (P2), en face du rejet d'égouts de la Ville de Sept-Îles (P3) et en face de la minière IOC Rio Tinto (P4). Les sites de référence sont situés sur l'île du Corrosol (R2 et PT\_5\_1\_COR) et dans la région Matamek (R4). Les échantillons de sédiment de surface de la campagne 2016 ont été prélevés plus à l'intérieur de la baie (BSI 1 à 8) et des argiles postglaciaires ont été prélevés à rivière Ste-Marguerite (RSM1 et RSM2) et au site Vieux-Poste (Argpost3\_VP).

### 4.2.2.1 Méthode préparatoire

Préalablement, les échantillons ont été passés au tamis humide afin de récupérer la fraction inférieure à 63 µm, constituée principalement de particules de taille silts et argiles. Afin d'isoler la fraction détritique, la matière organique et les carbonates biogéniques ont été supprimés des échantillons avec 10 ml de peroxyde (30 %) et 10 ml d'acide chlorhydrique (HCl; 0,5 M), respectivement. La déflocculation des argiles a été réalisée par des lavages successifs des échantillons à l'eau distillée jusqu'à atteindre une solution de pH relativement neutre. La fraction argileuse des sédiments a été isolée par décantation selon la loi de Stokes, concentrée par centrifugation et orientée par maculage humide sur des lames de verre.

L'analyse des données obtenues à partir des mesures XRD (pics obtenus par diffraction des rayons X) permet d'identifier chacun des minéraux argileux en fonction des valeurs respectives de l'espace basal (en angström, Å) qui les caractérise. La smectite (S) est caractérisée par un pic à 14 Å pour la série normale, qui augmente à 17 Å après saturation à l'éthylène glycol et retombe à 10 Å pour la série chauffée. L'illite (I) est déterminée par des pics à 10 Å, 5 Å, et 3.33 Å, qui restent inchangés au cours des trois séries. La kaolinite (K) est mise en évidence par des pics à 7.2 Å et 3.58 Å qui disparaissent pour la série chauffée alors que les pics correspondant à la chlorite (C) (14 Å, 7.2 Å, 4.75 Å et 3.54 Å) restent stables pour les trois séries. La distinction entre la kaolinite et la chlorite repose sur un balayage à haute résolution entre 3.60 Å et 3.50 Å. L'amphibole, le quartz et le feldspath sont des composants communs de fraction de taille argileuse mais ils ne sont pas inclus dans la détermination semi-quantitative puisque ce ne sont pas des minéraux argileux. L'abondance des minéraux argileux est déterminée en fonction de la surface des pics [17 Å (smectite) + 10 Å (illite) + 7.2 Å (kaolinite et chlorite)] et additionnée pour donner 100 %. Puisque les séries normale et glycol donnent les mêmes spectres (indicative de l'absence de smectite), les mesures de surface des pics ont été réalisées sur les séries normales en utilisant le logiciel Macintosh MacDiff version 4.2.5 (Petschick, 2000). L'erreur de reproductibilité pour cette méthode de mesure est de l'ordre de 5 %.

### 4.2.2.2 Résultats et interprétation

La fraction argileuse des sédiments de la baie de Sept-Îles est constituée principalement de 55-93 % d'illite, 2-45 % de chlorite, et 0-22 % de kaolinite (tableau 4-1 ; figure 4-5 B à D). La smectite est absente dans tous les diagrammes de DRX étudiés. La proportion d'illite est relativement plus élevée (~81-90 %) dans les

argiles postglaciaires (sites du vieux poste et de la rivière Ste-Marguerite) et dans les sédiments situés au centre (BSI 1,4 et 6) et Est (zone P3) de la baie, et moins élevée dans les sédiments des zones P1, P4, R2 et R4 (55-77%; Figure 4-5B). Les échantillons des zones P1, P4, R2 et R4 présentent, quant à eux, des proportions relatives plus élevées en chlorite (23-45 % ; figure 4-5C). La distribution de kaolinite est très hétérogène et constitue <5 % de la fraction argileuse totale dans les argiles postglaciaires (Figure 4-5D). L'échantillon R4D (campagne 2014) présente une haute teneur relative en kaolinite (~20 %).

*Tableau 4-1 : Minéralogie de la fraction argileuse des sédiments de la baie de Sept-Îles*

| Échantillons         | Latitude<br>(°N) | Longitude<br>(°O) | Smectite<br>(%) | Illite<br>(%) | Chlorite<br>(%) | Kaolinite<br>(%) | Illite/Chlorite<br>-Kaolinite<br>(10Å/7.1Å) |
|----------------------|------------------|-------------------|-----------------|---------------|-----------------|------------------|---|
| BSI_1_1_SURF         | 50,170           | -66,470           | 0               | 89            | 6,2             | 4,9              | 8,0   |
| BSI_1_1_SURF_bis     | 50,170           | -66,470           | 0               | 89            | 7,4             | 3,9              | 7,9   |
| BSI_2_2_SURF         | 50,175           | -66,513           | 0               | 58            | 41,7            | 0,6              | 1,4   |
| BSI_3_3_SURF         | 50,230           | -66,450           | 0               | 73            | 19,1            | 7,8              | 2,7   |
| BSI_4_2_SURF         | 50,207           | -66,414           | 0               | 90            | 5,5             | 4,3              | 9,2   |
| BSI_5_2_SURF         | 50,202           | -66,327           | 0               | 77            | 22,9            | 0,0              | 3,4   |
| BSI_6_3_SURF         | 50,195           | -66,465           | 0               | 91            | 7,2             | 1,8              | 10,2  |
| BSI_6_3_SURF_bis     | 50,195           | -66,465           | 0               | 91            | 6,3             | 2,7              | 10,2  |
| BSI_7_1_SURF         | 50,167           | -66,383           | 0               | 87            | 7,4             | 5,2              | 6,9   |
| BSI_7_1_SURF_bis     | 50,167           | -66,383           | 0               | 88            | 8,1             | 3,9              | 7,3   |
| BSI_8_3_SURF         | 50,156           | -66,306           | 0               | 88            | 5,6             | 6,0              | 7,7   |
| Argpost3_VP_dupli    | 50,226           | -66,403           | 0               | 89            | 6,0             | 4,8              | 8,2   |
| Argpost3_VP          | 50,226           | -66,403           | 0               | 89            | 5,5             | 5,2              | 8,3   |
| P1C14                | 50,166           | -66,489           | 0               | 55            | 45              | 0,1              | 1,2   |
| P2A14                | 50,163           | -66,453           | 0               | 87            | 12,5            | 0,0              | 7,0   |
| P3A14                | 50,207           | -66,400           | 0               | 87            | 7,0             | 6,4              | 6,5   |
| P4D14                | 50,190           | -66,371           | 0               | 66            | 12,2            | 21,7             | 1,9   |
| PT_5_1_OUEST_COR     | 50,096           | -66,379           | 0               | 82            | 10,9            | 7,5              | 4,4   |
| PT_5_1_OUEST_COR_bis | 50,096           | -66,379           | 0               | 81            | 9,7             | 8,9              | 4,4   |
| RSM1                 | 50,312           | -66,675           | 0               | 93            | 1,7             | 5,7              | 12,5  |
| RSM2                 | 50,312           | -66,675           | 0               | 93            | 3,3             | 3,5              | 13,7  |
| R2C14                | 50,094           | -66,391           | 0               | 67            | 12,1            | 21,2             | 2,0   |
| R4D14                | 50,279           | -65,920           | 0               | 64            | 15,7            | 20,2             | 1,8   |

Afin de mieux caractériser l'illite (minéral d'argile le plus abondante dans les sédiments), l'indice de cristallinité de l'illite et l'indice d'Esquevin ont été mesurés sur les diagrammes DRX et rapportés aux figure 4-5E, 4-5F et 4-6.

L'indice d'Esquevin, ou indice d'altération chimique (Esquevin, 1969), est le rapport entre l'intensité d'illite mesurée à 5 Å par rapport à celle à 10 Å. *Un indice d'Esquevin inférieur à 0,5 représente des illites riches en Fe-Mg (tel que biotites et micas), et est caractéristique pour les roches physiquement érodées et peu altérées. Un indice supérieur à 0,5 suggère la présence d'illites riches en Al qui sont formées par une forte hydrolyse.* Tous les échantillons étudiés présentent un indice d'Esquevin inférieur à 0,5, suggérant la présence des illites riches en Fe-Mg dans les sédiments de la baie (Figures 4-5E et 4-6A). Cependant, les échantillons d'argiles postglaciaires (sites du vieux poste et de la rivière Ste-Marguerite) et ceux situés au centre et Est (zone P3) de la baie présentent un indice d'Esquevin plus faible (<0,05), suggérant une même source sédimentaire. Les échantillons des zones P1, P4, R2 et R4 présentent un indice d'Esquevin plus élevé, probablement à cause d'une augmentation dans la proportion de chlorite et/ou illites riches en Al. Il est à noter que la chlorite est produite par l'altération de minéraux tels que les pyroxènes, les amphiboles et les biotites qui sont abondants dans des roches tel que le gabbro.

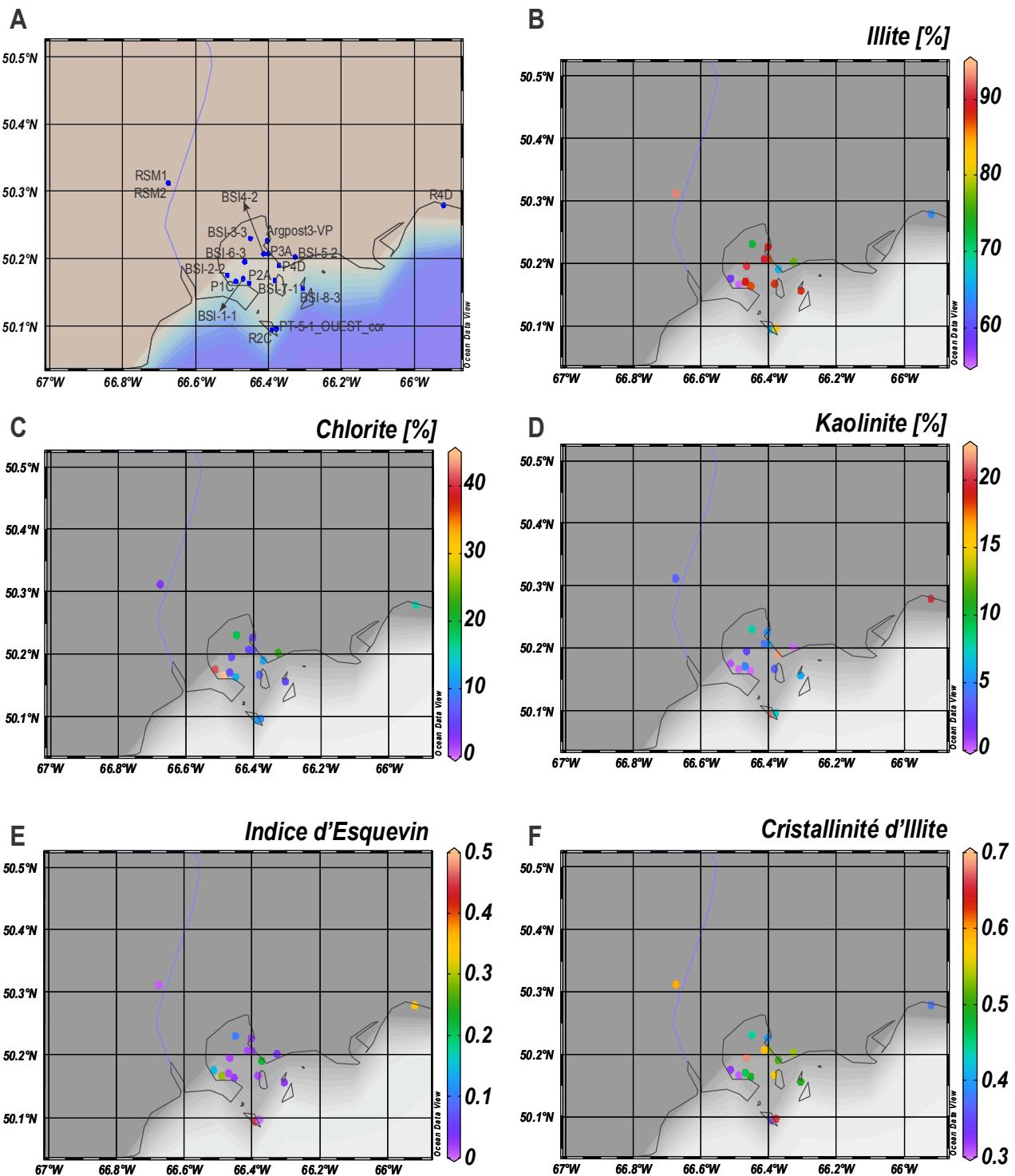


Figure 4-5 : Localisation des échantillons analysés (A), cartes de distribution relative d'argiles (B-D), et cartes de la caractérisation des illites : Indice d'Esquevin (E) et cristallinité (F)

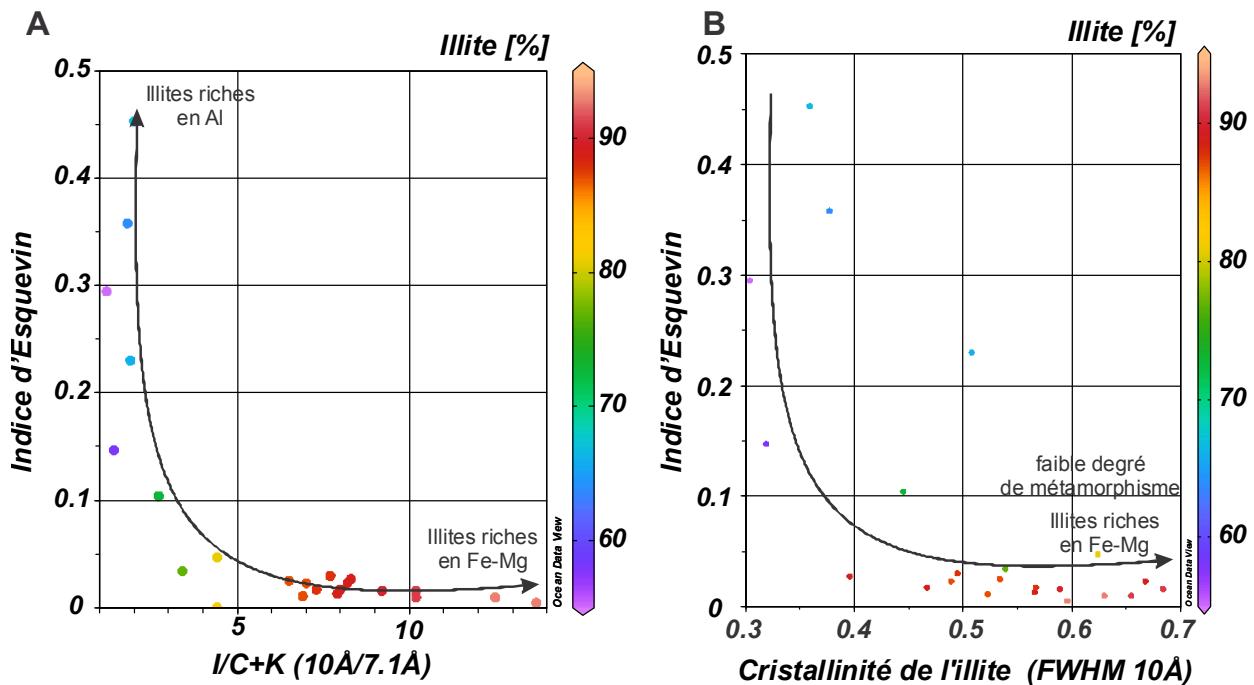


Figure 4-6 : Teneur relative d'illite vs. l'indice d'Esquevin (A) et cristallinité de l'illite (B) des sédiments de la baie de Sept-Îles

D'autre part, l'indice de cristallinité de l'illite correspond à la largeur de moitié-taille (FWHM) de la réflexion d'illite à 10 Å (Chamley, 1989). La cristallinité de l'illite est inversement proportionnelle au degré de métamorphisme: *un indice de cristallinité élevé indique un faible degré de métamorphisme tandis qu'un faible indice de cristallinité de l'illite reflète un degré élevé de métamorphisme.*

Tous les échantillons étudiés présentent un faible indice de cristallinité de l'illite (figures 4-5F et 4-6B), et suivent la même tendance de l'indice d'Esquevin. Toutefois, les échantillons d'argiles postglaciaires (du site du vieux poste et de la rivière Ste-Marguerite) et ceux situés au centre et Est (zone P3) de la baie présentent un indice de cristallinité plus élevé, suggérant que les sédiments originent de roches avec un faible degré de métamorphisme (ex. les granites du bouclier canadien).

En conclusion, la distribution de l'illite, l'indice d'Esquevin et la cristallinité de l'illite suggèrent une origine commune (granites du bouclier canadien) pour les sédiments d'argiles postglaciaires et ceux situés au centre (BSI 1, 4 et 6) et Est (zone P3) de la baie.

En revanche, l'enrichissement relatif en chlorite dans les échantillons des zones P1, P4, R2 et R4 suggère que les sédiments proviennent de l'altération de gabbros, affleurement dans la baie. La contribution d'une source anthropique (sédiments riches en fer) ne peut pas être exclue pour expliquer cette différence, surtout pour les zones P1 et P4, puisque le minerai de fer est la marchandise la plus manutentionnée au Port de Sept-Îles (source : Port de Sept-Îles). Il est possible que les fractions fines du minerai soient introduites dans la baie, lors des activités de manutention, et qu'alors des espèces minérales chlorite et kaolinite associées au minerai de fer enrichissent localement la fraction argileuse du sédiment. La figure 4-7 rapporte la valeur du rapport illite/chlorite-kaolinite des échantillons étudiés, six échantillons se démarquent par un rapport inférieur à 3 et deux de ces échantillons correspondent aux sites portuaires des compagnies minières (P1 et P4).

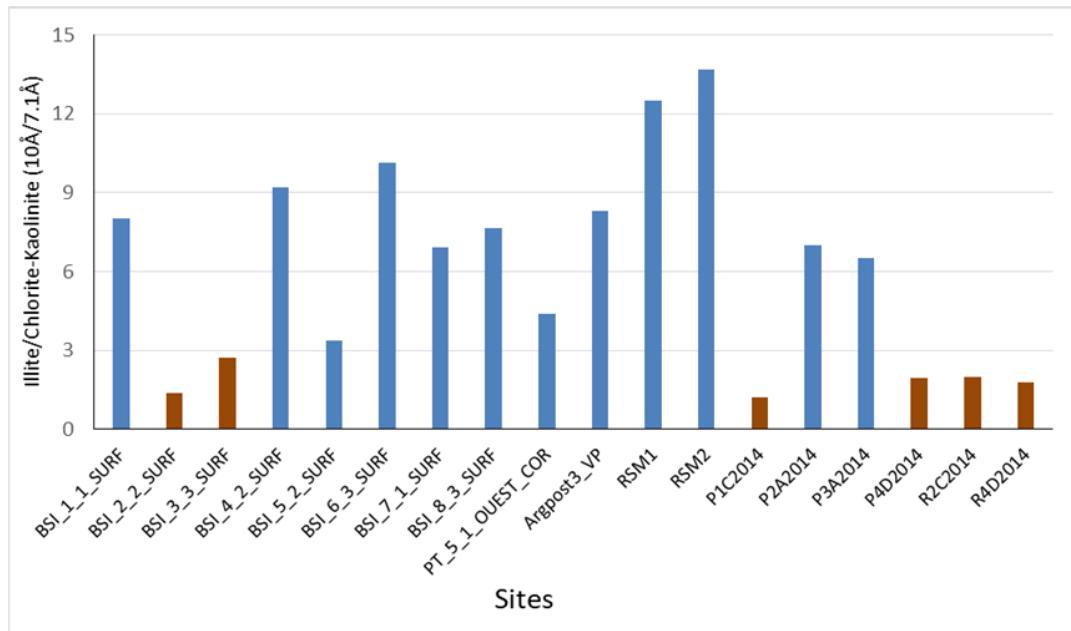


Figure 4-7 : Rapport Illite/chlorite-kaolinite de la fraction argileuse des sédiments

#### 4.2.3 Caractérisation chimique des sédiments (Auteur : Richard St-Louis, Ph.D.)

Les résultats des analyses chimiques des échantillons de sédiment pour leur contenu en métaux, métalloïdes et hydrocarbures sont d'abord interprétés dans le contexte des critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments marins au Québec (ECC et MDDELCC, 2007). Ces critères fournissent des valeurs de références, exprimées en concentration par kilogramme de sédiment séché, pour sept métaux et 13 substances chimiques de la famille des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Ceux-ci ont été élaborés pour la prévention, la gestion des déblais de dragage et la restauration des sites contaminés. Ces critères définissent cinq valeurs permettant d'évaluer le degré de contamination des sédiments et ainsi en assurer une gestion adéquate. Le tableau 4-2 résume les cinq niveaux.

Tableau 4-2 : Définitions des critères pour l'évaluation de qualité des sédiments marins au Québec (Environnement Canada et MDDEP, 2007)

|     |  |  |
|-----|--|--|
| CER | Concentration d'effets rares               | Une concentration inférieure à ce seuil ne nécessite aucune mesure. Ce seuil étant atteint, un suivi de l'évolution de la situation peut être requis.                                |
| CSE | Concentration seuil produisant un effet    | Ceci constitue le seuil d'action pour limiter et éviter la présence de nouvelles sources de contamination.   |
| CEO | Concentration d'effets occasionnels        | Les déblais de dragage dépassant ce niveau de contamination peuvent être rejetés en eaux libres à condition qu'il n'y ait pas détérioration du milieu récepteur (essai de toxicité). |
| CEP | Concentration produisant un effet probable | L'atteinte de ce niveau de contamination requiert une étude approfondie afin de déterminer si les avantages de la restauration du site prévalent sur les inconvénients.              |
| CEF | Concentration d'effets fréquents           | La restauration du site est souhaitable. Le rejet de sédiments de dragage en eau libre est proscrit si ceux-ci atteignent ce niveau de contamination.                                |

#### 4.2.3.1 Métaux avec critères établis

L'analyse des échantillons a porté sur 34 éléments, incluant le fer. Selon le document « *Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'application: prévention, dragage et restauration* » (Environnement Canada et MDDEP, 2007), 7 éléments ont des valeurs reconnues associées à chacun des critères, alors que le nickel a une valeur seulement pour le critère CSE (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ce critère est important puisqu'il établit le seuil à partir duquel une action est nécessaire pour limiter ou réduire la contamination de l'environnement benthique.

L'annexe 4-A présente, pour chacun des métaux ayant un critère (plus le Fer), une carte des concentrations réelles rencontrées aux stations en 2016 ainsi qu'une représentation de la diffusion de l'élément considéré, prédictive par deux méthodes différentes (annexe A4-2 à A4-10).

L'ensemble des concentrations des métaux ayant un critère sont affichées à l'annexe 4-C (C4-1, C4-2 et C4-3).

*Tableau 4-3 : Concentrations des métaux et métalloïde (mg/kg, poids sec) associées aux critères pour la qualité des sédiments marins et teneurs naturels dans les argiles marines postglaciaires (Saulnier et Gagnon, 2006 ; Environnement Canada et MDDEP, 2007)*

| Critère  | Cr  | Ni              | Cu  | Zn  | As  | Cd   | Hg    | Pb  |
|--|-----|-----------------|-----|-----|-----|------|-------|-----|
| <b>CER</b>   | 30  | nd              | 11  | 70  | 4,3 | 0,32 | 0,051 | 18  |
| <b>CSE</b>   | 52  | 35 <sup>a</sup> | 19  | 120 | 7,2 | 0,67 | 0,13  | 30  |
| <b>CEO</b>   | 96  | nd              | 42  | 180 | 19  | 2,1  | 0,29  | 54  |
| <b>CEP</b>   | 160 | nd              | 110 | 270 | 42  | 4,2  | 0,70  | 110 |
| <b>CEF</b>   | 290 | nd              | 230 | 430 | 150 | 7,2  | 1,4   | 180 |
| Teneurs naturelles dans les argiles marines postglaciaires | 150 | 75              | 54  | 150 | 8   | 0,20 | 0,02  | 16  |

Les critères sont expliqués au tableau 4-2.

Note<sup>a</sup>. Le critère CSE pour cet élément est tiré de Saulnier et Gagnon (2006)

##### 4.2.3.1.1 Dépassement du critère de concentration seuil produisant un effet (CSE)

L'annexe A4-12 (figure A4-39) affiche les métaux normés dont la concentration mesurée est au seuil normalisé produisant un effet pour 2016.

###### Sédiment de la couche de surface :

Pour les sédiments de la couche de surface (35 échantillons ; voir tableau 4-4), le critère CSE est dépassé par :

- le chrome pour 35 % des échantillons,
- le cuivre pour 11 % des échantillons,
- l'arsenic et le nickel pour 8 % des échantillons et
- le zinc pour 6 % des échantillons.

Les métaux lourds cadmium, mercure et plomb ne dépassent pas le critère CSE dans aucun des échantillons de sédiment de la couche de surface. Les sites pour lesquels plus de quatre métaux dépassent le critère CSE en surface sont BSI\_1\_1, BSI\_2\_1 et BSI\_3\_2; ces sites sont assez distants l'un de l'autre dans la baie de Sept-Îles.

### Sédiment de la couche de fond :

Pour le sédiment de la couche de fond (13 échantillons; voir tableau 4-5), le critère CSE est dépassé par

- le chrome pour 3 des échantillons ;
- Seul l'échantillon BSI\_1\_1 présente d'autres métaux qui dépassent le critère CSE, soit le nickel, le cuivre, le zinc et l'arsenic. Le site BSI\_1\_1 est situé dans la section sud-ouest de la baie, à la frontière entre la zone échantillonnée en 2014 en face de la compagnie minière Cliffs à l'époque (P1) et celle en face de l'aluminerie Alouette (P2). Ces deux zones sont exposées aux activités industrielles de ces entreprises.

Il est connu que les argiles en suspension dans la colonne d'eau peuvent agir comme des adsorbants efficaces des contaminants dissous, dont les métaux. Les argiles sont d'ailleurs utilisées pour le traitement des eaux usées. Puisque la proportion d'argiles varie dans les sédiments en raison des conditions naturelles (courants marins, nature géologique des côtes, érosion, etc.), la concentration en métaux dans le sédiment peut fluctuer en fonction de l'importance des argiles dans la composition du sédiment échantillonné.

Nous avons donc traité 9 échantillons de sédiment de la couche de surface prélevés en 2016 et 4 échantillons homogénisés de 2014, ces derniers provenant des quatre zones potentiellement impactées, pour obtenir la fraction argile de taille inférieure à 2 µm et en analyser le contenu en métaux.

Les résultats sont rapportés **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. Le chrome, le nickel, le cuivre, le zinc et l'arsenic dépassent minimalement le critère CSE dans la fraction argile de tous les échantillons. Le mercure dépasse ce critère dans dix échantillons sur treize, le cadmium dans cinq échantillons sur treize. Le plomb quant à lui, dépasse ce critère dans seulement deux échantillons.

#### 4.2.3.1.2 Dépassement des autres critères

Les annexes A4-11 et A4-13 (figures A4-38 et A4-39) affichent respectivement les métaux normés dont la concentration mesurée est au seuil normalisé d'effets rares et ceux dont la concentration mesurée est au seuil normalisé d'effets occasionnels pour 2016.

Pour les sédiments de la couche de surface et de la couche de fond (tableaux 4-4 et 4-5), les concentrations qui se situent entre le critère associé à la concentration d'effets rares (CER) et le CSE sont observées surtout pour le chrome, pour 50 % des échantillons. Le mercure dépasse le critère CER pour un échantillon de la couche de surface (BSI\_6\_3) et deux échantillons de la couche de fond, BSI\_1\_1 et BSI\_2\_2, sans dépasser le critère CSE.

Le critère plus sévère suivant le CSE est le CEO soit la concentration à laquelle des effets occasionnels sont observés; les déblais de dragage dépassant ce niveau de contamination peuvent être rejetés en eaux libres à condition qu'il n'y ait pas détérioration du milieu récepteur (essai de toxicité). Ce critère, le CEO, est dépassé par le chrome dans deux échantillons de sédiments de la couche de surface, dont BM\_2\_2 qui est situé à l'extérieur de la baie de Sept-Îles, et un échantillon de la couche de fond (au site BSI\_1\_1). Pour les autres éléments ayant des valeurs reconnues associées aux critères de qualité du sédiment, seul l'arsenic dépasse le critère CEO, et ce pour un seul échantillon de sédiment de la couche de surface (BSI\_1\_1).

Le tableau 4-6 met en lumière deux sites dont la fraction argile semble particulièrement plus concentrée soit BSI\_2\_2 et P4D. À première vue, il semblerait que la fraction argile du sédiment de la baie de Sept-Îles possède une concentration plus élevée pour les métaux et que la variation des concentrations dans le sédiment entre les sites s'expliquerait par la granulométrie.

Cependant, les résultats obtenus de l'analyse de la fraction argile des échantillons prélevés près des îles Corossol et Grande Boule (PT\_5\_1\_O-COR et PT\_5\_2\_E\_GR\_BOULE), nos sites de référence, nous incitent à considérer les teneurs naturelles des métaux dans les argiles comme critère de contamination.

*Tableau 4-4 : Sédiment couche de surface. Concentration (mg/kg, poids sec) des métaux et métalloïdes ayant des critères pour la qualité des sédiments marins*

| Site                | Cr  | Ni   | Cu   | Zn    | As   | Cd   | Hg    | Pb   |
|---------------------|-----|------|------|-------|------|------|-------|------|
| BM_2_2_SURF         | 96  | 25,9 | 13,7 | 62,3  | 2,2  | 0,26 | 0,008 | 5,5  |
| BM_3_1_SURF         | 60  | 19,7 | 7,3  | 48,1  | 2,1  | 0,27 | 0,020 | 4,1  |
| BM_5_1_SURF         | 17  | 11,6 | 4,1  | 28,7  | 2,3  | 0,08 | 0,007 | 3,6  |
| BPC_4_2_SURF        | 11  | 4,6  | 3,3  | 17,7  | 1,7  | 0,19 | 0,025 | 1,6  |
| BPC_5_2_SURF        | 67  | 34,9 | 24,7 | 120,9 | 1,9  | 0,19 | 0,006 | 8,2  |
| BPC_8_3_SURF        | 27  | 10,1 | 5,9  | 28,8  | 2,0  | 0,11 | 0,008 | 3,7  |
| BSI_1_1_SURF        | 86  | 38,7 | 23,5 | 106,0 | 21,3 | 0,18 | 0,030 | 10,5 |
| BSI_1_2_SURF        | 54  | 15,3 | 3,0  | 49,7  | 1,9  | 0,23 | 0,009 | 3,6  |
| BSI_1_3_SURF        | 73  | 33,2 | 20,6 | 89,8  | 14,2 | 0,17 | 0,040 | 8,9  |
| BSI_2_1_SURF        | 106 | 46,8 | 26,3 | 130,0 | 10,3 | 0,27 | 0,031 | 12,2 |
| BSI_2_2_SURF        | 55  | 15,4 | 3,6  | 41,1  | 1,2  | 0,13 | 0,010 | 2,8  |
| BSI_2_3_SURF        | 39  | 11,5 | 3,2  | 41,6  | 1,7  | 0,22 | 0,014 | 3,9  |
| BSI_3_1_SURF        | 41  | 13,5 | 4,7  | 41,6  | 2,3  | 0,14 | 0,017 | 4,5  |
| BSI_3_2_SURF        | 111 | 53,1 | 28,8 | 141,4 | 6,2  | 0,22 | 0,035 | 12,1 |
| BSI_3_3_SURF        | 33  | 12,0 | 3,8  | 40,9  | 1,9  | 0,16 | 0,007 | 3,1  |
| BSI_4_1_SURF        | 17  | 9,2  | 5,5  | 33,0  | 2,7  | 0,11 | 0,012 | 5,0  |
| BSI_4_2_SURF        | 40  | 16,4 | 8,3  | 51,1  | 2,9  | 0,16 | 0,011 | 4,8  |
| BSI_4_3_SURF        | 20  | 8,6  | 3,0  | 26,9  | 1,1  | 0,08 | 0,007 | 2,2  |
| BSI_5_1_SURF        | 24  | 10,6 | 4,6  | 34,8  | 0,8  | 0,10 | 0,010 | 1,9  |
| BSI_5_2_SURF        | 38  | 17,4 | 8,2  | 50,8  | 3,5  | 0,13 | 0,014 | 3,0  |
| BSI_5_3_SURF        | 32  | 15,7 | 9,1  | 45,5  | 2,3  | 0,09 | 0,017 | 2,6  |
| BSI_6_1_SURF        | 48  | 21,3 | 12,0 | 61,6  | 2,8  | 0,13 | 0,023 | 6,2  |
| BSI_6_2_SURF        | 63  | 26,5 | 14,2 | 78,9  | 6,8  | 0,18 | 0,018 | 7,2  |
| BSI_6_3_SURF        | 56  | 24,7 | 12,6 | 69,4  | 3,1  | 0,16 | 0,091 | 7,1  |
| BSI_7_1_SURF        | 53  | 21,3 | 9,8  | 59,2  | 3,0  | 0,15 | 0,028 | 5,8  |
| BSI_7_2_SURF        | 31  | 10,2 | 2,4  | 32,2  | 2,2  | 0,10 | 0,037 | 2,3  |
| BSI_7_3_SURF        | 37  | 14,3 | 3,8  | 44,7  | 2,2  | 0,13 | 0,024 | 3,5  |
| BSI_8_1_SURF        | 31  | 12,3 | 4,5  | 37,2  | 1,9  | 0,13 | 0,020 | 3,8  |
| BSI_8_2_SURF        | 40  | 17,0 | 7,4  | 45,7  | 2,2  | 0,12 | 0,028 | 5,1  |
| BSI_8_3_SURF        | 64  | 25,5 | 12,0 | 71,5  | 4,7  | 0,19 | 0,020 | 7,6  |
| PT_5_1_OUEST_COR    | 48  | 15,5 | 5,2  | 47,9  | 2,8  | 0,16 | 0,013 | 5,1  |
| PT_5_2_EST_GR_BOULE | 44  | 16,1 | 3,6  | 42,3  | 2,9  | 0,11 | 0,027 | 4,7  |
| PTRP1_SURF          | 8   | 5,8  | 3,0  | 24,8  | 0,1  | 0,08 | 0,048 | 1,6  |
| PTRP2_SURF          | 5   | 3,2  | 2,9  | 18,5  | 0,1  | 0,07 | 0,007 | 1,5  |
| PTRP3_SURF          | 6   | 4,3  | 5,3  | 18,2  | 0,2  | 0,09 | 0,011 | 1,9  |

Les couleurs correspondent au dépassement du critère le plus élevé (code des couleurs expliqué au tableau 4-2).

Tableau 4-5 : Sédiment couche de fond. Concentration (mg/kg, poids sec) des métaux et métalloïde ayant des critères pour la qualité des sédiments marins

| Site         | Cr  | Ni   | Cu   | Zn    | As   | Cd   | Hg    | Pb   |
|--------------|-----|------|------|-------|------|------|-------|------|
| BSI_1_1_FOND | 130 | 56.8 | 32.4 | 152.9 | 18.4 | 0.27 | 0.058 | 15.7 |
| BSI_2_2_FOND | 21  | 7.6  | 2.1  | 21.2  | 0.8  | 0.10 | 0.073 | 3.0  |
| BSI_3_3_FOND | 26  | 8.9  | 2.8  | 32.0  | 1.4  | 0.11 | 0.006 | 2.3  |
| BSI_4_2_FOND | 40  | 15.8 | 7.3  | 47.6  | 2.6  | 0.14 | 0.017 | 4.4  |
| BSI_5_1_FOND | 29  | 11.4 | 6.7  | 36.2  | 0.8  | 0.11 | 0.005 | 2.1  |
| BSI_6_1_FOND | 55  | 23.6 | 12.4 | 67.4  | 3.6  | 0.16 | 0.019 | 6.7  |
| BSI_6_2_FOND | 51  | 21.3 | 10.2 | 64.2  | 3.8  | 0.15 | 0.015 | 5.9  |
| BSI_6_3_FOND | 74  | 32.0 | 16.6 | 90.6  | 3.8  | 0.19 | 0.037 | 8.8  |
| BSI_7_1_FOND | 46  | 19.8 | 9.1  | 57.3  | 3.9  | 0.14 | 0.014 | 5.6  |
| BSI_8_3_FOND | 42  | 18.1 | 8.8  | 48.9  | 4.0  | 0.13 | 0.027 | 5.5  |
| PTRP1 FOND   | 8   | 4.2  | 3.5  | 25.2  | 0.1  | 0.08 | 0.004 | 1.6  |
| PTRP2 FOND   | 6   | 8.7  | 3.7  | 27.3  | 0.2  | 0.10 | 0.003 | 1.8  |
| PTRP3_FOND   | 10  | 4.9  | 2.8  | 24.3  | 0.1  | 0.09 | 0.005 | 1.5  |

Les couleurs correspondent au dépassement du critère le plus élevé (code des couleurs expliqué au tableau 4-2).

Tableau 4-6 : Sédiment de la fraction argile de la couche de surface,  
Concentration (mg/kg, poids sec) des métaux et métalloïde

| Site              | Cr  | Ni    | Cu    | Zn    | As   | Cd    | Hg    | Pb   |
|-------------------|-----|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| BSI 1_1           | 151 | 70,3  | 22,3  | 175,0 | 21,9 | 0,22  | 0,096 | 20,9 |
| BSI 2_2           | 611 | 266,0 | 256,5 | 371,1 | 40,0 | 7,21  | 2,349 | 22,5 |
| BSI 3_3           | 348 | 149,4 | 91,6  | 138,8 | 15,5 | 1,89  | 0,970 | 8,7  |
| BSI 4_2           | 193 | 83,3  | 45,5  | 204,4 | 10,2 | 0,29  | 0,128 | 37,6 |
| BSI 6_3           | 184 | 89,1  | 34,5  | 209,8 | 18,8 | 0,46  | 0,090 | 30,5 |
| BSI 7_1           | 137 | 62,7  | 23,6  | 128,6 | 12,1 | 0,38  | 0,237 | 20,9 |
| BSI 8_3           | 154 | 77,7  | 31,3  | 144,2 | 13,9 | 0,37  | 0,220 | 25,7 |
| P1C 2014          | 160 | 54,8  | 58,6  | 151,3 | 25,7 | 1,75  | 0,512 | 17,1 |
| P2A 2014          | 214 | 89,4  | 25,4  | 167,1 | 20,9 | 0,73  | 0,107 | 13,1 |
| P3A 2014          | 234 | 107,0 | 47,4  | 152,4 | 11,8 | 0,81  | 0,268 | 10,6 |
| P4D 2014          | 952 | 421,7 | 214,1 | 277,7 | 33,1 | 10,99 | 8,693 | 5,8  |
| PT_5_1_O_COR      | 197 | 92,6  | 38,1  | 134,7 | 21,3 | 0,68  | 1,204 | 17,9 |
| PT_5_2_F_GR_BOULE | 176 | 85,2  | 56,6  | 168,5 | 25,2 | 0,89  | 0,455 | 11,9 |

À noter que les critères s'appliquent sur l'ensemble d'un échantillon de sédiment et non seulement sur la fraction argile; la comparaison avec les critères du tableau 4-3 n'a donc pas été réalisée dans ce tableau.

Les deux sites dont la fraction argile semble particulièrement plus concentrée sont BSI\_2\_2 et P4D.

#### 4.2.3.1.3 Argiles postglaciaires et normalisation sur la base du fer des métaux avec critères établis

Tel que mentionné précédemment, les résultats obtenus de l'analyse de la fraction argile des échantillons prélevés près des îles Corossol et Grande Boule (PT\_5\_1\_O-COR et PT\_5\_2\_E\_GR\_BOULE), nos sites de référence, nous incitent à considérer les teneurs naturelles des métaux dans les argiles comme critère de contamination. En effet, comme le soulignent Saulnier et Gagnon (2006), les argiles postglaciaires marines du Saint-Laurent contiennent des teneurs en métaux naturellement élevées (tableau 4-6).

La présence d'argiles postglaciaires dans les sédiments marins de la baie de Sept-Îles et de ces environs ne serait pas exceptionnelle puisqu'une partie de la côte en est constituée; les mécanismes naturels d'érosion ainsi que de lessivage des sols entraînent ces argiles vers la baie et le jeu des courants marins, la morphologie du littoral de même que la présence d'infrastructures crée des zones de déposition du sédiment fin. De plus, les importants travaux d'aménagement portuaire des dernières années ont pu aussi contribuer à remettre ces argiles à la surface du sédiment, dans certaines zones de la baie. Les résultats de l'analyse granulométrique des échantillons de 2014 montrent d'ailleurs des sédiments plus fins aux sites P1 à P4 (figure 4-3).

Le chrome et le nickel sont deux métaux qui peuvent être utilisés comme traceurs de la source de sédiment ; les argiles enrichies naturellement en Cr et Ni proviennent habituellement de l'érosion de la roche mafique ou ultramafique (Amorosi, 2012). La figure 4-8A illustre la relation entre la concentration en chrome et celle du nickel dans les échantillons des sédiments de surface, prélevés lors des campagnes de 2014 et 2016. La covariance positive entre le nickel et le chrome est évidente, avec cependant un écart pour les sédiments des sites R1 et R4 pour lesquels une partie du chrome proviendrait d'une source différente. La relation linéaire entre Ni et Cr est plus marquée lorsque tous les échantillons de sédiment de la campagne 2016, incluant les argiles postglaciaires et la fraction argile des quatre échantillons de la campagne 2014, sont combinés (figure 4-8B). Cette forte corrélation indique une source commune dominante pour ces deux métaux; une corrélation semblable est observée entre le chrome et le cuivre, et entre le chrome et le zinc. La variation de la concentration du chrome d'origine naturelle provenant des argiles, et des métaux qui y sont associés, ne dépendrait alors que de la granulométrie de l'échantillon, avec des valeurs plus élevées dans les sédiments de type vase et argile (figure 4-8).



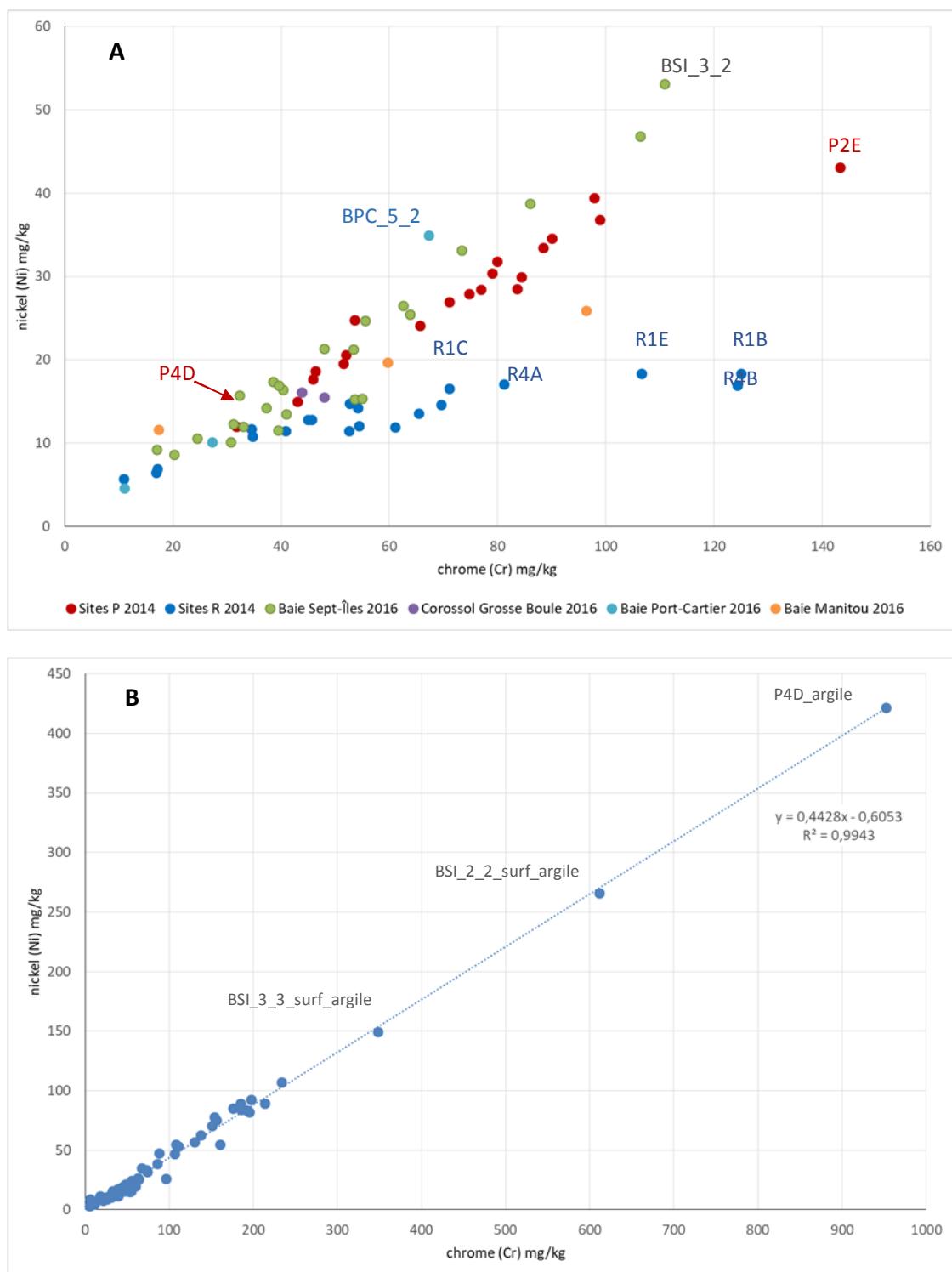
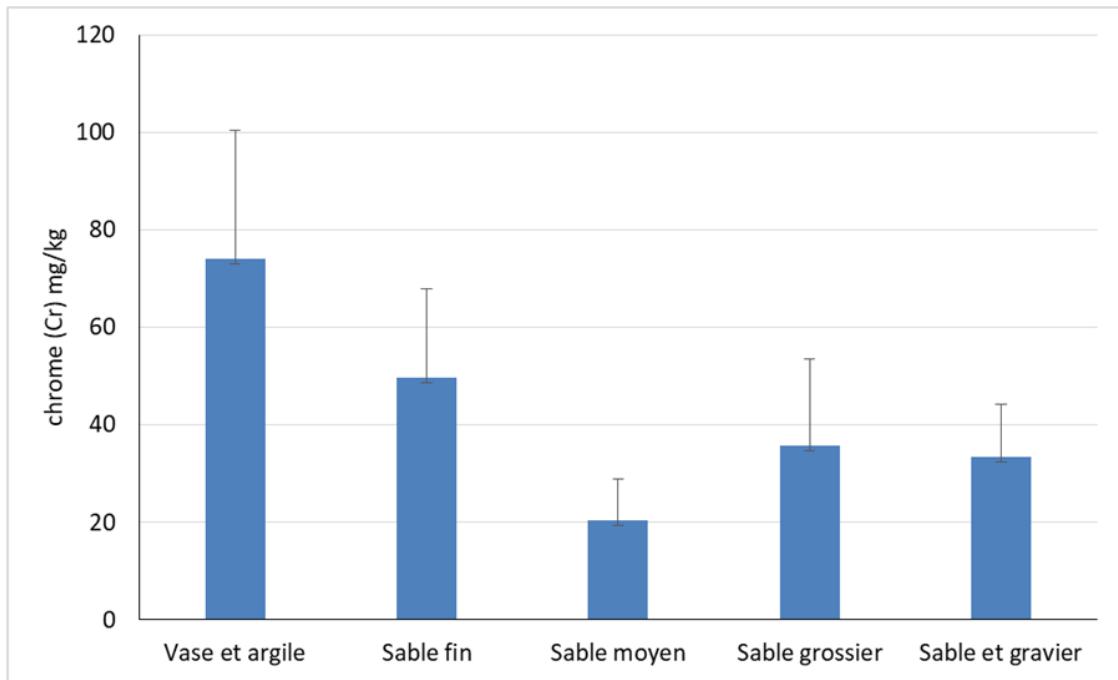


Figure 4-8 : Relation entre la concentration en chrome et celle du nickel (en mg/kg de poids sec) dans  
 A) le sédiment de surface des échantillons de 2014 et 2016 et  
 B) dans tous les échantillons de sédiments de la campagne 2016 et de la fraction argile des quatre échantillons P de 2014



*Figure 4-9 : Concentration moyenne du chrome (en mg/kg de poids sec ;  $\pm$  écart-type) selon le type de sédiment de surface, campagne 2014 et 2016*

La concentration la plus élevée de Ni et Cr a été mesurée pour la fraction argileuse de l'échantillon P4D (2014) avec une valeur de 422 et 952 mg/kg respectivement (figure 4-8B), cette fraction argileuse a été obtenue par le traitement chimique décrit à la section 4.3.2.1. Or, la concentration en Ni et Cr pour l'échantillon global P4D est 12 et 32 mg/kg respectivement (figure 4-8A), bien que sa granulométrie corresponde à un sédiment argile et vase composé majoritairement de particules fines inférieures à 2 µm. Autrement dit, la dilution granulométrique n'explique pas ces différences de concentrations entre l'argile et la fraction argileuse pour l'échantillon P4D, bien que le rapport Ni/Cr soit comparable avec une valeur de  $\pm 0,4$ . L'isolation de la fraction argileuse par le traitement utilisé en géologie doit rendre les métaux associés aux feuillets aluminosilicates de l'argile plus extractibles à la digestion acide, utilisée avant l'analyse chimique par spectrométrie de masse, du moins pour cet échantillon. Pour comparaison, le sédiment global au site P1C, qui est aussi un sédiment argile et vase, a une concentration de chrome de 83,5 mg/kg (Ni 28,5 mg/kg) alors que la concentration de ce métal est de 160,3 mg/kg (Ni 54,8 mg/kg) dans sa fraction argileuse. Pour cet échantillon aussi le rapport Ni/Cr est constant à 0,34 pour le sédiment global et sa fraction argileuse. Pour le site P1C, c'est un facteur de concentration du chrome de 2 ; alors qu'il est de 30 pour l'échantillon P4D. Il existe donc des subtilités dans les caractéristiques physico-chimiques entre les types d'argiles qui composent la fraction argileuse pour la même gamme de tailles de particules inférieures à 2 µm, qui influencent la proportion de métaux extractibles pour l'analyse.

La relation entre l'aluminium et le magnésium confirmerait cette hypothèse (figure 4-10). Cette relation est linéaire pour le sédiment global et pour la fraction argileuse, par contre le rapport entre les deux métaux (la pente de la droite) diffère. Il est plus grand pour la fraction argile, avec une valeur de 2 comparativement à 1,5. Ainsi, pour la même concentration de magnésium, plus d'aluminium est extractible de la fraction argile obtenue par le traitement décrit à la section 4.3.2.1. L'aluminium est le constituant de base, avec le silicium, des aluminosilicates des argiles; si Al est plus disponible à l'extraction ceci implique que les métaux et métalloïdes associés seront également plus extractibles.

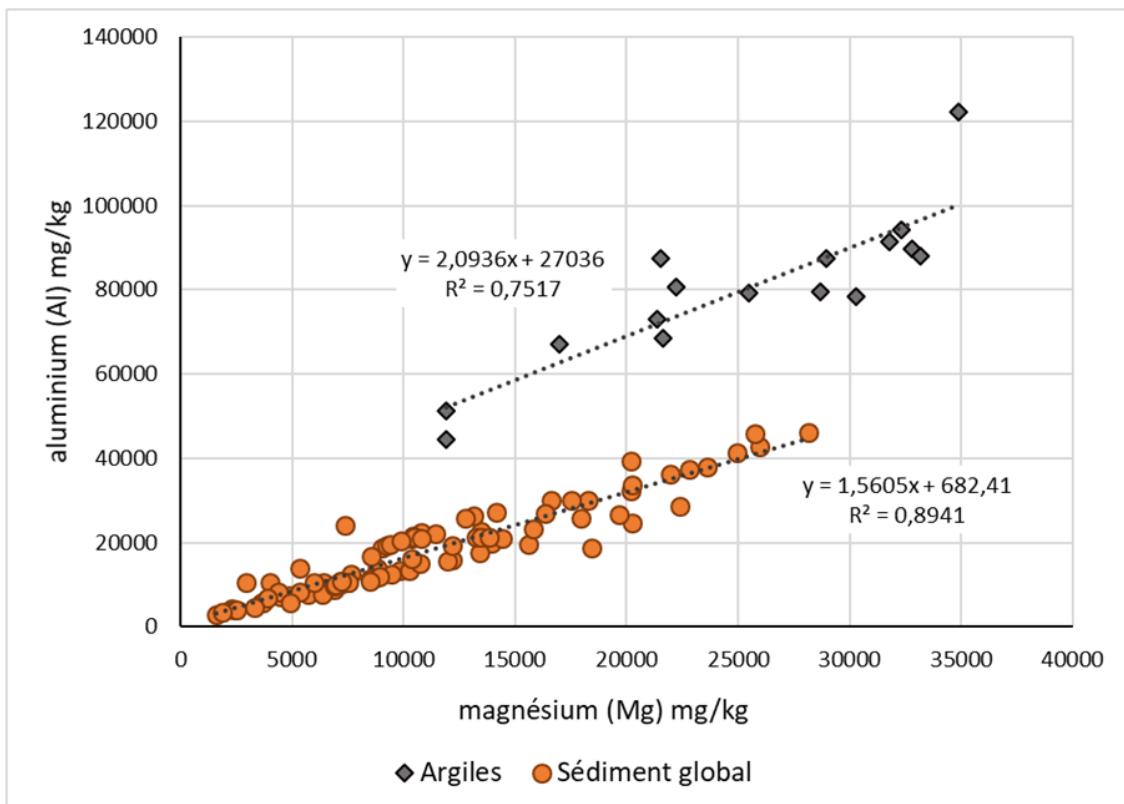


Figure 4-10 : Relation entre les concentrations de l'aluminium et du magnésium (en mg/kg de poids sec) selon la nature de l'échantillon de sédiment, campagnes 2014 et 2016

Si la source principale naturelle des métaux et métalloïdes dans les sédiments sont les argiles postglaciaires, l'application d'un facteur d'enrichissement qui permet de normaliser les résultats en fonction des teneurs en métaux des argiles postglaciaires de la région permettra de mettre en lumière l'influence d'autres sources de métaux.

Afin de déterminer s'il y a enrichissement (ou contamination) d'un élément dans le sédiment, il convient de normaliser les concentrations sur une base commune (Sakan *et al.*, 2015). Il a été choisi de faire la normalisation par rapport au fer (Fe) selon le calcul du facteur d'enrichissement (FE):

$$FE = (M/Fe)_{\text{échantillon}} / (M/Fe)_{\text{référence}}$$

où

M est la concentration du métal ou élément à normaliser,

Fe est la concentration du fer dans l'échantillon et le sédiment du site de référence.

Le choix du fer s'explique par sa présence ubiquiste<sup>1</sup> dans les sédiments de surface et que plusieurs métaux ne présentent pas une corrélation comparable avec cet élément entre les sites de référence et les sites impactés. Les argiles postglaciaires prélevées aux sites Vieux Poste et rivière Sainte-Marguerite ont été analysées pour leurs teneurs en métaux et métalloïdes, comme référence de sédiment non-contaminé.

<sup>1</sup> Ubiquiste : Se dit des espèces animales et végétales que l'on rencontre dans des milieux écologiques très différents (Source Larousse).

Les résultats présentés au tableau 4-7 ont servi au calcul du ratio (M/Fe) référence pour les huit éléments qui ont des valeurs reconnues pour les critères de la qualité du sédiment. Les valeurs moyennes de concentration dans nos échantillons, considérés comme argiles postglaciaires, sont tout à fait comparables à celles rapportées par Saulnier et Gagnon (2006) pour le fleuve St-Laurent (tableau 4-3).

*Tableau 4-7 : Argiles postglaciaires. Concentration (mg/kg, poids sec) des métaux et métalloïde, ayant des valeurs de critères de qualité pour les sédiments marins, dans l'échantillon global (Vieux Poste) et pour la fraction argileuse (rivière Ste-Marguerite)*

| Site                 | Cr           | Ni         | Cu         | Zn           | As        | Cd          | Hg            | Pb         | Fe      |
|----------------------|--------------|------------|------------|--------------|-----------|-------------|---------------|------------|---------|
| Vieux Poste          | 195          | 82,1       | 66,6       | 197,5        | 4,2       | 0,30        | 0,091         | 17,5       | 138     |
| RSM2-argile          | 185          | 83,9       | 59,7       | 256,0        | 1,2       | 0,40        | 0,041         | 14,6       | 145     |
| RSM1-argile          | 156          | 75,1       | 49,9       | 188,7        | 1,4       | 0,37        | 0,052         | 17,2       | 127     |
| Moyenne ± écart-type | 178,8 ± 20,3 | 80,4 ± 4,6 | 58,7 ± 8,4 | 214,1 ± 36,6 | 2,3 ± 1,7 | 0,36 ± 0,05 | 0,061 ± 0,027 | 16,4 ± 1,6 | 137 ± 9 |

La concentration en fer est exprimée en g/kg.

Plusieurs auteurs ont proposé une codification de la sévérité de l'enrichissement d'un élément donné dans un sédiment à partir d'intervalles de valeurs de FE. Des valeurs de FE près de 1 indiquent nécessairement une absence d'enrichissement par rapport au site de référence. Sakan et collaborateurs (2015) ont proposé une codification à sept intervalles (tableau 4-8). Un enrichissement modérément sévère d'un élément dans le sédiment correspond à l'intervalle de FE entre 5 et 10 alors que l'enrichissement le plus sévère est considéré au-delà d'un FE de 50.

*Tableau 4-8 : Codification du facteur d'enrichissement d'un élément dans le sédiment, selon la sévérité (Sakan et al., 2015)*

| Valeur FE | Interprétation                    |
|-----------|-----------------------------------|
| ≤ 1       | Aucun enrichissement              |
| 1 - 3     | Enrichissement mineur             |
| 3 - 5     | Enrichissement modéré             |
| 5 - 10    | Enrichissement modérément sévère  |
| 10 - 25   | Enrichissement sévère             |
| 25 - 50   | Enrichissement très sévère        |
| > 50      | Enrichissement extrêmement sévère |

#### 4.2.3.1.4 Facteurs d'enrichissement des métaux avec critères établis

Les tableaux 4-9 et 4-10 regroupent les valeurs de FE pour les huit métaux discutés précédemment sur la base de leur concentration, dans les échantillons de sédiment de la couche de surface et de la couche de fond de la campagne 2016. Cette normalisation produit un portrait très différent de l'état de la situation concernant la contamination du sédiment par les métaux, basée sur les cinq critères de qualité des sédiments marins (tableau 4-2).

Le chrome ne peut plus être considéré comme un contaminant généralisé de la baie de Sept-Îles, puisque les concentrations mesurées ne dépassent pas le niveau naturel. Le même constat s'applique pour le nickel, le cuivre, le zinc et le plomb. Des huit éléments avec critères établis, l'arsenic, le cadmium et le mercure ont des valeurs de FE qui correspondent au moins une fois à un enrichissement modéré.

L'arsenic dépasse les seuils d'enrichissement modérément sévère et sévère pour neuf des trente-cinq échantillons. Ce sont les échantillons de sédiments de surface des sites BSI\_1\_1 et BSI\_1\_3, situés près des installations de l'aluminerie Alouette, qui présentent les valeurs de FE les plus élevées et sont associés à des concentrations qui dépassent le critère CSE et CEO. Cependant, une valeur de FE située dans l'intervalle 5-10 (enrichissement modérément sévère) peut être associée à une faible concentration de l'élément. C'est le cas pour l'arsenic des échantillons de sédiment de surface BM\_5\_1 et BPC\_4\_2 (tableau 4-9) qui ont en fait une concentration en arsenic de 2,3 et 1,7 mg/kg respectivement (tableau 4-4), nettement sous le critère CER. Ceci peut s'expliquer par une faible concentration en fer dans l'échantillon, relativement à la concentration en fer dans les argiles postglaciaires, ce qui contribue à une valeur de FE plus élevée pour l'arsenic.

Le cadmium a une valeur de FE qui dépasse le seuil de 3 pour un seul échantillon, le sédiment de la couche de surface au site BPC\_4\_2 (Port-Cartier).

La concentration du mercure représente un enrichissement modéré pour deux échantillons de sédiment de surface (BPC\_4\_2 et BSI\_6\_3) et un enrichissement modérément sévère pour un échantillon de sédiment de surface (PTRP1, rivière Pentecôte) et pour un échantillon de sédiment de la couche de fond (BSI\_2\_2). Ici encore, les valeurs de FE ne correspondent pas à des concentrations excessives en mercure, la concentration en mercure dépasse le critère CER seulement pour l'échantillon BSI\_2\_2.

*Tableau 4-9 : Sédiment couche de surface. Facteur d'enrichissement des métaux et métalloïde normés*

| Site         | Cr  | Ni  | Cu  | Zn  | As   | Cd  | Hg  | Pb  |
|--------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| BM_2_2_SURF  | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,9  | 0,6 | 0,1 | 0,3 |
| BM_3_1_SURF  | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 1,3  | 1,0 | 0,4 | 0,3 |
| BM_5_1_SURF  | 0,6 | 0,9 | 0,5 | 0,9 | 6,6  | 1,4 | 0,7 | 1,4 |
| BPC_4_2_SURF | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 5,7  | 3,9 | 3,0 | 0,7 |
| BPC_5_2_SURF | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 1,2 | 1,8  | 1,1 | 0,2 | 1,1 |
| BPC_8_3_SURF | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,7 | 4,1  | 1,5 | 0,6 | 1,1 |
| BSI_1_1_SURF | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 0,9 | 15,9 | 0,9 | 0,8 | 1,1 |
| BSI_1_2_SURF | 0,7 | 0,5 | 0,1 | 0,6 | 2,1  | 1,6 | 0,4 | 0,5 |
| BSI_1_3_SURF | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 13,8 | 1,1 | 1,4 | 1,2 |
| BSI_2_1_SURF | 1,0 | 0,9 | 0,7 | 1,0 | 7,1  | 1,2 | 0,8 | 1,2 |
| BSI_2_2_SURF | 1,2 | 0,7 | 0,2 | 0,8 | 2,0  | 1,4 | 0,6 | 0,7 |
| BSI_2_3_SURF | 0,8 | 0,5 | 0,2 | 0,7 | 2,7  | 2,2 | 0,8 | 0,9 |
| BSI_3_1_SURF | 0,8 | 0,6 | 0,3 | 0,7 | 3,7  | 1,4 | 1,0 | 1,0 |
| BSI_3_2_SURF | 1,1 | 1,1 | 0,9 | 1,2 | 4,7  | 1,0 | 1,0 | 1,3 |

| Site                | Cr  | Ni  | Cu  | Zn  | As  | Cd  | Hg  | Pb  |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| BSI_3_3_SURF        | 0,7 | 0,6 | 0,3 | 0,8 | 3,4 | 1,7 | 0,5 | 0,8 |
| BSI_4_1_SURF        | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,8 | 5,9 | 1,6 | 1,0 | 1,5 |
| BSI_4_2_SURF        | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 0,9 | 4,7 | 1,7 | 0,7 | 1,1 |
| BSI_4_3_SURF        | 0,7 | 0,7 | 0,3 | 0,8 | 3,0 | 1,4 | 0,7 | 0,8 |
| BSI_5_1_SURF        | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,8 | 1,6 | 1,3 | 0,8 | 0,5 |
| BSI_5_2_SURF        | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,6 | 3,6 | 0,9 | 0,5 | 0,4 |
| BSI_5_3_SURF        | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 1,0 | 4,7 | 1,2 | 1,3 | 0,8 |
| BSI_6_1_SURF        | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 4,0 | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| BSI_6_2_SURF        | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,9 | 6,9 | 1,2 | 0,7 | 1,0 |
| BSI_6_3_SURF        | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 1,0 | 4,1 | 1,3 | 4,5 | 1,3 |
| BSI_7_1_SURF        | 1,0 | 0,8 | 0,5 | 0,9 | 4,2 | 1,3 | 1,5 | 1,1 |
| BSI_7_2_SURF        | 0,7 | 0,5 | 0,2 | 0,7 | 4,1 | 1,2 | 2,6 | 0,6 |
| BSI_7_3_SURF        | 0,6 | 0,5 | 0,2 | 0,6 | 2,8 | 1,1 | 1,2 | 0,6 |
| BSI_8_1_SURF        | 0,7 | 0,6 | 0,3 | 0,7 | 3,3 | 1,4 | 1,3 | 0,9 |
| BSI_8_2_SURF        | 0,9 | 0,9 | 0,5 | 0,9 | 4,0 | 1,3 | 1,8 | 1,3 |
| BSI_8_3_SURF        | 1,0 | 0,9 | 0,6 | 0,9 | 5,5 | 1,4 | 0,9 | 1,2 |
| PT_5_1_OUEST_COR    | 0,8 | 0,6 | 0,3 | 0,7 | 3,7 | 1,4 | 0,6 | 0,9 |
| PT_5_2_EST_GR_BOULE | 0,7 | 0,6 | 0,2 | 0,6 | 3,7 | 0,9 | 1,2 | 0,8 |
| PTRP1_SURF          | 0,4 | 0,7 | 0,5 | 1,1 | 0,6 | 2,1 | 7,4 | 0,9 |
| PTRP2_SURF          | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,4 | 0,5 | 2,8 | 1,8 | 1,4 |
| PTRP3_SURF          | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 2,5 | 1,9 | 1,2 |

Les couleurs correspondent à la sévérité de l'enrichissement (code des couleurs expliqué au tableau 4-8).



Crédit photo : Julie Carrière

Tableau 4-10 : Séiment couche de fond. Facteur d'enrichissement des métaux et métalloïde avec critères établis

| Site         | Cr  | Ni  | Cu  | Zn  | As  | Cd  | Hg  | Pb  |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| BSI_1_1_FOND | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,8 | 9,1 | 0,8 | 1,1 | 1,1 |
| BSI_2_2_FOND | 0,8 | 0,6 | 0,2 | 0,7 | 2,4 | 2,0 | 8,0 | 1,3 |
| BSI_3_3_FOND | 0,8 | 0,6 | 0,3 | 0,8 | 3,3 | 1,8 | 0,5 | 0,8 |
| BSI_4_2_FOND | 0,9 | 0,8 | 0,5 | 0,9 | 4,3 | 1,5 | 1,1 | 1,0 |
| BSI_5_1 FOND | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,6 | 1,3 | 1,2 | 0,3 | 0,5 |
| BSI_6_1_FOND | 0,9 | 0,9 | 0,6 | 0,9 | 4,6 | 1,3 | 0,9 | 1,2 |
| BSI_6_2_FOND | 0,9 | 0,8 | 0,5 | 0,9 | 5,1 | 1,3 | 0,7 | 1,1 |
| BSI_6_3_FOND | 0,9 | 0,9 | 0,6 | 0,9 | 3,7 | 1,2 | 1,3 | 1,2 |
| BSI_7_1 FOND | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 0,9 | 5,5 | 1,3 | 0,7 | 1,1 |
| BSI_8_3_FOND | 0,9 | 0,8 | 0,6 | 0,9 | 6,5 | 1,3 | 1,6 | 1,3 |
| PTRP1 FOND   | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 1,1 | 0,5 | 2,1 | 0,7 | 0,9 |
| PTRP2 FOND   | 0,3 | 0,9 | 0,5 | 1,1 | 0,8 | 2,2 | 0,5 | 0,9 |
| PTRP3_FOND   | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,8 | 0,5 | 1,7 | 0,5 | 0,6 |

Les couleurs correspondent à la sévérité de l'enrichissement (code des couleurs expliqué au tableau 4-8).

Le tableau 4-11 regroupe les valeurs de FE pour les huit métaux dans la fraction argileuse des échantillons de sédiment prélevés en 2016 et 2014.

Le mercure présente les facteurs d'enrichissement correspondant à un enrichissement modéré pour trois échantillons sur treize, un enrichissement sévère est observé pour quatre échantillons, dont les échantillons provenant des îles Corossol et Grosse Boule. La valeur de FE la plus élevée est obtenue pour le mercure dans l'échantillon P4D2014, elle dépasse 30 ce qui correspond à un enrichissement très sévère. Cet échantillon a été prélevé en 2014 près des installations de la compagnie minière IOC Rio Tinto. Les valeurs FE élevées pour le mercure correspondent également à un dépassement important du critère CSE, jusqu'au critère CEF pour les échantillons BSI\_2\_2 et P4D (tableau 4-6).

Après le mercure, c'est l'arsenic qui dépasse plus fréquemment le seuil FE = 5 pour un enrichissement modéré, soit dix échantillons sur treize, incluant les deux échantillons provenant des îles Corossol et Grosse Boule. Ces valeurs de FE pour l'arsenic correspondent à des concentrations qui dépassent son critère CEO, qui est de 19 mg/kg, 8 fois sur treize.

Le cadmium présente un facteur FE qui dépasse le seuil de 5 pour trois échantillons sur treize, avec des concentrations qui dépassent son critère CEF pour les échantillons BSI\_2\_2 et BSI\_3\_3.

L'interprétation des résultats de concentrations de métaux avec critères établis de la fraction argileuse (tableau 4-6), a mis en lumière les sites BSI\_2\_2 et P4D comme fortement contaminés; les valeurs de FE de l'arsenic, cadmium et mercure de la fraction argileuse démarquent, avec le site BSI\_3\_3, les mêmes sites comme fortement impactés.

Tableau 4-11 : Séđiment couche de surface, fraction argileuse. Facteur d'enrichissement des métaux et métalloïde avec critères établis.

| Site              | Cr  | Ni  | Cu  | Zn  | As   | Cd  | Hg   | Pb  |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|
| BSI 1_1           | 0,8 | 0,9 | 0,4 | 0,8 | 9,5  | 0,6 | 1,6  | 1,3 |
| BSI 2_2           | 1,6 | 1,6 | 2,1 | 0,8 | 8,3  | 9,5 | 18,1 | 0,6 |
| BSI 3_3           | 2,8 | 2,6 | 2,2 | 0,9 | 9,5  | 7,4 | 22,2 | 0,7 |
| BSI 4_2           | 1,0 | 1,0 | 0,7 | 0,9 | 4,2  | 0,8 | 2,0  | 2,2 |
| BSI 6_3           | 0,9 | 0,9 | 0,5 | 0,8 | 7,0  | 1,1 | 1,2  | 1,6 |
| BSI 7_1           | 0,9 | 0,9 | 0,5 | 0,7 | 6,2  | 1,2 | 4,5  | 1,5 |
| BSI 8_3           | 1,1 | 1,2 | 0,7 | 0,8 | 7,6  | 1,3 | 4,5  | 1,9 |
| P1C 2014          | 0,8 | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 9,6  | 4,1 | 7,1  | 0,9 |
| P2A 2014          | 1,0 | 0,9 | 0,4 | 0,6 | 7,4  | 1,6 | 1,4  | 0,6 |
| P3A 2014          | 1,5 | 1,6 | 0,9 | 0,8 | 6,0  | 2,6 | 5,1  | 0,8 |
| P4D 2014          | 1,2 | 1,2 | 0,8 | 0,3 | 3,3  | 6,9 | 32,1 | 0,1 |
| PT_5_1_O_COR      | 1,2 | 1,2 | 0,7 | 0,7 | 9,8  | 2,0 | 20,7 | 1,1 |
| PT_5_2_E_GR_BOULE | 1,3 | 1,4 | 1,3 | 1,0 | 14,2 | 3,2 | 9,6  | 0,9 |

Les couleurs correspondent à la sévérité de l'enrichissement (code des couleurs expliqué au tableau 4.8).

#### 4.2.3.1.5 Facteurs d'enrichissement des métaux avec critères établis : Séđiment de surface vs séđiment plus profond

Pour un même site, la comparaison des valeurs de FE pour un élément entre le séđiment de la couche de surface (0-8 cm) et le séđiment de la couche de fond (8-15 cm) permet d'estimer si la nature des particules qui se déposent a changé dans le temps. C'est une approche approximative puisque cette évolution de la nature du séđiment récent est habituellement étudiée avec des strates de l'ordre du centimètre. La datation des strates permet ensuite de reconstituer l'historique séđimentaire.

Néanmoins, les histogrammes regroupés aux figures 4-11 et 4-12 montrent que, dans l'ensemble, les séđiments des sites BSI sont comparables entre les deux couches, sur la base du FE plutôt constant pour chaque élément pour un site donné. La composition chimique du séđiment varierait donc peu dans les quinze premiers centimètres, en raison de la nature stable des apports.

L'exception est pour le mercure au site BSI\_2\_2 ; il semble que la couche de 8-15 cm y soit nettement plus enrichie en mercure que la couche de surface. Ceci peut indiquer un apport passé important de mercure ou un changement de régime séđimentaire avec des séđiments pauvres en métaux lourds qui diluent les séđiments plus riches.

La valeur de FE plus élevée dans la couche de fond pour l'arsenic, le cadmium et le plomb pour ce site pourrait valider cette hypothèse. Dans les échantillons de la baie de Sept-îles, sauf pour le site BSI\_2\_2, l'arsenic domine dans les deux couches de séđiments, par les valeurs de son FE, les huit éléments qui ont des critères établis pour la qualité du séđiment marin. Cet enrichissement implique une source d'arsenic

pour ces sédiments autre que les argiles postglaciaires, dont la composition est le critère de référence pour calculer les facteurs d'enrichissements.

Le site BSI\_6\_3 se démarque par un facteur d'enrichissement pour le mercure plus important dans la couche de surface que dans la couche de fond, ce qui impliquerait un apport différent de ce métal dans le sédiment récent.

L'enrichissement du sédiment en arsenic semble être confiné à la baie de Sept-Îles et les îles à proximité (sites BSI\_7\_1 et BSI\_8\_3) ; les sédiments provenant des trois sites échantillonnés en 2016 à l'embouchure de la rivière Pentecôte ne sont pas enrichis en arsenic (figure 4-13). À cet endroit, le cadmium est le métal qui présente un enrichissement mineur pour les trois sites, en comparaison des argiles postglaciaires, dans les deux couches de sédiment. Cependant, les valeurs de FE sont associées à des concentrations en cadmium inférieures au critère CER (0,32 mg/kg).

Le mercure a un FE plus important dans la couche de surface des trois sites, avec une valeur de 7,4 pour le site PTRP1, soit un enrichissement modérément sévère pour une concentration proche du critère CER du mercure (0,051 mg/kg).

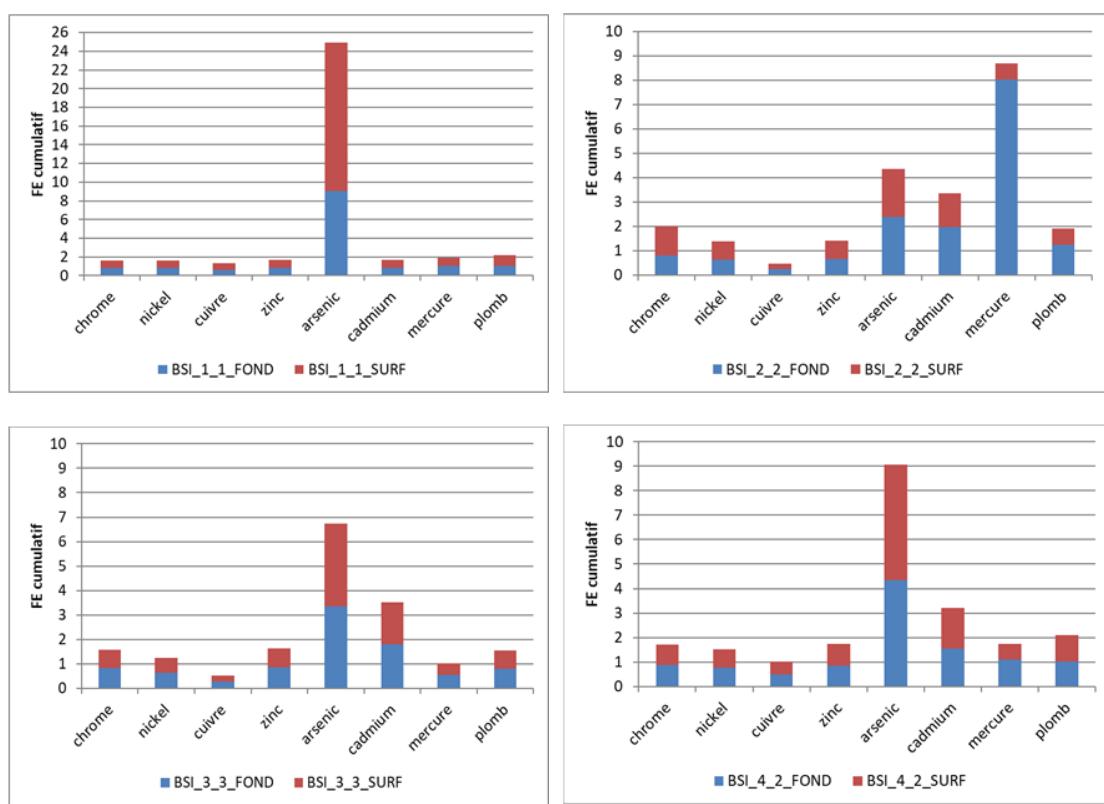


Figure 4-11 : Facteur d'enrichissement des huit éléments avec critères établis pour la qualité du sédiment marin, dans la couche de surface et la couche de fond des sites situés dans la baie de Sept-Îles et à proximité (campagne 2016)

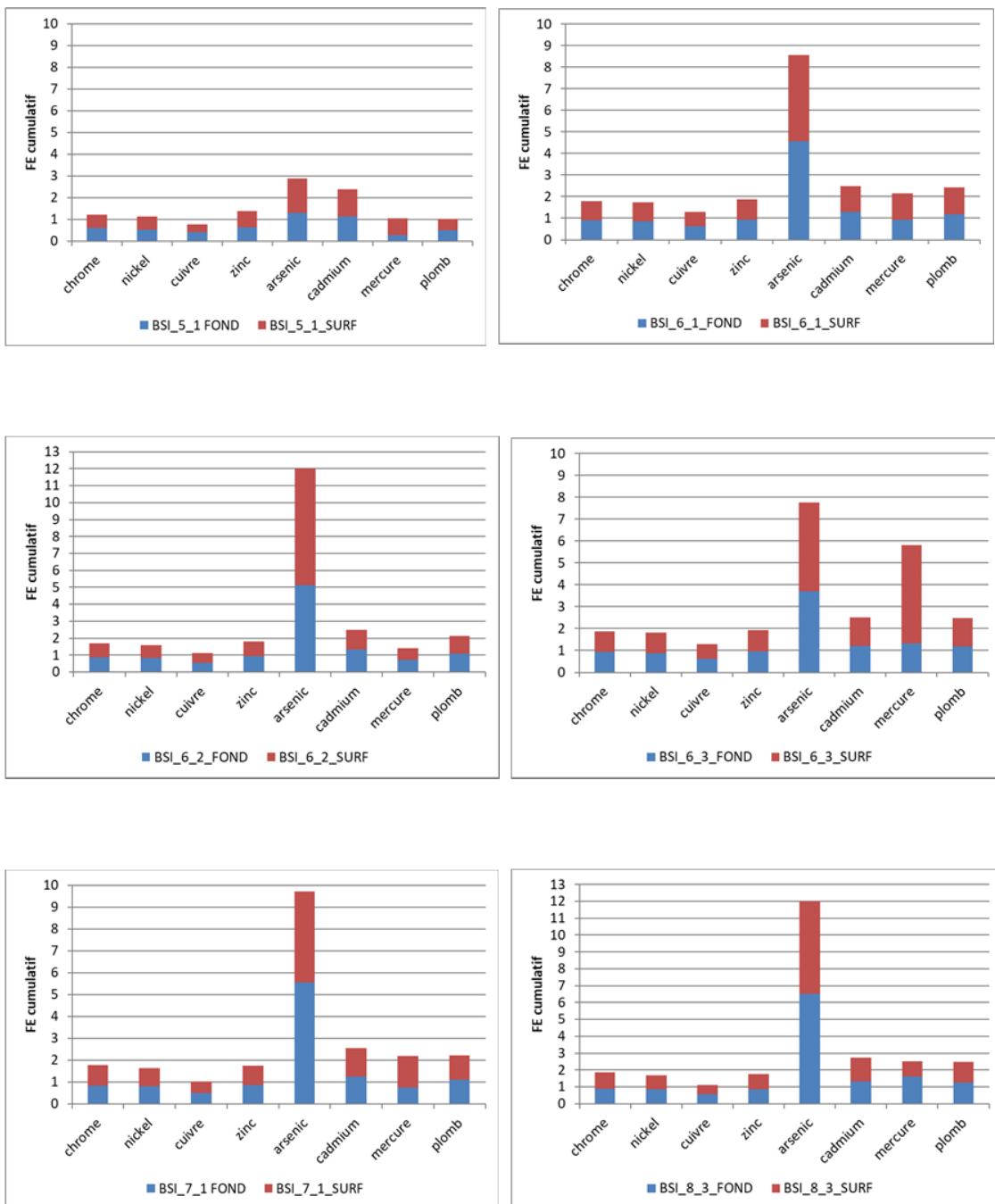


Figure 4-12 : Facteur d'enrichissement des huit éléments avec critères établis pour la qualité du sédiment marin, dans la couche de surface et la couche de fond des sites situés dans la baie de Sept-Îles et à proximité (campagne 2016)

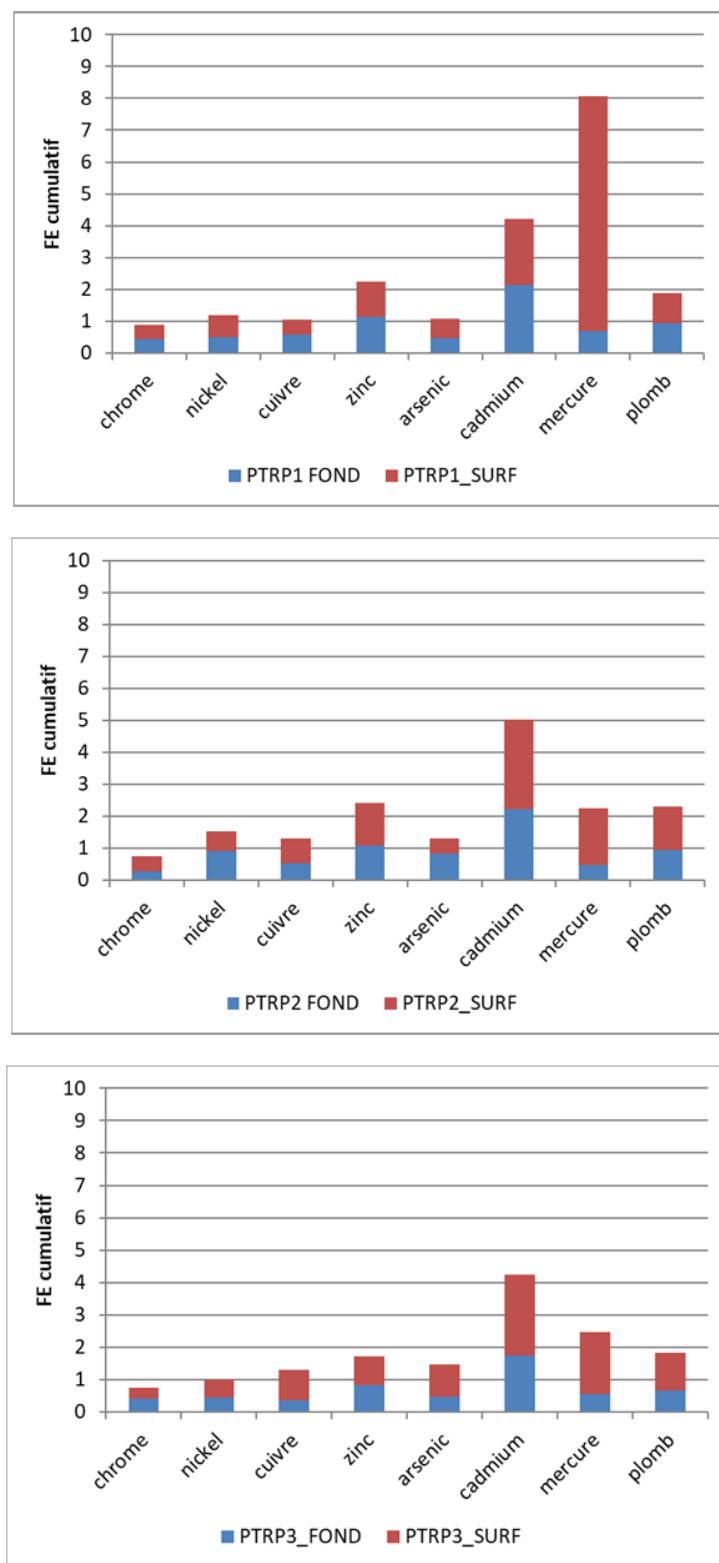


Figure 4-13 : Facteur d'enrichissement des huit éléments avec critères établis pour la qualité du sédiment marin, dans la couche de surface et la couche de fond des sites situés à l'embouchure de la rivière Pentecôte (campagne 2016)

L'interprétation des résultats de l'analyse des contaminants inorganiques, métaux et métalloïdes, dans les sédiments avec les critères de qualité du sédiment marin et le facteur d'enrichissement référé aux argiles postglaciaires, permet d'avoir une idée plus juste de la situation.

Une concentration élevée dans le sédiment accompagnée d'un faible facteur d'enrichissement ( $\leq 1$ ) indique une source naturelle de l'élément métallique, une intervention de mitigation n'est probablement pas nécessaire.

Une faible concentration associée à un facteur d'enrichissement modérément élevé annonce une source différente pour cet élément, voire une situation de contamination en développement.

Tant que la concentration est sous le seuil du critère CER, les actions seront limitées. La situation la plus critique est une concentration élevée du métal, au-delà de son critère CSE, associée à un facteur d'enrichissement élevée. Le cas de l'arsenic dans l'échantillon de surface BSI\_1\_1 en est un exemple, sa concentration y dépasse le critère CEO et son FE correspond à un enrichissement sévère.

#### 4.2.3.2 Autres éléments quantifiés dans les échantillons de la campagne 2016

L'ensemble des concentrations des métaux mesurées en 2013, 2014 et 2016 et n'ayant pas de critères sont présentées à l'annexe C4 (C4-4, C4-5 et C4-6).

Les tableaux 4-12 à 4-15 regroupent les concentrations des métaux et métalloïdes autres que Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg et Pb dans les sédiments de la couche de fond, de la couche de surface, de leur fraction argileuse et les argiles postglaciaires (sites du Vieux-Poste et de la rivière Ste-Marguerite RSM1 et RSM2).

Pour les argiles postglaciaires, la valeur moyenne des concentrations de chaque élément (tableaux 4-12 et 4-14) a permis de calculer les ratios (M/Fe) référence pour obtenir ensuite les facteurs d'enrichissement des éléments dans chaque échantillon (tableau 4-16). Ces FE sont discutés à la section 4.3.3.2.1.

Pour un élément donné, sa concentration moyenne dans les sédiments de surface des échantillons 2016 est du même ordre de grandeur que celle mesurée pour les échantillons des campagnes 2013 et 2014. Par exemple, la concentration moyenne du vanadium dans les échantillons de

- 2013 ( $n = 25$ ) était de  $77 \pm 21$  mg/kg,
- 2014 pour la série P1 à P4 ( $n = 20$ ) était de  $102 \pm 22$  mg/kg,
- 2014 pour la série R1 à R4 ( $n = 20$ ) était de  $130 \pm 65$  mg/kg,
- 2016 pour les échantillons de surface BSI1 à BSI8 ( $n = 24$ ) était de  $70 \pm 25$  mg/kg.

Ce constat est mis en évidence sur les cartes de distribution des concentrations dans le sédiment de surface, pour les huit métaux avec critères établis pour la qualité du sédiment marin et le fer, à l'annexe A4. Pour chacun de ces neuf éléments, l'intervalle des concentrations est cohérent d'une année à l'autre avec les valeurs plus élevées à l'intérieur de la baie, particulièrement pour les sites près de Pointe-Noire, et des valeurs faibles autour des îles (par exemple Grosse Boule). Il est intéressant de souligner que les concentrations moyennes des métaux titane, fer, manganèse et aluminium dans nos échantillons sont comparables à celles que Loring et Nota (1968) ont rapportées, il y a cinquante ans, pour le sédiment marin de surface prélevés dans le golfe entre Pointe-des-Monts et l'île d'Anticosti.

L'information supplémentaire acquise avec les échantillons de 2016 est la composition chimique en métaux et métalloïdes extractibles de leur fraction argileuse. Pour la plupart des éléments, leur concentration y est plus élevée (résultats surlignés en bleu dans les tableaux 4-13 et 4-15). Ceci est observé pour les métaux alcalins Li, K, Rb et Cs et les métaux alcalino-terreux Mg et Ba (tableau 4-13). Pour les autres métaux et métalloïdes, l'écart de concentration entre le sédiment global et sa fraction argileuse est aussi observé, cependant, il est moins prononcé pour Mn, Se, Tl et Bi (tableau 4-15). Les particules fines du sédiment

seraient les vecteurs principaux des métaux et métalloïdes qui sont d'un intérêt pour établir l'état de contamination du milieu benthique, même s'ils n'ont pas de critères établis de qualité du sédiment, comme par exemple l'étain (Sn), l'uranium (U) ou encore l'antimoine (Sb).

Le nombre d'éléments quantifiés étant important, il est difficile de déterminer des sites qui sont impactés par les activités anthropiques à partir des seules concentrations. Pour avoir une vue d'ensemble, nous avons établi une matrice de corrélation linéaire entre les éléments à partir de toutes les concentrations mesurées pour tous les échantillons de la campagne de 2016 (incluant les résultats pour la fraction argileuse des échantillons P1C, P2A, P3A et P4D prélevés en 2014), cette matrice est rapportée à la figure 4-14.

L'information que l'on peut obtenir de cette représentation des résultats est la covariance linéaire entre les éléments, ce qui peut contribuer à l'identification des sources communes.

Nous avons utilisé le critère arbitraire de  $r > 0,8$  (le maximum étant 1, soit 100 % de corrélation) pour considérer une relation linéaire positive forte entre deux éléments qui sont extractibles par notre méthode de préparation du sédiment à l'analyse chimique.

Certains éléments ne sont corrélés linéairement (au critère choisi) avec aucun autre, soit le sodium, le calcium, le strontium, le manganèse, le thallium et le bismuth. Deux éléments ne sont corrélés qu'avec un ou deux éléments, soit le titane (corrélé avec le molybdène) et l'arsenic qui n'est corrélé qu'avec le beryllium et le bore.

Par contre, deux constats intéressants s'imposent ; d'abord un groupe important de métaux et métalloïdes est corrélé avec le chrome : Be, B, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Se, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, Hg et U. Dans ce groupe, les éléments sont corrélés l'un envers l'autre, par exemple le cuivre avec le nickel et le nickel avec le cobalt. Puis un deuxième groupe d'éléments (Li, Be, V, Zn, Ga, Rb, Ba, Pb) est corrélé avec le trio de métaux Mg, Al et K. Il y aurait donc deux sources principales, issues de formations géologiques différentes, qui alimentent la baie par le transport de matériel minéral en fines particules, et qui dominent la composition du sédiment en ces métaux.

Bien que le critère du coefficient de corrélation  $r > 0,8$  implique une relation linéaire probablement assez forte entre deux éléments, il ne rend pas compte de la dispersion des données et donc des sites où la relation, entre ces deux éléments, s'écarte de la linéarité, soit par l'enrichissement ou l'appauvrissement de l'un ou l'autre des éléments. La figure 4-15 illustre un exemple avec la relation entre les concentrations du plomb et du baryum.

*Tableau 4-12 : Argiles postglaciaires. Concentration (mg/kg, poids sec) des métaux alcalins et alcalino-terreux*

| Site                 | Li      | Be          | Na          | Mg            | K             | Ca            | Rb       | Sr     | Cs        | Ba         |
|----------------------|---------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|----------|--------|-----------|------------|
| Vieux Poste          | 79      | 1,43        | 4 415       | 32 792        | 28 100        | 21 239        | 170      | 88     | 5,8       | 1 276      |
| RSM2-argile          | 39      | 1,36        | 5 800       | 33 195        | 28 951        | 26 704        | 189      | 95     | 6,1       | 1 075      |
| RSM1-argile          | 35      | 1,38        | 5 150       | 30 306        | 24 781        | 25 354        | 166      | 86     | 5,2       | 1 005      |
| Moyenne ± écart-type | 51 ± 25 | 1,39 ± 0,03 | 5 122 ± 693 | 32 098 ± 1565 | 27 277 ± 2203 | 24 432 ± 2847 | 175 ± 12 | 90 ± 5 | 5,7 ± 0,4 | 1119 ± 141 |

Tableau 4-13 : Ensemble des échantillons de sédiment de la campagne 2016. Concentration (mg/kg, poids sec) des métaux alcalins et alcalino-terreux (échantillons d'argile case en bleu)

| Site                 | Li   | Be  | Na    | Mg    | K     | Ca    | Rb    | Sr    | Cs   | Ba   |
|----------------------|------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| BM_2_2_SURF          | 3,5  | 0,7 | 3629  | 7648  | 2029  | 33876 | 6,1   | 56,0  | 0,8  | 34   |
| BM_3_1_SURF          | 5,3  | 0,8 | 5142  | 7377  | 2152  | 32063 | 6,3   | 59,2  | 1,4  | 41   |
| BM_5_1_SURF          | 5,2  | 0,5 | 4412  | 4006  | 2196  | 14634 | 9,0   | 65,8  | 0,8  | 51   |
| BPC_4_2_SURF         | 3,7  | 0,3 | 3396  | 2948  | 1281  | 8317  | 5,1   | 31,5  | 1,3  | 19   |
| BPC_5_2_SURF         | 14,1 | 0,8 | 6481  | 13931 | 12179 | 24504 | 88,0  | 71,2  | 2,6  | 344  |
| BPC_8_3_SURF         | 3,6  | 0,3 | 3445  | 4481  | 2149  | 12505 | 9,7   | 34,8  | 0,9  | 44   |
| BSI_1_1_FOND         | 35,6 | 1,3 | 21649 | 22402 | 16078 | 37509 | 97,1  | 156,2 | 3,1  | 496  |
| BSI_1_1_SURF         | 15,7 | 0,8 | 18708 | 15586 | 11510 | 25776 | 68,3  | 118,0 | 2,4  | 332  |
| BSI_1_1_SURF_pARGILE | 74,9 | 1,4 | 4151  | 28714 | 25066 | 20368 | 161,3 | 82,0  | 4,8  | 1023 |
| BSI_1_2_SURF         | 3,6  | 0,5 | 4122  | 8799  | 2629  | 32915 | 7,5   | 49,0  | 0,9  | 45   |
| BSI_1_3_SURF         | 13,1 | 0,7 | 15184 | 12188 | 8678  | 19753 | 52,3  | 91,1  | 2,1  | 220  |
| BSI_2_1_SURF         | 19,2 | 1,0 | 24491 | 20269 | 13820 | 36518 | 80,2  | 137,8 | 2,7  | 408  |
| BSI_2_2_FOND         | 2,4  | 0,2 | 3197  | 3650  | 1221  | 11238 | 4,6   | 32,1  | 0,8  | 22   |
| BSI_2_2_SURF         | 4,3  | 0,5 | 3286  | 7153  | 2428  | 20945 | 7,9   | 85,7  | 0,9  | 46   |
| BSI_2_2_SURF_pARGILE | 50,8 | 2,5 | 11019 | 34859 | 28644 | 33204 | 163,9 | 194,9 | 63,3 | 776  |
| BSI_2_3_SURF         | 3,5  | 0,5 | 4043  | 6363  | 2772  | 27291 | 9,9   | 59,2  | 0,8  | 58   |
| BSI_3_1_SURF         | 4,7  | 0,4 | 6228  | 6389  | 3105  | 23242 | 13,2  | 60,2  | 1,0  | 80   |
| BSI_3_2_SURF         | 22,2 | 1,0 | 10282 | 19649 | 15978 | 29239 | 98,4  | 106,7 | 3,1  | 526  |
| BSI_3_3_FOND         | 3,9  | 0,3 | 3403  | 4858  | 2711  | 18768 | 12,3  | 48,1  | 1,0  | 67   |
| BSI_3_3_SURF         | 4,9  | 0,5 | 3798  | 6395  | 2988  | 23745 | 12,1  | 61,1  | 0,9  | 64   |
| BSI_3_3_SURF_pARGILE | 17,2 | 0,8 | 3865  | 11928 | 10432 | 11399 | 52,0  | 60,3  | 17,0 | 275  |
| BSI_4_1_SURF         | 6,8  | 0,5 | 3761  | 4380  | 2286  | 15020 | 8,8   | 98,4  | 0,8  | 51   |
| BSI_4_2_FOND         | 6,2  | 0,4 | 4564  | 6844  | 4063  | 17977 | 19,6  | 46,6  | 1,2  | 107  |
| BSI_4_2_SURF         | 6,7  | 0,4 | 4806  | 7190  | 4443  | 19363 | 21,6  | 53,8  | 1,3  | 115  |
| BSI_4_2_SURF_pARGILE | 81,7 | 1,6 | 4374  | 32305 | 28002 | 22664 | 182,4 | 95,0  | 5,8  | 1197 |
| BSI_4_3_SURF         | 3,7  | 0,3 | 2719  | 3671  | 1691  | 19328 | 7,2   | 75,3  | 0,8  | 33   |
| BSI_5_1_FOND         | 3,6  | 0,3 | 3341  | 6223  | 2640  | 17325 | 9,5   | 44,1  | 0,8  | 77   |
| BSI_5_1_SURF         | 4,3  | 0,3 | 2730  | 5730  | 2741  | 15166 | 11,1  | 31,8  | 0,9  | 84   |
| BSI_5_2_SURF         | 7,4  | 0,4 | 4935  | 6912  | 3718  | 16389 | 19,4  | 43,8  | 1,1  | 113  |
| BSI_5_3_SURF         | 8,1  | 0,3 | 4027  | 6350  | 4356  | 11499 | 24,9  | 33,7  | 1,3  | 153  |
| BSI_6_1_FOND         | 10,2 | 0,6 | 7207  | 9849  | 6373  | 23851 | 30,9  | 69,0  | 1,6  | 166  |

| Site                        | Li   | Be  | Na    | Mg    | K     | Ca    | Rb    | Sr    | Cs   | Ba   |
|-----------------------------|------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| BSI_6_1_SURF                | 9,5  | 0,5 | 6584  | 8739  | 5912  | 18921 | 29,8  | 59,3  | 1,6  | 159  |
| BSI_6_2_PROF                | 8,6  | 0,5 | 7033  | 9452  | 5950  | 23074 | 28,8  | 67,5  | 1,5  | 157  |
| BSI_6_2_SURF                | 11,0 | 0,6 | 10140 | 11989 | 7421  | 29711 | 35,8  | 89,2  | 1,7  | 198  |
| BSI_6_3_FOND                | 14,5 | 0,8 | 8935  | 13411 | 8769  | 29796 | 51,0  | 85,4  | 1,9  | 270  |
| BSI_6_3_SURF                | 12,1 | 0,6 | 8608  | 10262 | 6847  | 21153 | 33,8  | 69,7  | 1,7  | 218  |
| BSI_6_3_SURF_pARGILE        | 47,6 | 1,5 | 5279  | 31774 | 29343 | 20955 | 193,0 | 96,8  | 7,5  | 1186 |
| BSI_7_1_FOND                | 8,1  | 0,5 | 6712  | 8524  | 5159  | 22568 | 25,3  | 66,4  | 1,4  | 135  |
| BSI_7_1_SURF                | 8,9  | 0,6 | 8348  | 8902  | 5250  | 22826 | 25,7  | 65,9  | 1,4  | 139  |
| BSI_7_1_SURF_pARGILE        | 34,4 | 1,3 | 4354  | 21651 | 19690 | 17507 | 123,8 | 79,2  | 5,7  | 846  |
| BSI_7_2_SURF                | 3,2  | 0,4 | 3151  | 3917  | 1697  | 16277 | 7,4   | 49,2  | 0,9  | 32   |
| BSI_7_3_SURF                | 5,4  | 0,5 | 5703  | 6878  | 3025  | 57488 | 12,5  | 121,3 | 0,9  | 67   |
| BSI_8_1_SURF                | 4,8  | 0,4 | 4301  | 5330  | 2884  | 15374 | 12,8  | 46,7  | 1,0  | 66   |
| BSI_8_2_SURF                | 7,5  | 0,4 | 6009  | 6930  | 4103  | 19350 | 19,8  | 55,8  | 1,2  | 104  |
| BSI_8_3_FOND                | 7,5  | 0,5 | 7563  | 7468  | 4389  | 19553 | 20,4  | 65,2  | 1,3  | 107  |
| BSI_8_3_SURF                | 9,9  | 0,7 | 9777  | 10721 | 6443  | 27696 | 30,0  | 85,5  | 1,6  | 155  |
| BSI_8_3_SURF_pARGILE        | 36,8 | 1,4 | 3970  | 21375 | 19719 | 16949 | 126,9 | 76,3  | 5,9  | 792  |
| P1C2014_pARGILE             | 13,5 | 1,3 | 5373  | 11941 | 10305 | 22542 | 45,4  | 82,8  | 15,7 | 338  |
| P2A2014_pARGILE             | 38,6 | 1,6 | 6218  | 28944 | 24602 | 26718 | 136,5 | 120,6 | 8,5  | 679  |
| P3A2014_pARGILE             | 35,5 | 1,4 | 5814  | 25493 | 22810 | 23595 | 95,3  | 87,9  | 9,0  | 615  |
| P4D2014_pARGILE             | 25,7 | 2,6 | 6440  | 17014 | 12582 | 15601 | 138,5 | 167,7 | 94,8 | 334  |
| PT_5_1_OUEST_COR            | 5,5  | 0,5 | 6282  | 7513  | 3526  | 28366 | 14,9  | 69,3  | 1,1  | 77   |
| PT_5_1_OUEST_COR_pARGILE    | 38,5 | 1,6 | 5047  | 22232 | 19906 | 20186 | 83,1  | 85,5  | 8,1  | 470  |
| PT_5_2_EST_GR_BOULE         | 5,3  | 0,5 | 4519  | 6012  | 2402  | 22331 | 9,6   | 325,6 | 0,9  | 56   |
| PT_5_2_EST_GR_BOULE_pARGILE | 37,4 | 1,7 | 6489  | 21539 | 19769 | 24387 | 80,1  | 85,8  | 9,7  | 438  |
| PTRP1 FOND                  | 3,2  | 0,2 | 1507  | 2287  | 1105  | 5462  | 4,9   | 19,7  | 0,7  | 18   |
| PTRP1_SURF                  | 3,4  | 0,2 | 1578  | 2425  | 1219  | 6225  | 4,9   | 15,7  | 0,7  | 22   |
| PTRP2 FOND                  | 3,7  | 0,2 | 1724  | 3331  | 1299  | 7505  | 5,1   | 15,4  | 0,8  | 21   |
| PTRP2_SURF                  | 3,3  | 0,1 | 1447  | 1633  | 1086  | 3653  | 5,6   | 13,6  | 0,8  | 20   |
| PTRP3_FOND                  | 3,1  | 0,2 | 2616  | 2493  | 1164  | 5689  | 4,9   | 16,2  | 0,7  | 19   |
| PTRP3_SURF                  | 3,4  | 0,2 | 2631  | 1869  | 951   | 4569  | 3,8   | 16,6  | 0,7  | 15   |
| RSM2                        | 16,1 | 0,9 | 2869  | 17929 | 14442 | 30602 | 96,2  | 97,2  | 2,7  | 483  |
| RSM1                        | 13,9 | 0,7 | 2392  | 14437 | 12509 | 23939 | 83,3  | 83,3  | 2,4  | 368  |

Tableau 4-14 : Argiles postglaciaires. Concentration (mg/kg, poids sec) des métaux et métalloïdes sans critères établis pour la qualité du sédiment marin

| Site                    | B<br>mg/kg | Al<br>g/kg | Ti<br>mg/kg | V<br>mg/kg  | Mn<br>mg/kg  | Fe<br>g/kg | Co<br>mg/kg | Ga<br>mg/kg | Ge<br>mg/kg | Se<br>mg/kg  | Mo<br>mg/kg    | Sn<br>mg/kg  | Sb<br>mg/kg  | Tl<br>mg/kg    | Bi<br>mg/kg    | U<br>mg/kg   |
|-------------------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|----------------|--------------|
| Vieux Poste             | 27         | 90         | 246         | 159         | 1047         | 138        | 21          | 84          | 79          | 1,4          | 0,33           | 2,9          | 5,2          | 0,90           | 0,17           | 2,06         |
| RSM2                    | 11         | 88         | 287         | 150         | 1224         | 145        | 24          | 77          | 82          | 1,8          | 0,28           | 3,9          | 7,1          | 0,95           | 0,11           | 1,97         |
| RSM1                    | 9          | 78         | 266         | 126         | 1193         | 127        | 22          | 70          | 72          | 2,0          | 0,31           | 3,7          | 6,7          | 0,82           | 0,10           | 2,71         |
| Moyenne ±<br>écart-type | 16 ±<br>10 | 85 ±<br>6  | 267 ±<br>21 | 145 ±<br>17 | 1154<br>± 94 | 137 ±<br>9 | 23 ±<br>1   | 77 ±<br>7   | 77 ±<br>5   | 1,8 ±<br>0,3 | 0,31 ±<br>0,02 | 3,5 ±<br>0,6 | 6,3 ±<br>1,0 | 0,89 ±<br>0,07 | 0,13 ±<br>0,04 | 2,3 ±<br>0,4 |

Note : concentration pour l'aluminium et le fer exprimée en g/kg.

Tableau 4-15 : Ensemble des échantillons de sédiment de la campagne 2016. Concentration (mg/kg, poids sec) des métaux et métalloïdes sans critères établis pour la qualité du sédiment marin. Note : concentration pour l'aluminium et le fer exprimée en g/kg

| Site                      | B<br>mg/kg | Al<br>g/kg | Ti<br>mg/kg | V<br>mg/kg | Mn<br>mg/kg | Fe<br>g/kg | Co<br>mg/kg | Ga<br>mg/kg | Ge<br>mg/kg | Se<br>mg/kg | Mo<br>mg/kg | Sn<br>mg/kg | Sb<br>mg/kg | Tl<br>mg/kg | Bi<br>mg/kg | U<br>mg/kg |
|---------------------------|------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| BM_2_2_SURF               | 2,1        | 12,4       | 872         | 195        | 1224        | 155        | 15,7        | 15,0        | 86,1        | 4,9         | 0,2         | 0,13        | 1,8         | 0,9         | 0,7         | 6,4        |
| BM_3_1_SURF               | 5,0        | 24,2       | 675         | 102        | 808         | 100        | 8,7         | 9,2         | 57,6        | 5,1         | 0,3         | 1,92        | 3,5         | 0,3         | 0,1         | 4,3        |
| BM_5_1_SURF               | 3,9        | 10,6       | 658         | 31         | 253         | 21         | 5,4         | 7,2         | 11,9        | 0,9         | 0,3         | 0,35        | 1,4         | 0,7         | 0,5         | 1,2        |
| BPC_4_2_SURF              | 3,8        | 10,6       | 514         | 14         | 239         | 18         | 3,2         | 3,9         | 11,3        | 1,3         | 0,3         | 2,01        | 3,3         | 0,2         | 0,0         | 0,9        |
| BPC_5_2_SURF              | 6,4        | 19,8       | 207         | 86         | 902         | 64         | 17,3        | 24,3        | 35,9        | 2,0         | 0,2         | 0,18        | 1,7         | 1,2         | 0,6         | 2,1        |
| BPC_8_3_SURF              | 2,8        | 7,2        | 602         | 45         | 503         | 28         | 5,9         | 6,4         | 16,4        | 1,3         | 0,1         | 0,12        | 1,7         | 0,9         | 0,6         | 1,2        |
| BSI_1_1_FOND              | 34,5       | 28,8       | 321         | 151        | 2364        | 121        | 24,3        | 37,6        | 72,8        | 2,7         | 0,3         | 0,18        | 1,8         | 1,2         | 0,8         | 2,7        |
| BSI_1_1_SURF              | 21,6       | 19,6       | 318         | 108        | 1588        | 80         | 16,4        | 23,3        | 44,3        | 2,0         | 0,4         | 0,17        | 1,7         | 1,1         | 0,6         | 1,9        |
| BSI_1_1_SURF_-<br>pARGILE | 35,9       | 79,4       | 256         | 153        | 1074        | 137        | 28,0        | 69,2        | 76,7        | 1,6         | 0,3         | 1,94        | 3,4         | 0,9         | 0,2         | 1,6        |

| <b>Site</b>          | <b>B</b><br>mg/kg | <b>Al</b><br>g/kg | <b>Ti</b><br>mg/kg | <b>V</b><br>mg/kg | <b>Mn</b><br>g/kg | <b>Fe</b><br>mg/kg | <b>Co</b><br>mg/kg | <b>Ga</b><br>mg/kg | <b>Ge</b><br>mg/kg | <b>Se</b><br>mg/kg | <b>Mo</b><br>mg/kg | <b>Sn</b><br>mg/kg | <b>Sb</b><br>mg/kg | <b>Tl</b><br>mg/kg | <b>Bi</b><br>mg/kg | <b>U</b><br>mg/kg |
|----------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| BSI_1_2_SURF         | 3,3               | 14,0              | 1023               | 75                | 1657              | 55                 | 10,9               | 8,7                | 32,2               | 3,6                | 0,2                | 0,16               | 1,8                | 0,9                | 0,7                | 5,7               |
| BSI_1_3_SURF         | 30,4              | 15,9              | 524                | 87                | 1327              | 61                 | 13,3               | 18,6               | 37,9               | 1,5                | 0,7                | 0,20               | 1,8                | 1,2                | 0,7                | 1,7               |
| BSI_2_1_SURF         | 35,3              | 24,8              | 264                | 134               | 1221              | 85                 | 19,8               | 29,1               | 47,5               | 2,7                | 0,4                | 0,67               | 1,6                | 1,2                | 0,6                | 2,7               |
| BSI_2_2_FOND         | 1,4               | 5,7               | 370                | 28                | 532               | 20                 | 4,8                | 4,4                | 12,2               | 1,0                | 0,1                | 0,15               | 1,8                | 1,0                | 0,8                | 1,7               |
| BSI_2_2_SURF         | 1,9               | 10,8              | 870                | 54                | 779               | 35                 | 9,1                | 7,8                | 20,2               | 1,2                | 0,1                | 0,14               | 1,7                | 0,9                | 0,6                | 0,9               |
| BSI_2_2_SURF_pARGILE | 85,3              | 122,3             | 12662              | 288               | 1790              | 287                | 82,9               | 128,4              | 171,9              | 12,5               | 36,6               | 188,7              | 166,3              | 0,1                | 0,9                | 31,5              |
| BSI_2_3_SURF         | 3,5               | 10,0              | 661                | 60                | 927               | 37                 | 7,7                | 8,3                | 23,7               | 2,9                | 3,3                | 0,08               | 1,5                | 0,8                | 0,6                | 2,4               |
| BSI_3_1_SURF         | 4,3               | 8,9               | 272                | 62                | 555               | 38                 | 7,3                | 9,4                | 22,1               | 1,7                | 0,3                | 0,12               | 1,7                | 0,9                | 0,6                | 1,5               |
| BSI_3_2_SURF         | 11,6              | 26,6              | 294                | 122               | 1087              | 79                 | 21,2               | 35,1               | 45,5               | 2,3                | 0,2                | 0,28               | 1,8                | 1,3                | 0,7                | 2,2               |
| BSI_3_3_FOND         | 2,4               | 7,5               | 640                | 39                | 547               | 24                 | 5,6                | 7,5                | 14,3               | 1,4                | 0,3                | 0,10               | 1,6                | 0,9                | 0,6                | 1,4               |
| BSI_3_3_SURF         | 2,7               | 10,6              | 570                | 51                | 807               | 34                 | 7,6                | 8,6                | 19,9               | 2,1                | 0,3                | 0,10               | 1,6                | 0,8                | 0,6                | 1,7               |
| BSI_3_3_SURF_pARGILE | 41,3              | 44,4              | 6162               | 106               | 555               | 97                 | 23,9               | 40,3               | 56,0               | 3,4                | 8,1                | 26,16              | 43,9               | 0,2                | 0,3                | 8,8               |
| BSI_4_1_SURF         | 5,5               | 8,2               | 687                | 39                | 425               | 27                 | 5,5                | 7,8                | 17,0               | 1,0                | 0,3                | 0,16               | 1,6                | 0,8                | 0,5                | 1,1               |
| BSI_4_2_FOND         | 4,8               | 9,4               | 212                | 56                | 569               | 35                 | 8,0                | 10,6               | 21,4               | 1,5                | 0,3                | 0,11               | 1,7                | 0,9                | 0,6                | 1,6               |
| BSI_4_2_SURF         | 4,8               | 10,1              | 284                | 60                | 610               | 37                 | 8,2                | 11,3               | 20,8               | 1,4                | 0,3                | 0,11               | 1,7                | 0,9                | 0,6                | 1,6               |
| BSI_4_2_SURF_pARGILE | 30,9              | 94,2              | 1577               | 208               | 1113              | 144                | 22,0               | 82,0               | 80,0               | 2,4                | 3,9                | 2,55               | 4,7                | 1,0                | 0,3                | 4,5               |
| BSI_4_3_SURF         | 2,3               | 5,8               | 577                | 41                | 318               | 22                 | 4,9                | 5,3                | 12,5               | 0,6                | 0,2                | 0,16               | 1,5                | 0,8                | 0,5                | 0,8               |
| BSI_5_1_FOND         | 1,8               | 8,6               | 883                | 59                | 664               | 36                 | 8,1                | 8,5                | 20,3               | 1,0                | 0,2                | 0,14               | 1,5                | 0,8                | 0,5                | 1,0               |
| BSI_5_1_SURF         | 2,2               | 7,7               | 827                | 49                | 568               | 30                 | 6,7                | 8,5                | 17,3               | 0,9                | 0,2                | 0,12               | 1,5                | 0,8                | 0,5                | 0,9               |

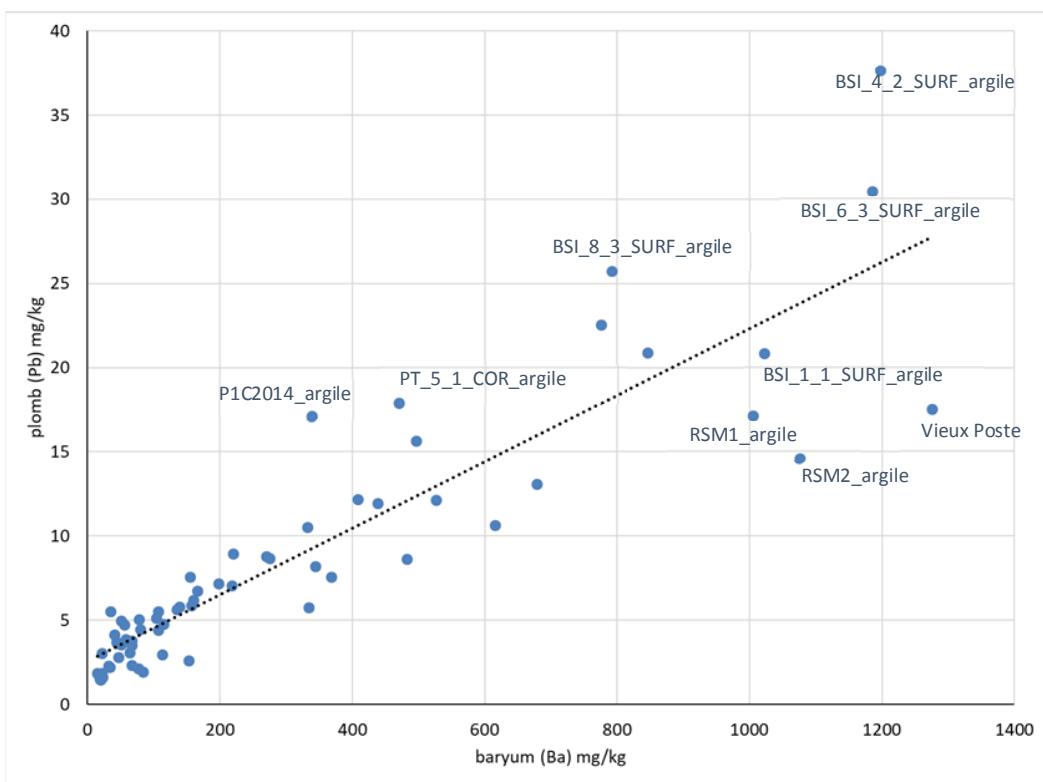
| <b>Site</b>               | <b>B</b><br>mg/kg | <b>Al</b><br>g/kg | <b>Ti</b><br>mg/kg | <b>V</b><br>mg/kg | <b>Mn</b><br>g/kg | <b>Fe</b><br>mg/kg | <b>Co</b><br>mg/kg | <b>Ga</b><br>mg/kg | <b>Ge</b><br>mg/kg | <b>Se</b><br>mg/kg | <b>Mo</b><br>mg/kg | <b>Sn</b><br>mg/kg | <b>Sb</b><br>mg/kg | <b>Tl</b><br>mg/kg | <b>Bi</b><br>mg/kg | <b>U</b><br>mg/kg |
|---------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| BSI_5_2_SURF              | 6,2               | 8,7               | 569                | 59                | 601               | 58                 | 9,4                | 11,1               | 32,9               | 1,3                | 0,3                | 0,14               | 1,6                | 0,9                | 0,6                | 1,5               |
| BSI_5_3_SURF              | 2,8               | 7,6               | 232                | 45                | 422               | 28                 | 8,0                | 12,1               | 17,3               | 0,8                | 0,1                | 0,11               | 1,5                | 0,9                | 0,5                | 1,0               |
| BSI_6_1_FOND              | 7,5               | 13,3              | 286                | 76                | 751               | 47                 | 11,0               | 15,2               | 27,0               | 1,8                | 0,2                | 0,11               | 1,7                | 1,0                | 0,6                | 1,7               |
| BSI_6_1_SURF              | 7,7               | 11,7              | 289                | 68                | 657               | 42                 | 10,0               | 14,3               | 24,2               | 1,6                | 0,2                | 0,12               | 1,7                | 1,0                | 0,6                | 1,6               |
| BSI_6_2_PROF              | 8,1               | 12,5              | 251                | 73                | 726               | 44                 | 10,3               | 14,2               | 24,8               | 1,8                | 0,2                | 0,11               | 1,6                | 0,9                | 0,6                | 1,7               |
| BSI_6_2_SURF              | 8,8               | 15,7              | 612                | 95                | 926               | 58                 | 12,7               | 17,9               | 32,6               | 2,3                | 0,3                | 0,13               | 1,7                | 1,0                | 0,6                | 2,0               |
| BSI_6_3_FOND              | 11,4              | 17,6              | 320                | 97                | 975               | 61                 | 14,5               | 20,6               | 37,9               | 2,2                | 0,4                | 0,11               | 1,5                | 1,0                | 0,6                | 2,1               |
| BSI_6_3_SURF              | 9,6               | 13,3              | 269                | 74                | 724               | 45                 | 11,0               | 17,6               | 27,8               | 1,6                | 0,2                | 0,14               | 1,7                | 1,2                | 0,6                | 1,7               |
| BSI_6_3_SURF_-<br>pARGILE | 39,0              | 91,4              | 452                | 183               | 1141              | 161                | 23,8               | 56,5               | 88,4               | 2,2                | 0,8                | 4,97               | 9,1                | 1,0                | 0,3                | 3,2               |
| BSI_7_1_PROF              | 7,4               | 11,5              | 319                | 68                | 701               | 42                 | 9,7                | 12,8               | 23,6               | 1,6                | 0,2                | 0,11               | 1,6                | 0,9                | 0,6                | 1,6               |
| BSI_7_1_SURF              | 8,2               | 12,0              | 278                | 70                | 699               | 43                 | 10,1               | 13,3               | 27,4               | 1,8                | 0,3                | 0,13               | 1,7                | 1,0                | 0,6                | 1,7               |
| BSI_7_1_SURF_-<br>pARGILE | 35,8              | 68,6              | 515                | 120               | 785               | 116                | 15,7               | 40,3               | 67,2               | 1,7                | 1,2                | 4,27               | 7,8                | 0,6                | 0,3                | 2,4               |
| BSI_7_2_SURF              | 2,6               | 6,8               | 701                | 57                | 412               | 32                 | 5,5                | 6,3                | 19,5               | 1,2                | 0,3                | 0,14               | 1,8                | 1,0                | 0,7                | 1,1               |
| BSI_7_3_SURF              | 6,8               | 9,7               | 448                | 76                | 611               | 46                 | 7,7                | 9,3                | 28,3               | 1,6                | 0,1                | 0,11               | 1,4                | 0,8                | 0,7                | 1,2               |
| BSI_8_1_SURF              | 4,4               | 8,2               | 285                | 58                | 501               | 34                 | 6,5                | 8,3                | 20,3               | 1,3                | 0,2                | 0,12               | 1,7                | 0,9                | 0,6                | 1,3               |
| BSI_8_2_SURF              | 5,8               | 9,9               | 646                | 58                | 494               | 33                 | 7,8                | 10,5               | 20,9               | 1,6                | 0,5                | 0,09               | 1,5                | 0,9                | 0,5                | 1,4               |
| BSI_8_3_FOND              | 8,7               | 10,5              | 283                | 62                | 510               | 36                 | 8,2                | 11,1               | 22,6               | 1,6                | 0,3                | 0,12               | 1,7                | 1,0                | 0,6                | 2,3               |
| BSI_8_3_SURF              | 10,2              | 14,9              | 219                | 83                | 725               | 51                 | 11,6               | 15,3               | 29,0               | 2,1                | 0,2                | 0,11               | 1,7                | 1,0                | 0,6                | 1,9               |
| BSI_8_3_SURF_-<br>pARGILE | 45,5              | 73,1              | 807                | 108               | 755               | 109                | 16,1               | 39,6               | 63,8               | 2,0                | 1,3                | 4,06               | 7,4                | 0,7                | 0,3                | 3,4               |

| <b>Site</b>                           | <b>B</b><br>mg/kg | <b>Al</b><br>g/kg | <b>Ti</b><br>mg/kg | <b>V</b><br>mg/kg | <b>Mn</b><br>g/kg | <b>Fe</b><br>mg/kg | <b>Co</b><br>mg/kg | <b>Ga</b><br>mg/kg | <b>Ge</b><br>mg/kg | <b>Se</b><br>mg/kg | <b>Mo</b><br>mg/kg | <b>Sn</b><br>mg/kg | <b>Sb</b><br>mg/kg | <b>Tl</b><br>mg/kg | <b>Bi</b><br>mg/kg | <b>U</b><br>mg/kg |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| P1C2014_pARG<br>_ILF                  | 38,0              | 51,3              | 8280               | 142               | 1078              | 159                | 22,4               | 41,9               | 95,3               | 3,9                | 4,3                | 24,19              | 40,0               | 0,3                | 0,2                | 7,8               |
| P2A2014_pARG<br>_ILF                  | 28,6              | 87,3              | 1638               | 176               | 1356              | 168                | 23,4               | 52,1               | 93,0               | 2,7                | 0,8                | 8,29               | 15,0               | 0,9                | 0,4                | 3,5               |
| P3A2014_pARG<br>_ILF                  | 25,5              | 79,1              | 854                | 142               | 965               | 117                | 21,8               | 48,5               | 65,6               | 2,5                | 0,8                | 9,52               | 17,2               | 0,6                | 0,4                | 4,0               |
| P4D2014_pARG<br>_ILF                  | 99,3              | 67,2              | 3821               | 175               | 1273              | 600                | 110,8              | 121,0              | 373,9              | 16,6               | 24,9               | 213,9              | 257,1              | NF                 | 1,0                | 47,7              |
| PT_5_1_OUEST<br>_COR                  | 5,3               | 10,6              | 328                | 70                | 663               | 45                 | 8,3                | 10,2               | 25,8               | 2,2                | 0,3                | 0,13               | 1,7                | 0,9                | 0,6                | 1,9               |
| PT_5_1_OUEST<br>_COR_pARGILE          | 43,6              | 80,6              | 2780               | 118               | 802               | 129                | 18,6               | 41,2               | 77,1               | 2,2                | 1,9                | 7,83               | 13,9               | 0,6                | 0,5                | 3,6               |
| PT_5_2_EST_G<br>_R_BOULE              | 3,8               | 10,6              | 717                | 77                | 588               | 47                 | 10,4               | 10,0               | 29,7               | 1,3                | 0,4                | 0,11               | 1,6                | 0,8                | 0,6                | 1,1               |
| PT_5_2_EST_G<br>_R_BOULE_pARG<br>_ILF | 50,6              | 87,5              | 2017               | 107               | 823               | 105                | 20,1               | 41,5               | 61,6               | 3,0                | 0,9                | 10,67              | 18,7               | 0,5                | 0,5                | 4,1               |
| PTRP1_FOND                            | 1,4               | 4,2               | 448                | 16                | 246               | 14                 | 3,0                | 3,6                | 8,2                | 0,5                | 0,2                | 0,25               | 1,5                | 0,7                | 0,5                | 0,7               |
| PTRP1_SURF                            | 1,6               | 4,2               | 467                | 15                | 238               | 14                 | 3,4                | 3,9                | 7,7                | 0,5                | 0,2                | 0,29               | 1,5                | 0,7                | 0,5                | 2,6               |
| PTRP2_FOND                            | 1,4               | 4,7               | 619                | 16                | 250               | 16                 | 4,9                | 4,2                | 9,5                | 0,6                | 0,2                | 0,31               | 1,7                | 0,8                | 0,6                | 0,8               |
| PTRP2_SURF                            | 1,5               | 2,8               | 291                | 9                 | 114               | 9                  | 2,3                | 3,4                | 4,7                | 0,4                | 0,1                | 0,25               | 1,6                | 0,8                | 0,5                | 0,7               |
| PTRP3_FOND                            | 1,5               | 4,0               | 499                | 19                | 240               | 19                 | 3,3                | 4,2                | 10,7               | 0,6                | 0,3                | 0,27               | 1,5                | 0,7                | 0,5                | 0,7               |
| PTRP3_SURF                            | 1,8               | 3,4               | 307                | 13                | 170               | 13                 | 2,6                | 3,4                | 7,1                | 0,5                | 0,3                | 0,28               | 1,5                | 0,7                | 0,5                | 0,8               |
| RSM2                                  | 2,2               | 25,8              | 289                | 106               | 1129              | 76                 | 22,0               | 34,7               | 39,9               | 2,0                | 0,1                | 0,12               | 1,6                | 1,1                | 0,6                | 1,9               |
| RSM1                                  | 2,2               | 21,1              | 300                | 84                | 860               | 62                 | 18,0               | 25,2               | 32,0               | 1,6                | 0,11               | 1,6                | 1,0                | 0,6                | 2,2                |                   |

|    | Li    | Be    | B     | Na   | Mg    | Al    | K     | Ca   | Ti   | V     | Cr    | Mn   | Fe    | Co    | Ni    | Cu    | Zn    | Ga    | Ge    | As    | Se    | Rb   | Sr   | Mn    | Cl    | Sn    | Sb    | Cs    | Ba   | Hg    | Tl    | Pb   | Bi   | U |
|----|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|---|
| Li | 1,00  |       |       |      |       |       |       |      |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Be | 0,79  | 1,00  |       |      |       |       |       |      |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| B  | 0,63  | 0,89  | 1,00  |      |       |       |       |      |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Na | 0,16  | 0,29  | 0,34  | 1,00 |       |       |       |      |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Mg | 0,91  | 0,87  | 0,65  | 0,32 | 1,00  |       |       |      |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Al | 0,89  | 0,91  | 0,76  | 0,09 | 0,93  | 1,00  |       |      |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| K  | 0,92  | 0,86  | 0,65  | 0,25 | 0,99  | 0,94  | 1,00  |      |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Ca | 0,19  | 0,35  | 0,15  | 0,50 | 0,38  | 0,21  | 0,39  | 1,00 |      |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Ti | 0,24  | 0,54  | 0,65  | 0,05 | 0,29  | 0,47  | 0,29  | 0,08 | 1,00 |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| V  | 0,76  | 0,89  | 0,73  | 0,37 | 0,86  | 0,82  | 0,82  | 0,53 | 0,52 | 1,00  |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Cr | 0,50  | 0,84  | 0,16  | 0,56 | 0,67  | 0,55  | 0,13  | 0,63 | 0,70 | 1,00  |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Mn | 0,52  | 0,68  | 0,53  | 0,53 | 0,70  | 0,53  | 0,62  | 0,64 | 0,39 | 0,48  | 1,00  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Fe | 0,52  | 0,86  | 0,85  | 0,18 | 0,59  | 0,67  | 0,56  | 0,21 | 0,51 | 0,74  | 0,95  | 0,55 | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Co | 0,49  | 0,83  | 0,86  | 0,24 | 0,57  | 0,63  | 0,54  | 0,22 | 0,62 | 0,72  | 0,97  | 0,56 | 0,95  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Ni | 0,52  | 0,84  | 0,89  | 0,16 | 0,58  | 0,68  | 0,57  | 0,12 | 0,61 | 0,69  | 1,00  | 0,47 | 0,95  | 0,97  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Cu | 0,49  | 0,81  | 0,85  | 0,19 | 0,57  | 0,67  | 0,55  | 0,15 | 0,78 | 0,70  | 0,94  | 0,48 | 0,85  | 0,94  | 0,93  | 1,00  |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Zn | 0,81  | 0,95  | 0,93  | 0,31 | 0,91  | 0,90  | 0,33  | 0,56 | 0,90 | 0,81  | 0,69  | 0,80 | 0,82  | 0,82  | 0,84  | 1,00  |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Ga | 0,83  | 0,93  | 0,19  | 0,87 | 0,90  | 0,86  | 0,23  | 0,55 | 0,86 | 0,86  | 0,61  | 0,85 | 0,86  | 0,86  | 0,97  | 1,00  |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Ge | 0,49  | 0,84  | 0,85  | 0,18 | 0,55  | 0,64  | 0,53  | 0,19 | 0,51 | 0,71  | 0,95  | 0,53 | 1,00  | 0,95  | 0,95  | 0,85  | 0,77  | 0,83  | 1,00  |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| As | 0,58  | 0,84  | 0,93  | 0,40 | 0,62  | 0,72  | 0,62  | 0,20 | 0,69 | 0,73  | 0,77  | 0,59 | 0,74  | 0,76  | 0,77  | 0,75  | 0,77  | 0,73  | 0,74  | 1,00  |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Se | 0,25  | 0,70  | 0,76  | 0,20 | 0,34  | 0,45  | 0,30  | 0,26 | 0,65 | 0,62  | 0,90  | 0,49 | 0,89  | 0,92  | 0,88  | 0,87  | 0,64  | 0,68  | 0,90  | 0,67  | 1,00  |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Rb | 0,90  | 0,85  | 0,66  | 0,23 | 0,97  | 0,90  | 0,97  | 0,25 | 0,81 | 0,81  | 0,61  | 0,62 | 0,64  | 0,62  | 0,63  | 0,59  | 0,92  | 0,89  | 0,61  | 0,59  | 0,36  | 1,00 |      |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Sr | 0,35  | 0,55  | 0,49  | 0,44 | 0,46  | 0,39  | 0,41  | 0,50 | 0,31 | 0,57  | 0,47  | 0,54 | 0,48  | 0,53  | 0,47  | 0,46  | 0,52  | 0,49  | 0,48  | 0,49  | 0,44  | 0,42 | 1,00 |       |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Mo | 0,28  | 0,62  | 0,74  | 0,12 | 0,32  | 0,46  | 0,30  | 0,08 | 0,82 | 0,55  | 0,84  | 0,34 | 0,73  | 0,36  | 0,83  | 0,93  | 0,64  | 0,68  | 0,74  | 0,67  | 0,88  | 0,35 | 0,40 | 1,00  |       |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Cd | 0,23  | 0,55  | 0,78  | 0,10 | 0,29  | 0,43  | 0,27  | 0,04 | 0,67 | 0,50  | 0,93  | 0,32 | 0,88  | 0,94  | 0,92  | 0,90  | 0,62  | 0,69  | 0,90  | 0,67  | 0,94  | 0,35 | 0,39 | 0,91  | 1,00  |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Sn | 0,24  | 0,64  | 0,76  | 0,10 | 0,29  | 0,43  | 0,27  | 0,05 | 0,71 | 0,50  | 0,90  | 0,32 | 0,83  | 0,92  | 0,89  | 0,92  | 0,62  | 0,69  | 0,85  | 0,66  | 0,93  | 0,34 | 0,40 | 0,96  | 0,99  | 1,00  |       |       |      |       |       |      |      |   |
| Sb | 0,23  | 0,64  | 0,78  | 0,08 | 0,27  | 0,42  | 0,26  | 0,02 | 0,67 | 0,48  | 0,93  | 0,30 | 0,87  | 0,93  | 0,92  | 0,90  | 0,61  | 0,68  | 0,89  | 0,66  | 0,94  | 0,34 | 0,38 | 0,91  | 1,00  | 0,99  | 1,00  |       |      |       |       |      |      |   |
| G  | 0,30  | 0,70  | 0,82  | 0,10 | 0,35  | 0,49  | 0,34  | 0,04 | 0,67 | 0,54  | 0,95  | 0,35 | 0,90  | 0,95  | 0,92  | 0,92  | 0,67  | 0,74  | 0,92  | 0,70  | 0,94  | 0,42 | 0,41 | 0,91  | 1,00  | 0,98  | 1,00  |       |      |       |       |      |      |   |
| Ba | 0,94  | 0,77  | 0,55  | 0,16 | 0,95  | 0,89  | 0,97  | 0,23 | 0,17 | 0,76  | 0,45  | 0,54 | 0,49  | 0,45  | 0,45  | 0,83  | 0,81  | 0,66  | 0,49  | 0,19  | 0,97  | 0,34 | 0,20 | 0,17  | 0,17  | 0,16  | 0,24  | 1,00  |      |       |       |      |      |   |
| Hg | 0,17  | 0,57  | 0,71  | 0,04 | 0,19  | 0,32  | 0,18  | 0,04 | 0,44 | 0,35  | 0,88  | 0,22 | 0,87  | 0,88  | 0,88  | 0,76  | 0,49  | 0,59  | 0,89  | 0,56  | 0,87  | 0,29 | 0,32 | 0,74  | 0,94  | 0,89  | 0,94  | 0,10  | 1,00 |       |       |      |      |   |
| Tl | -0,01 | -0,18 | -0,32 | 0,39 | 0,05  | -0,27 | 0,01  | 0,23 | 0,63 | -0,05 | -0,38 | 0,25 | -0,24 | -0,22 | -0,36 | -0,41 | -0,11 | -0,16 | -0,45 | -0,29 | -0,41 | 0,08 | 0,08 | -0,49 | -0,53 | -0,49 | -0,55 | -0,51 | 0,06 | -0,58 | 1,00  |      |      |   |
| Pb | 0,88  | 0,76  | 0,62  | 0,24 | 0,87  | 0,84  | 0,88  | 0,26 | 0,31 | 0,78  | 0,42  | 0,35 | 0,46  | 0,42  | 0,44  | 0,43  | 0,78  | 0,73  | 0,43  | 0,60  | 0,22  | 0,87 | 0,37 | 0,25  | 0,17  | 0,17  | 0,16  | 0,24  | 0,90 | 0,08  | -0,01 | 1,00 |      |   |
| Bi | -0,36 | -0,12 | 0,04  | 0,30 | -0,30 | -0,38 | -0,35 | 0,16 | 0,08 | 0,13  | 0,13  | 0,07 | 0,22  | 0,12  | 0,15  | -0,13 | -0,14 | 0,09  | 0,06  | 0,29  | -0,31 | 0,18 | 0,31 | 0,30  | 0,33  | 0,29  | 0,26  | 0,45  | 0,29 | 0,44  | -0,35 | 1,00 |      |   |
| U  | 0,24  | 0,66  | 0,77  | 0,11 | 0,29  | 0,43  | 0,27  | 0,08 | 0,66 | 0,53  | 0,93  | 0,37 | 0,89  | 0,94  | 0,92  | 0,89  | 0,62  | 0,69  | 0,91  | 0,66  | 0,97  | 0,35 | 0,39 | 0,91  | 0,99  | 0,98  | 0,99  | 0,17  | 0,93 | -0,49 | 0,19  | 0,31 | 1,00 |   |

Figure 4-14 : Matrice de corrélation de l'ensemble des éléments quantifiés pour les échantillons de la campagne de 2016, incluant la fraction argile des échantillons P1C, P2A, P3A et P4D de 2014

Le critère de surveillance est  $r > 0,8$ .



*Figure 4-15 : Relation entre la concentration en plomb et la concentration en baryum, pour tous les échantillons analysés de la campagne de 2016, incluant la fraction argile des échantillons P1C, P2A, P3A et P4D de 2014  
Les concentrations sont exprimées en mg/kg de poids sec.*

La covariance linéaire du plomb avec le baryum est évidente ( $r = 0,90$ ), mais avec une dispersion des valeurs aux concentrations élevées observées dans la fraction argileuse des échantillons. On remarque que les échantillons d'argiles postglaciaires (RSM1, RSM2 et Vieux Poste) sont « appauvris » en plomb relativement aux échantillons de la baie de Sept-Îles, pour une concentration comparable de baryum. Si on retire ces trois points du graphique, nous obtenons un coefficient de corrélation entre le plomb et le baryum plus grand que 0,90. Une autre source que les argiles de référence serait donc responsable de la présence du plomb pour certains sites, ce que met en évidence le facteur d'enrichissement du plomb pour la fraction argile des échantillons de sédiment de surface BSI\_4\_2, BSI\_6\_3, BSI\_7\_1 et BSI\_8\_3 (tableau 4-11). Cependant, les valeurs de FE correspondent à un enrichissement mineur.

#### 4.2.3.2.1 Facteurs d'enrichissement de l'ensemble des métaux et métalloïdes

Le calcul du facteur d'enrichissement, référencé à partir des argiles postglaciaires prélevées en 2016, a été appliqué à tous les métaux et métalloïdes pour tous les échantillons des campagnes 2014 et 2016.

Pour les échantillons de 2014, seul un enrichissement modérément sévère (FE entre 5-10) est observé, pour trois éléments :

- manganèse (P1C et P2E),
- l'arsenic (R2A, R3D, R3E) et le
- mercure (P1A).

Pour les échantillons de la campagne de 2016, incluant la fraction argile des échantillons P1C, P2A, P3A et P4C de 2014, les valeurs de FE dans l'intervalle 5-10 sont plus fréquentes et vont jusqu'à l'enrichissement extrêmement sévère et sont rapportées au tableau 4-16.

Pour simplifier l'interprétation, nous avons considéré seulement les éléments dont le FE dépasse l'enrichissement modérément sévère ( $>5$ ) au moins une fois, en incluant à nouveau les trois éléments avec critères établis pour la qualité du sédiment (discutés aux sections 4.3.3.1.4 et 4.3.3.1.5) qui ont dépassé  $FE > 5$ , soit l'arsenic, le cadmium et le mercure.

*Tableau 4-16 : Facteurs d'enrichissement des échantillons de sédiment de la campagne 2016 et 2014, pour les éléments ayant dépassé le seuil de  $FE= 5$  (enrichissement modérément sévère) au moins une fois*

| Site                 | Ti   | As   | Mo   | Cd  | Sn   | Sb   | Hg   | Tl  | U   |
|----------------------|------|------|------|-----|------|------|------|-----|-----|
| BM_2_2_SURF          | 2,9  | 0,9  | 0,7  | 0,6 | 0,0  | 0,2  | 0,1  | 0,9 | 2,5 |
| BM_3_1_SURF          | 3,5  | 1,3  | 1,2  | 1,0 | 0,8  | 0,8  | 0,4  | 0,4 | 2,6 |
| BM_5_1_SURF          | 16,1 | 6,6  | 5,4  | 1,4 | 0,7  | 1,5  | 0,7  | 5,2 | 3,3 |
| BPC_4_2_SURF         | 14,4 | 5,7  | 6,5  | 3,9 | 4,3  | 3,9  | 3,0  | 1,8 | 3,1 |
| BPC_5_2_SURF         | 1,7  | 1,8  | 1,0  | 1,1 | 0,1  | 0,6  | 0,2  | 2,8 | 2,0 |
| BPC_8_3_SURF         | 10,9 | 4,1  | 2,3  | 1,5 | 0,2  | 1,3  | 0,6  | 4,7 | 2,6 |
| BSI_1_1_FOND         | 1,4  | 9,1  | 1,2  | 0,8 | 0,1  | 0,3  | 1,1  | 1,6 | 1,4 |
| BSI_1_1_SURF         | 2,0  | 15,9 | 2,2  | 0,9 | 0,1  | 0,4  | 0,8  | 2,1 | 1,4 |
| BSI_1_1_SURF_pARGILE | 1,0  | 9,5  | 0,9  | 0,6 | 0,6  | 0,5  | 1,6  | 1,0 | 0,7 |
| BSI_1_2_SURF         | 9,5  | 2,1  | 1,8  | 1,6 | 0,1  | 0,7  | 0,4  | 2,6 | 6,2 |
| BSI_1_3_SURF         | 4,4  | 13,8 | 4,9  | 1,1 | 0,1  | 0,6  | 1,4  | 3,0 | 1,6 |
| BSI_2_1_SURF         | 1,6  | 7,1  | 2,2  | 1,2 | 0,3  | 0,4  | 0,8  | 2,1 | 1,9 |
| BSI_2_2_FOND         | 9,4  | 2,4  | 3,1  | 2,0 | 0,3  | 2,0  | 8,0  | 7,4 | 5,0 |
| BSI_2_2_SURF         | 12,8 | 2,0  | 1,8  | 1,4 | 0,2  | 1,1  | 0,6  | 3,9 | 1,5 |
| BSI_2_2_SURF_pARGILE | 22,6 | 8,3  | 56,5 | 9,5 | 25,6 | 12,5 | 18,1 | 0,1 | 6,6 |
| BSI_2_3_SURF         | 9,1  | 2,7  | 39,6 | 2,2 | 0,1  | 0,9  | 0,8  | 3,4 | 3,8 |
| BSI_3_1_SURF         | 3,7  | 3,7  | 3,5  | 1,4 | 0,1  | 0,9  | 1,0  | 3,6 | 2,4 |
| BSI_3_2_SURF         | 1,9  | 4,7  | 1,2  | 1,0 | 0,1  | 0,5  | 1,0  | 2,6 | 1,7 |
| BSI_3_3_FOND         | 13,5 | 3,3  | 4,9  | 1,8 | 0,2  | 1,4  | 0,5  | 5,4 | 3,3 |
| BSI_3_3_SURF         | 8,7  | 3,4  | 3,6  | 1,7 | 0,1  | 1,0  | 0,5  | 3,8 | 3,0 |
| BSI_3_3_SURF_pARGILE | 32,6 | 9,5  | 36,9 | 7,4 | 10,5 | 9,8  | 22,2 | 0,3 | 5,5 |
| BSI_4_1_SURF         | 12,9 | 5,9  | 4,6  | 1,6 | 0,2  | 1,2  | 1,0  | 4,6 | 2,3 |
| BSI_4_2_FOND         | 3,1  | 4,3  | 3,9  | 1,5 | 0,1  | 1,0  | 1,1  | 4,0 | 2,7 |
| BSI_4_2_SURF         | 3,9  | 4,7  | 3,1  | 1,7 | 0,1  | 1,0  | 0,7  | 3,8 | 2,6 |
| BSI_4_2_SURF_pARGILE | 5,6  | 4,2  | 11,9 | 0,8 | 0,7  | 0,7  | 2,0  | 1,1 | 1,9 |
| BSI_4_3_SURF         | 13,5 | 3,0  | 3,4  | 1,4 | 0,3  | 1,5  | 0,7  | 5,3 | 2,3 |
| BSI_5_1 FOND         | 12,5 | 1,3  | 2,0  | 1,2 | 0,1  | 0,9  | 0,3  | 3,3 | 1,7 |

| Site                        | Ti   | As   | Mo   | Cd  | Sn   | Sb  | Hg   | Tl   | U    |
|-----------------------------|------|------|------|-----|------|-----|------|------|------|
| BSI_5_1_SURF                | 14,2 | 1,6  | 2,6  | 1,3 | 0,2  | 1,1 | 0,8  | 4,2  | 1,8  |
| BSI_5_2_SURF                | 5,1  | 3,6  | 2,7  | 0,9 | 0,1  | 0,6 | 0,5  | 2,5  | 1,5  |
| BSI_5_3_SURF                | 4,2  | 4,7  | 1,8  | 1,2 | 0,1  | 1,2 | 1,3  | 4,9  | 2,0  |
| BSI_6_1_FOND                | 3,1  | 4,6  | 2,1  | 1,3 | 0,1  | 0,8 | 0,9  | 3,3  | 2,2  |
| BSI_6_1_SURF                | 3,5  | 4,0  | 2,0  | 1,2 | 0,1  | 0,9 | 1,2  | 3,6  | 2,2  |
| BSI_6_2_PROF                | 2,9  | 5,1  | 2,5  | 1,3 | 0,1  | 0,8 | 0,7  | 3,2  | 2,3  |
| BSI_6_2_SURF                | 5,4  | 6,9  | 2,6  | 1,2 | 0,1  | 0,6 | 0,7  | 2,6  | 2,1  |
| BSI_6_3_FOND                | 2,7  | 3,7  | 3,2  | 1,2 | 0,1  | 0,5 | 1,3  | 2,6  | 2,0  |
| BSI_6_3_SURF                | 3,0  | 4,1  | 2,1  | 1,3 | 0,1  | 0,8 | 4,5  | 4,0  | 2,2  |
| BSI_6_3_SURF_pARGILE        | 1,4  | 7,0  | 2,1  | 1,1 | 1,2  | 1,2 | 1,2  | 0,9  | 1,2  |
| BSI_7_1_PROF                | 3,9  | 5,5  | 2,1  | 1,3 | 0,1  | 0,8 | 0,7  | 3,3  | 2,3  |
| BSI_7_1_SURF                | 3,3  | 4,2  | 2,7  | 1,3 | 0,1  | 0,8 | 1,5  | 3,7  | 2,3  |
| BSI_7_1_SURF_pARGILE        | 2,3  | 6,2  | 4,7  | 1,2 | 1,4  | 1,4 | 4,5  | 0,8  | 1,3  |
| BSI_7_2_SURF                | 11,4 | 4,1  | 3,7  | 1,2 | 0,2  | 1,3 | 2,6  | 4,7  | 2,1  |
| BSI_7_3_SURF                | 5,0  | 2,8  | 1,3  | 1,1 | 0,1  | 0,7 | 1,2  | 2,7  | 1,5  |
| BSI_8_1_SURF                | 4,3  | 3,3  | 2,2  | 1,4 | 0,1  | 1,0 | 1,3  | 3,9  | 2,3  |
| BSI_8_2_SURF                | 10,0 | 4,0  | 6,5  | 1,3 | 0,1  | 1,0 | 1,8  | 4,2  | 2,6  |
| BSI_8_3_FOND                | 4,0  | 6,5  | 3,6  | 1,3 | 0,1  | 1,0 | 1,6  | 4,1  | 3,9  |
| BSI_8_3_SURF                | 2,2  | 5,5  | 2,0  | 1,4 | 0,1  | 0,7 | 0,9  | 2,9  | 2,2  |
| BSI_8_3_SURF_pARGILE        | 3,8  | 7,6  | 5,1  | 1,3 | 1,4  | 1,5 | 4,5  | 1,0  | 1,9  |
| P1C2014_pARGILE             | 26,6 | 9,6  | 12,0 | 4,1 | 5,9  | 5,4 | 7,1  | 0,3  | 2,9  |
| P2A2014_pARGILE             | 5,0  | 7,4  | 2,0  | 1,6 | 1,9  | 1,9 | 1,4  | 0,9  | 1,3  |
| P3A2014_pARGILE             | 3,7  | 6,0  | 3,0  | 2,6 | 3,2  | 3,2 | 5,1  | 0,9  | 2,0  |
| P4D2014_pARGILE             | 3,3  | 3,3  | 18,4 | 6,9 | 13,9 | 9,2 | 32,1 | nd   | 4,8  |
| PT_5_1_OUEST_COR            | 3,7  | 3,7  | 2,6  | 1,4 | 0,1  | 0,8 | 0,6  | 3,1  | 2,5  |
| PT_5_1_OUEST_COR_pARGILE    | 11,0 | 9,8  | 6,7  | 2,0 | 2,4  | 2,3 | 20,7 | 0,7  | 1,7  |
| PT_5_2_EST_GR_BOULE         | 7,8  | 3,7  | 3,7  | 0,9 | 0,1  | 0,7 | 1,2  | 2,7  | 1,4  |
| PT_5_2_EST_GR_BOULE_pARGILE | 9,8  | 14,2 | 3,8  | 3,2 | 3,9  | 3,8 | 9,6  | 0,8  | 2,4  |
| PTRP1 FOND                  | 15,9 | 0,5  | 6,4  | 2,1 | 0,7  | 2,2 | 0,7  | 7,5  | 2,9  |
| PTRP1 SURF                  | 16,6 | 0,6  | 5,5  | 2,1 | 0,8  | 2,3 | 7,4  | 7,8  | 10,8 |
| PTRP2 FOND                  | 19,3 | 0,8  | 5,2  | 2,2 | 0,7  | 2,3 | 0,5  | 7,6  | 3,1  |
| PTRP2 SURF                  | 17,1 | 0,5  | 7,6  | 2,8 | 1,1  | 4,0 | 1,8  | 13,3 | 5,0  |
| PTRP3 FOND                  | 13,5 | 0,5  | 5,9  | 1,7 | 0,6  | 1,7 | 0,5  | 5,7  | 2,3  |
| PTRP3 SURF                  | 12,1 | 1,0  | 9,8  | 2,5 | 0,8  | 2,6 | 1,9  | 8,6  | 3,6  |

Il ressort de ce tableau que les FE élevés dans leur fraction argile, pour cinq éléments ou plus, désignent les sites BSI\_2\_2, BSI\_3\_3, P1C et P4D comme sites fortement impactés par un enrichissement. L'analyse minéralogique de la fraction argileuse de ces quatre sites montrait une composition différente des argiles des autres sites, par un rapport illite/chlorite+kaolinite plus faible (tableau 4-1 et figure 4-7). D'autres sources que les argiles postglaciaires, anthropiques ou naturelles, de cette suite d'éléments (Ti, Mo, As, Cd, Sn, Sb et Hg) alimentent la matière particulaire fine de ces sites. C'est le titane qui a la fréquence de dépassement du seuil FE>5 la plus élevée avec 44 % des échantillons (27/61), suivi de l'arsenic avec 31 % (19/61) et du molybdène avec 20 % des échantillons (12/61). Le titane n'est pas un métal ayant des critères établis de la qualité des sédiments marins; il est présent dans de nombreuses formations géologiques, souvent avec le fer. Cependant, la corrélation linéaire du titane avec le fer dans nos échantillons est plutôt faible, avec un  $r = 0,51$  (figure 4-14). Dans leur étude de 1968, Loring et Nota ont associé le titane dans le sédiment du golfe St-Laurent à la déposition de minéraux détritiques (issus de l'érosion des roches terrestres), sans influence environnementale, c'est-à-dire que sa concentration ne dépend pas de réactions chimiques dans le sédiment. Ces réactions d'oxydo-réduction dépendent de la concentration d'oxygène dans les eaux interstitielles (entre les grains du sédiment), le manganèse et le fer y sont très sensibles; ces métaux précipitent sous formes d'oxydes en milieu oxygéné.

#### 4.2.3.2.2 Composés organiques de l'étain et du plomb

Le facteur d'enrichissement pour l'étain permet de distinguer quatre échantillons avec des concentrations importantes de ce métal, tous de la fraction argile, dont la valeur est supérieure à 5 : BSI\_2\_2\_pArgile, BSI\_3\_3\_pArgile, P1C2014\_pArgile et P4D2014\_pArgile (tableau 4-16). Dans une zone portuaire, un apport possible d'étain à l'environnement est le biocide tributylétain (de son acronyme anglais TBT), utilisé dans la peinture de la coque des navires jusqu'en 2008.

Ce composé est maintenant interdit en raison de sa toxicité pour la faune marine. Il est reconnu que sa présence dans les sédiments, en raison de son utilisation passée, peut persister plusieurs années, surtout en eau froide malgré que l'action bactérienne puisse dégrader le TBT en dibutylétain, monobutylétain et ultimement en étain inorganique par perte successive du groupement butyle  $C_4H_9$  (figure 4-16) et donc réduire la toxicité globale associée à ce biocide.

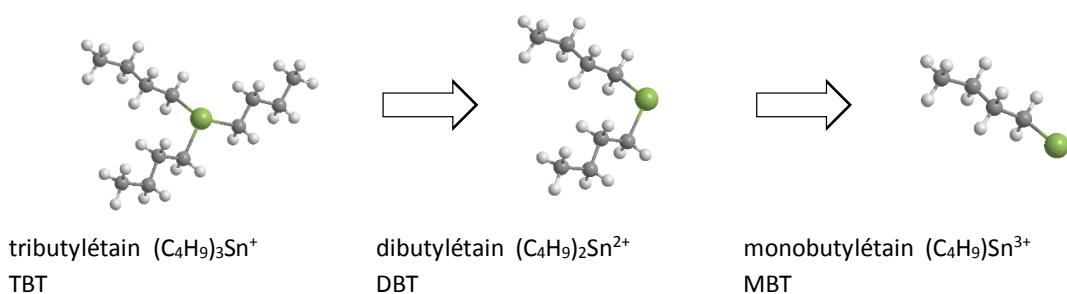


Figure 4-16 : Schéma de la dégradation du tributylétain par la perte successive d'un groupe butyle

Il est donc important de mesurer le TBT et ses produits de dégradation pour rendre compte de l'état de pollution du milieu.

Le calcul du rapport de la concentration du TBT sur celle du DBT nous indique deux choses : la capacité de l'écosystème à la dégradation du biocide et l'historique de l'apport du TBT. Ainsi, un rapport TBT/DBT élevé dans les sédiments peut révéler un faible taux de dégradation du TBT et/ou un apport récent du contaminant.

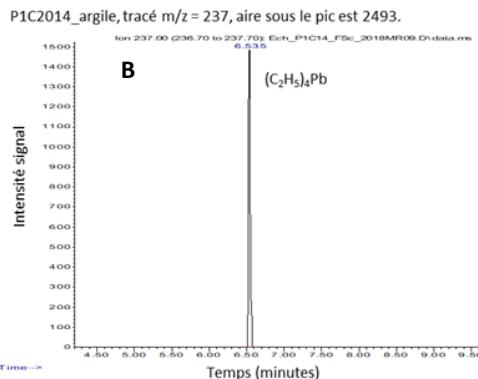
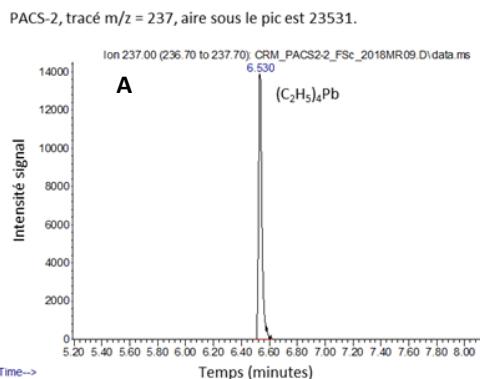
Nous avons fait l'analyse du tributylétain et de ses produits de dégradation, dans les quatre échantillons enrichis en étain total et de l'échantillon PT\_5\_2\_EST\_GR\_BOULE\_pArgile pour comparaison.

Aucun des composés organiques de l'étain ciblés n'a été détecté dans ces échantillons, comme lors des analyses des échantillons de 2013. Ce n'est pas un artefact analytique puisque l'analyse du matériel certifié PACS-2 (Conseil National de Recherche du Canada, sédiment provenant du port d'Esquimalt, Colombie-Britannique), pour valider notre méthode, a permis de quantifier les trois composés de l'étain. L'étain extractible que nous avons mesuré à des concentrations élevées, dans la fraction argileuse de nos échantillons, est donc de nature inorganique.

En revanche, lors de l'analyse du TBT et de ses dérivés, nous avons détecté dans tous les échantillons la présence d'un composé organique de plomb, qui pourrait être du tétraéthyle de plomb (ou tétraéthylplomb,  $(C_2H_5)_4Pb$ ). Ce composé n'est pas sur la liste des contaminants du sédiment de référence PACS-2, même si la concentration certifiée du plomb est élevée à 183 mg/kg. Cependant, nous avons détecté le  $(C_2H_5)_4Pb$  avec un signal intense à un temps de rétention de 6,5 minutes dans le chromatogramme, lors de la validation de notre méthode d'analyse pour les organoétains avec le PACS-2, et le spectre de masse a permis d'identifier avec certitude le tétraéthylplomb, par comparaison automatisée avec la librairie de spectres de masse de l'instrument analytique (figure 4-17). La présence du  $(C_2H_5)_4Pb$  dans nos cinq échantillons a pu ainsi être confirmée.

Le tétraéthylplomb est un composé dont la toxicité est reconnue ; chez l'humain, ses effets nocifs sont observés sur le système nerveux central et les enfants sont particulièrement sensibles à l'exposition au tétraéthylplomb qui affecte leur développement moteur et cognitif. Comme tout composé organométallique, le tétraéthylplomb a un caractère hydrophobe qui favorise son accumulation dans les organes riches en lipides des espèces aquatiques et sa bioamplification dans le réseau trophique. Par le passé, il a été surtout utilisé comme agent antidetonant dans les carburants (essences au plomb), cette utilisation à l'échelle de la planète a entraîné une contamination généralisée de l'environnement par le plomb, en particulier dans les zones urbaines. Les essences au plomb sont maintenant interdites dans la grande majorité des pays. Au Canada, le carburant au plomb est cependant permis pour certains types de moteur, entre autres pour les petits avions (carburant AVGAS 100LL).

La présence du tétraéthylplomb dans nos échantillons de sédiment de surface est quelque peu surprenante, mais la contamination peut être historique comme il a été démontré récemment dans une enquête environnementale en France, menée sur l'ensemble du pays (Cavalheiro *et al.*, 2016). Selon cette étude, le principal produit de dégradation du tétraéthylplomb, le diéthylplomb, est présent dans le sédiment de plans d'eau près des zones urbaines, quoique à de faibles concentrations de l'ordre du nanogramme par gramme. Les essences au plomb ont été bannies en France dans les années 1990.



### PACS-2

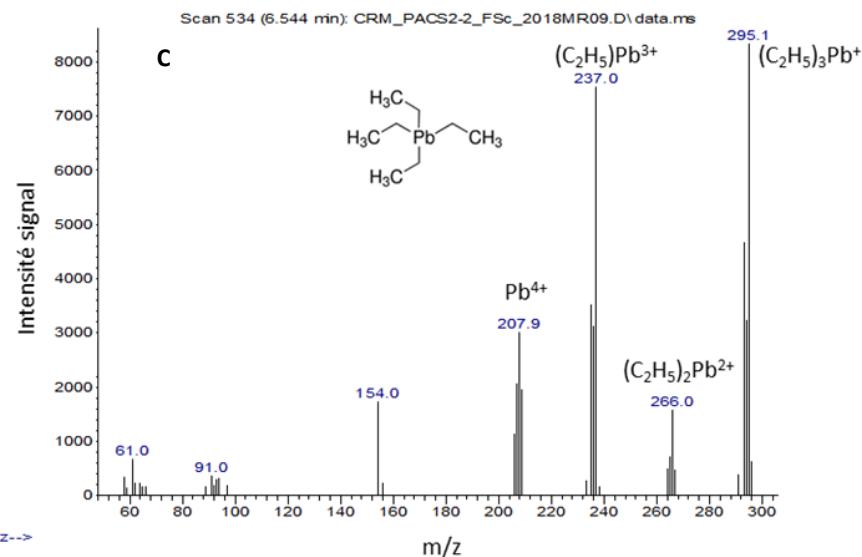


Figure 4-17 : Identification du tétraéthylplomb ( $\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{Pb}$ ) par chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse. A) chromatogramme obtenu de l'analyse de l'extrait du sédiment de référence PACS-2; B) chromatogramme obtenu de l'analyse de l'extrait de la fraction argileuse du sédiment P1C2014; C) spectre de masse du composé apparaissant à 6,5 minutes dans les chromatogrammes A et C, identifié comme étant le tétraéthylplomb par la recherche de la librairie de spectres de masse de l'instrument analytique

Notre analyse du ( $\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{Pb}$ ) est qualitative puisque nous n'avions pas de standard du composé pour faire une analyse quantitative. En comparant, entre les échantillons, l'intensité du signal brut issu de la détection du ( $\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{Pb}$ ) par spectrométrie de masse, nous obtenons l'ordre croissant de l'importance de la présence du tétraéthylplomb dans la fraction argileuse des échantillons (intensité du signal en unité arbitraire, concentration de plomb extractible en mg/kg): PT5\_2\_EST-GR\_BOULE (561, 11.9) < BSI\_2\_2 (767, 22.5) < BSI\_3\_3 (866, 8.7) < P1C (2493, 17.1) < P4C (2691, 5.8). On constate que ce composé est plus concentré aux sites P1C et P4D, mais qu'il est également présent dans le sédiment au site de l'île Corossol. Le nombre de résultats est très petit, on ne peut pas dire si ce composé est présent partout dans la baie de Sept-Îles, avec un gradient de concentration qui diminuerait vers l'extérieur de la baie. La présence du ( $\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{Pb}$ ) ne semble pas varier linéairement

avec la concentration totale de plomb extractible, le signal le plus intense est 2 691 pour l'échantillon P4D qui a la plus basse concentration en plomb (5,8 mg/kg) de nos cinq échantillons. Par comparaison, le  $(C_2H_5)_4Pb$  extrait du sédiment certifié PACS-2 a produit un signal d'une intensité de 23 531, environ dix fois plus élevé que le signal obtenu pour l'échantillon P4D, pour une concentration certifiée en plomb de 183 mg/kg qui est près de trente fois plus importante que celle de la fraction argileuse du site P4D. Ce constat implique que le plomb peut exister sous des formes différentes dans le sédiment, provenant de sources différentes et nécessairement anthropique pour le tétraéthylplomb et ses produits de dégradation.

Notre méthode analytique pour les composés organométalliques ne permet pas de déterminer si les produits de dégradation du  $(C_2H_5)_4Pb$  sont présents dans le sédiment, et ainsi estimer si les apports de tétraéthylplomb sont récents. L'étape qui suit l'extraction des composés organométalliques est de convertir les composés organométalliques ioniques (comme le diéthylplomb,  $(C_2H_5)_2Pb^{2+}$ ) en composés organométalliques neutres, analysables par la méthode de chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse. Cette conversion chimique, nommée éthylation, consiste à ajouter un groupe éthyle ( $C_2H_5$ ) pour chaque charge positive libre sur le noyau métallique, par réaction avec le tétraéthylborate de sodium. Le diéthylplomb est ainsi converti en tétraéthylplomb et si le triéthylplomb est présent, il sera également converti en tétraéthylplomb. Ainsi, à l'analyse, un seul composé organique du plomb sera détecté. Il y a aussi la possibilité qu'une forme inorganique du plomb présent dans le sédiment, qui doit porter quatre charges positives ( $Pb^{4+}$ ), puisse être convertie en  $(C_2H_5)_4Pb$  par notre méthode analytique. La détection du tétraéthylplomb ne serait alors pas reliée à son utilisation passée et actuelle dans les carburants ou à toute autre application industrielle. Par contre, la quantité de plomb « convertissable » en tétraéthylplomb ne serait pas proportionnelle à la concentration totale de plomb extractible du sédiment, selon les résultats discutés précédemment.

Quoique qu'il en soit, le plomb que nous avons mesuré dans les échantillons de sédiment de 2014 et 2016 existe en partie sous une forme organométallique ou transformable en une forme organométallique. Si le tétraéthylplomb contamine réellement le sédiment de la zone d'étude, l'impact sur la faune marine doit être évalué en conséquence.

Une façon de confirmer la présence du  $(C_2H_5)_4Pb$  et ses produits de dégradation est de changer l'étape d'éthylation (addition du groupe  $C_2H_5^-$ ) pour une étape de propylation (addition du groupe  $C_3H_7^-$ ) dans notre méthode analytique. L'analyse par spectrométrie de masse permettra alors d'identifier la nature chimique réelle des composés organométalliques du plomb.

#### 4.2.3.2.3 Facteur d'enrichissement du fer dans les échantillons

Le calcul utilisé pour obtenir le facteur d'enrichissement des métaux ne s'applique évidemment pas au fer, qui est le critère de normalisation. Cependant, en calculant le ratio de la concentration du fer dans l'échantillon sur la concentration du fer dans les argiles postglaciaires, on obtient quand même une distribution des sites dont le sédiment est enrichi en fer. La figure 4-18 rapporte ce facteur d'enrichissement pour le fer, pour tous les échantillons analysés.

La valeur  $FE_{fer} > 1$  indique un enrichissement par rapport aux teneurs naturelles en fer dans les argiles postglaciaires de la région et n'est observée que pour deux échantillons, dans leur fraction argile, soit BSI\_2\_2\_SURF\_PARGILE (2016) et P4D14\_PARGILE (2014). Ces deux échantillons ont été prélevés près des installations des compagnies minières Cliffs et IOC Rio Tinto respectivement.

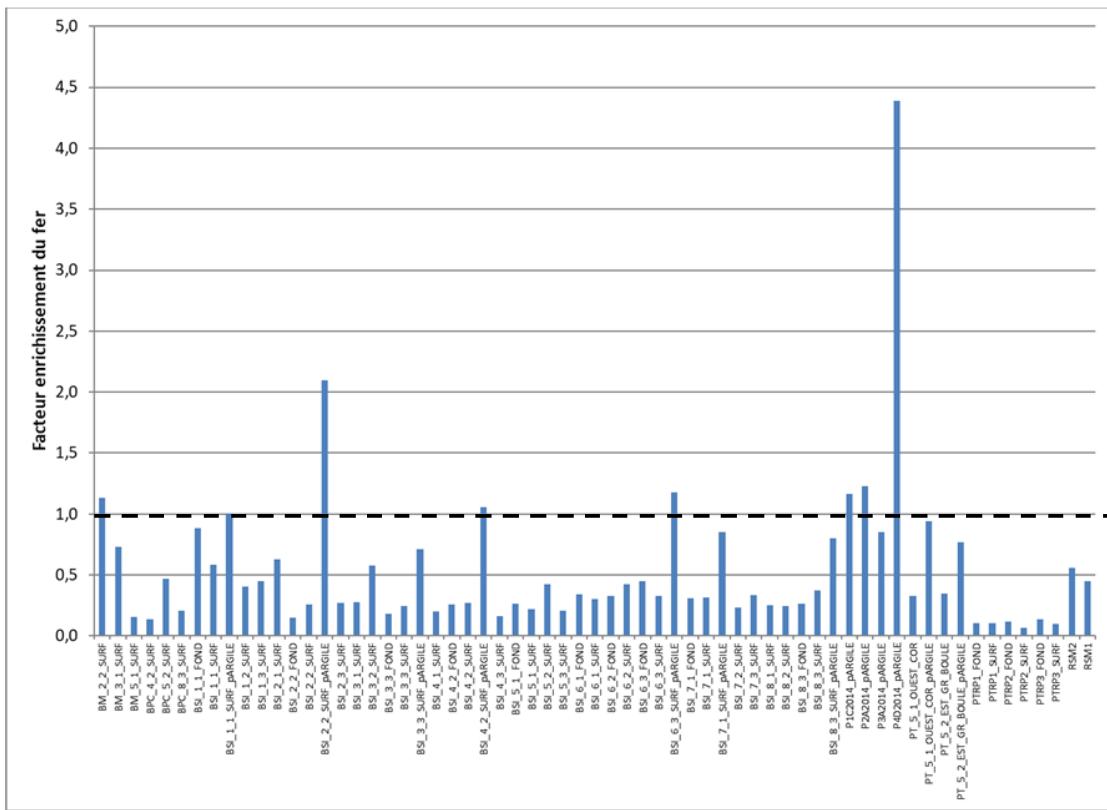


Figure 4-18 : Facteur d'enrichissement en fer des échantillons sur la base de la teneur en fer des argiles postglaciaires de la région

#### 4.2.3.2.4 Titane et molybdène : indicateurs de processus sédimentaire

Récemment, il a été proposé de calculer le rapport molaire  $100\text{Ti}/\text{Al}$  comme traceur des processus de transport sédimentaire (Chen *et al.*, 2013).

Ce rapport tend à diminuer en s'éloignant de la source terrigène des particules en suspension, en raison de la sédimentation plus rapide des particules minérales contenant le titane. Autrement dit, les causes du changement de ce rapport seraient physiques plutôt que chimiques et rendent compte en quelque sorte du temps passé dans la colonne d'eau des particules avant de se déposer sur la surface du sédiment.

Le rapport molaire  $100\text{Ti}/\text{Al}$  a été calculé pour tous les échantillons de la campagne 2016, la figure 4-19 rapporte les valeurs pour les sédiments de surface, sauf pour les trois sites de rivière Pentecôte pour lesquels la couche de fond est rapportée également.

Ce rapport est faible pour la fraction argileuse des argiles postglaciaires des sites Vieux-Poste et rivière Ste-Marguerite (0,15 à 0,19) et est variable d'un site à l'autre, avec les valeurs les plus élevées pour les trois sites à l'embouchure de la rivière Pentecôte.

Pour les échantillons de sédiment global, cette variabilité peut être liée à la dynamique des courants marins de la zone d'étude, qui influencent les taux de sédimentation et donc la composition granulométrique et minéralogique du sédiment.

Les valeurs de ce rapport qui sont près ou inférieures à 1, qui s'explique par un sédiment plus riche en aluminium, sont associées à des sites dont le sédiment de surface est caractérisé comme argile et vase (tels BPC\_5\_2, BSI\_1\_3 et BSI\_6\_1) ou vase et sable fin (BSI\_6\_3 et BSI\_8\_3), c'est-à-dire des sédiments qui ont une proportion de plus de 50 % d'argiles. Ainsi, le rapport 100Ti/Al est un bon indicateur de la nature argileuse ou non du milieu benthique.

Les résultats obtenus pour l'embouchure de la rivière Pentecôte (un rapport de 5 et plus) refléteraient la déposition de particules peu altérées, issues de l'érosion de roches de surface riches en titane du bassin versant de la rivière. La granulométrie de ces trois échantillons n'a pas été réalisée, mais les valeurs du rapport 100Ti/Al indiqueraient un sédiment pauvre en particules fines.

Le rapport 100Ti/Al peut aider à comprendre la dynamique de l'arsenic, qui est l'élément qui a des critères établis de qualité du sédiment marin qui atteint le plus fréquemment le facteur d'enrichissement modérément sévère.

L'arsenic n'est corrélé linéairement qu'avec Be et B, au critère de  $r > 0.8$ , ce qui limite l'interprétation pour identifier sa ou ses sources.

Cependant, la relation entre la concentration de l'arsenic et le rapport molaire du titane et de l'aluminium extractibles, de tous les échantillons de 2016 (incluant leur fraction argileuse), montre que les concentrations qui dépassent 5 mg/kg sont mesurées, en général, dans les échantillons riches en argile avec un rapport inférieur à 2 (figure 4-19).

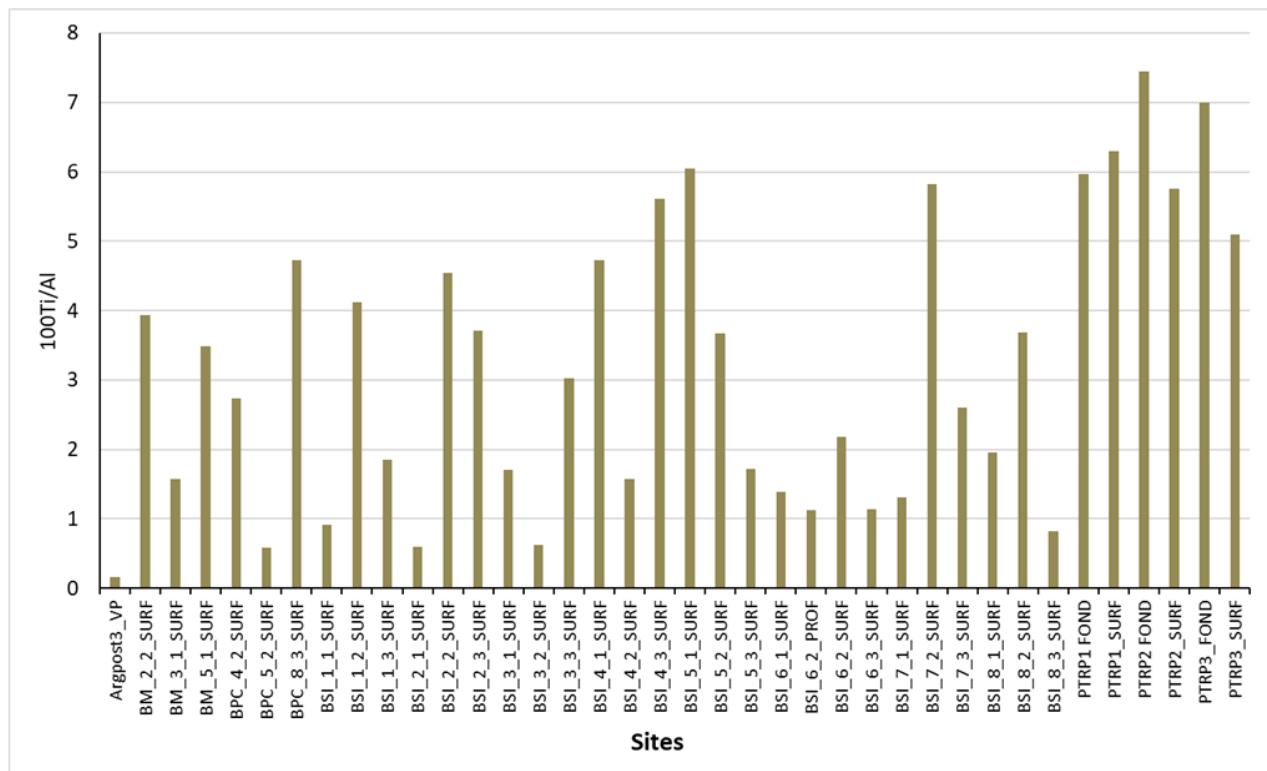


Figure 4-19 : Rapport molaire 100Ti/Al du sédiment de surface des échantillons de la campagne 2016

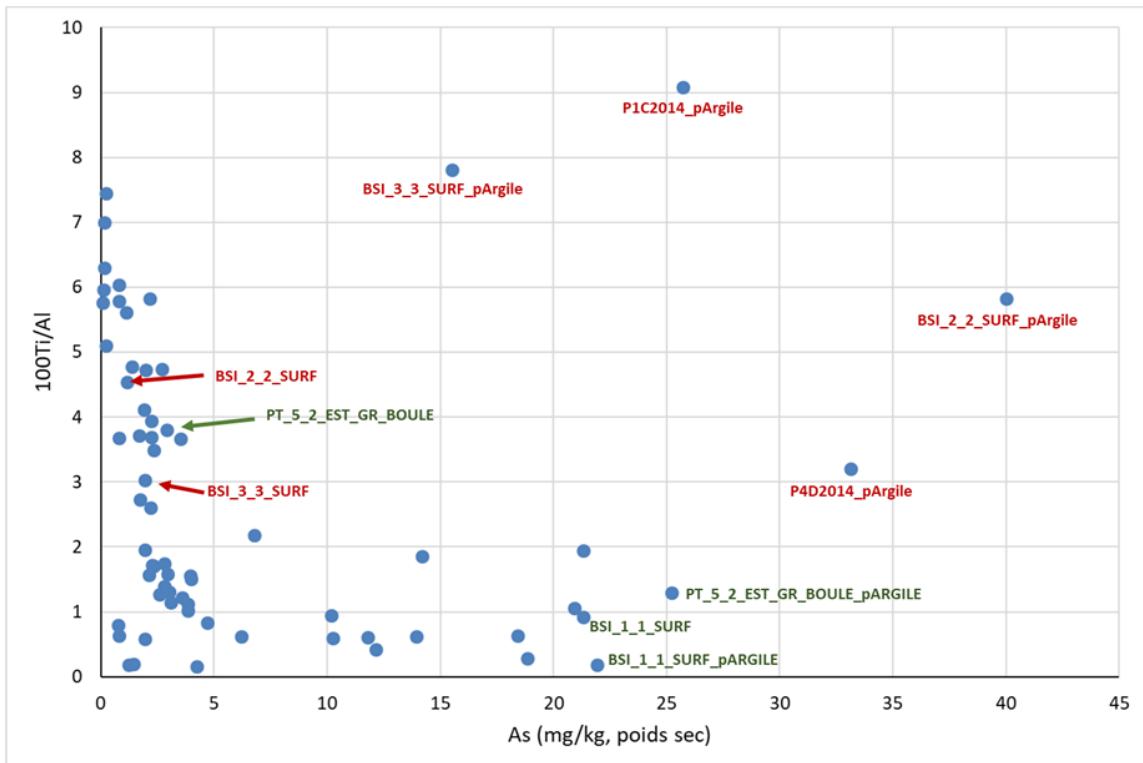


Figure 4-20 : Relation entre la concentration en arsenic et le rapport molaire 100Ti/Al du sédiment pour tous les échantillons de la campagne 2016

Le sédiment de surface des sites BSI\_2\_2 et BSI\_3\_3 est caractérisé comme sable grossier, comme celui du site PT\_5\_2 de l'île Grosse Boule, avec une concentration en arsenic inférieure à 5 mg/kg pour un rapport 100(Ti/Al) entre 3 et 5. Pour les trois sites, la fraction argileuse a une concentration en arsenic nettement plus élevée que le sédiment global; mais contrairement au site PT\_5\_2, le rapport 100(Ti/Al) de cette fraction aux sites BSI\_2\_2 et BSI\_3\_3 est plus élevé que pour le sédiment global. Une source différente de particules fines riches en titane, autre que les minéraux détritiques décrits par Loring et Nota (1968), s'accumulerait à ces deux sites de la baie de Sept-Îles. Le rapport 100(Ti/Al) de la fraction argileuse des sites P1C et P4D démarquent également ces sites alors que la fraction argileuse des sites P2A et P3A a une valeur de ce rapport comparable à celle des sédiments caractérisés comme argile et vase, soit 1,05 et 0,61 respectivement, pour une concentration correspondante en arsenic de 20,9 et 11,8 mg/kg. Cependant nous n'avons pas de valeurs adéquates de concentrations de titane pour les échantillons de sédiment global de surface de 2014, pour calculer leur rapport molaire du titane et de l'aluminium. Cela aurait permis de mettre en lumière l'enrichissement en titane de la fraction argileuse isolée du sédiment de surface des sites P1C et P4D, situés près des installations portuaires des entreprises minières. Cette hypothèse est tout de même probable puisque le sédiment de surface de ces deux sites est caractérisé comme argile et vase, on peut s'attendre à ce que leur rapport 100(Ti/Al) soit près de 1 comme pour le sédiment de surface du site BSI\_1\_1.

Le molybdène est le seul métal qui présente un enrichissement extrêmement sévère dans le sédiment (BSI\_2\_2\_SURF\_argile), et à deux reprises il présente un enrichissement très sévère (BSI\_3\_3\_SURF\_argile et BSI\_2\_3\_SURF).

Selon la matrice de corrélation (figure 4-14), il est corrélé linéairement avec le titane et les métaux corrélés avec le chrome. Dans l'eau salée, le molybdène est le métal en trace le plus abondant ( $\pm 10 \mu\text{g litre}^{-1}$ ). Comme le manganèse et le fer, le molybdène est sensible aux processus chimiques d'oxydo-réduction ; il peut s'accumuler à la surface du sédiment en co-précipitant avec les oxydes de manganèse. Il a été proposé que Mo soit un indicateur des zones hypoxiques dans les environnements aquatiques (Sulu *et al.*, 2017). En absence d'oxygène dans le sédiment, il y a dissolution des oxydes de manganèse et libération du Mo dans les eaux interstitielles et au contact de l'ion sulfure, habituellement abondant dans les sédiments anoxiques, des sulfures de molybdène précipitent, d'où la formation de sites d'accumulation du Mo à la surface du sédiment. Cependant, Mo n'est pas corrélé linéairement avec le manganèse ( $r = 0,34$ ) dans nos échantillons et nous n'avons pas d'information sur la présence de sites anoxiques dans le milieu benthique de la zone d'étude. Un environnement benthique anoxique est associé à un apport accru de matière organique au sédiment, l'action des bactéries pour dégrader la matière organique excessive entraîne la consommation de l'oxygène. Mais les sites où le FE du molybdène est supérieur à 30 ne correspondent pas aux sites riches en matière organique (Annexe 4A, figure A4-67). Une source anthropique n'est pas à exclure, le molybdène est émis lors de la combustion de combustibles fossiles comme le charbon et la contamination de l'environnement par Mo est aussi associée aux activités des industries métallurgiques (surtout celles du zinc ou cuivre). Le molybdène est également un ingrédient de plusieurs lubrifiants industriels et compose une variété d'alliages métalliques.

#### 4.2.4 Hydrocarbures linéaires (alcanes) et aromatiques polycycliques (HAP)

L'analyse des hydrocarbures associés aux sédiments concernait la détection et la quantification de 20 hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), dont 15 prioritaires selon la US Environmental Protection Agency et les 13 HAP normés au Canada (tableau 4-17) et l'ensemble des alcanes linéaires de nombres de carbone dans l'intervalle  $C_{11} - C_{40}$ . Les analyses ont été réalisées sur le sédiment complet de chaque échantillon, sans distinction avec la fraction argile sauf pour les échantillons d'argiles postglaciaires des sites Rivière Ste-Marguerite (RMS1 et RSM2) et Vieux-Poste.

*Tableau 4-17 : Concentrations des hydrocarbures aromatiques polycycliques ( $\mu\text{g/kg, poids sec}$ ) associées aux critères pour la qualité des sédiments marins*

| Critère                | CER | CSE | CEO | CEP  | CEF  |
|------------------------|-----|-----|-----|------|------|
| Acénaphtène            | 3,7 | 6,7 | 21  | 89   | 940  |
| Acénaphtylène          | 3,3 | 5,9 | 31  | 130  | 340  |
| Anthracène             | 16  | 47  | 110 | 240  | 1100 |
| Benzo[a]anthracène     | 27  | 75  | 280 | 690  | 1900 |
| Benzo[a]pyrène         | 34  | 89  | 230 | 760  | 1700 |
| Chrysène               | 37  | 110 | 300 | 850  | 2200 |
| Dibenzo[a,h]anthracène | 3,3 | 6,3 | 43  | 140  | 200  |
| Fluoranthène           | 27  | 110 | 500 | 1500 | 4200 |
| Fluorène               | 10  | 21  | 61  | 140  | 1200 |
| 2-Méthylnaphtalène     | 16  | 20  | 63  | 200  | 380  |
| Naphtalène             | 17  | 35  | 120 | 390  | 1200 |
| Phénanthrène           | 23  | 87  | 250 | 540  | 2100 |
| Pyrène                 | 41  | 150 | 420 | 1400 | 3800 |

Critères expliqués au tableau 4-2.

#### 4.2.4.1 Hydrocarbures aliphatiques (alcanes)

L'annexe D4 présente les concentrations en hydrocarbures aliphatiques mesurées en 2013, 2014 et 2016(D4-1, D4-2 et D4-3).

La figure 4-21 rapporte la concentration totale en hydrocarbures linéaires pour tous les échantillons (50). La somme la plus élevée des concentrations des alcanes linéaires C<sub>11</sub> – C<sub>40</sub>, à près de 4 500 µg/kg, a été mesurée dans l'échantillon de sédiment de surface prélevé au site BSI\_2\_1. Ce site est situé dans la partie nord-ouest de la baie (figure 4-1).

Il est à noter que certains échantillons de sédiment prélevés à l'extérieur de la baie ont des concentrations plus élevées que le sédiment à l'intérieur de la baie. Ainsi des sites situés à l'est (BSI\_8\_2 et BSI\_8\_3) et à l'ouest (BSI\_7\_1) de l'archipel, à la rivière Sainte-Marguerite (RSM1 et RSM2) et à rivière Pentecôte (PTRP3\_fond) ont des concentrations qui dépassent 1 000 µg/kg.

La fraction argileuse des argiles postglaciaires présente des concentrations en alcanes totaux plus élevées que l'ensemble des sédiments, avec la valeur plus élevée pour l'échantillon du site Vieux-Poste.

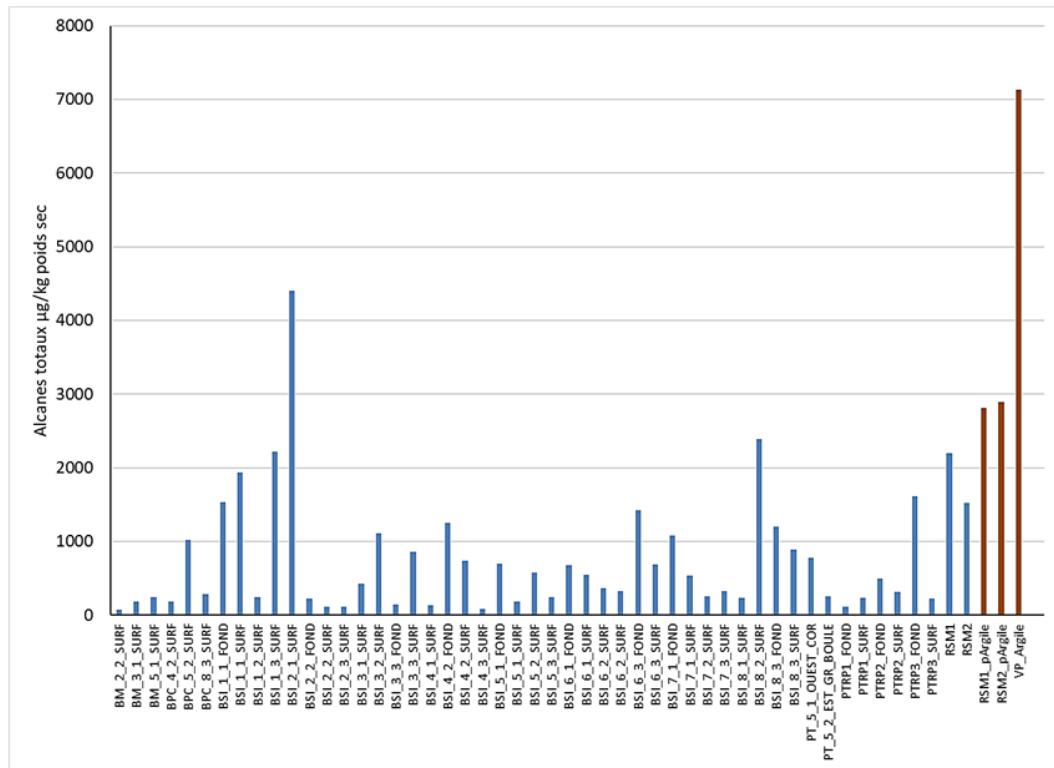


Figure 4-21 : Concentration totale des hydrocarbures aliphatiques en µg/kg de sédiment sec

Les sites de références sont ouest Corossol (PT\_5\_1), est Grosse Boule (PT\_5\_2), rivière Pentecôte (PTRP), baie Manitou (BM) et rivière Sainte-Marguerite (RSM).

Les barres en orangé identifient les résultats pour la fraction argile de ces échantillons.

Pour douze sites, nous avons analysé le contenu en hydrocarbures dans les sédiments de la couche de surface et de la couche de fond. En calculant le ratio  $\sum \text{alcanes}_{\text{surface}} / \sum \text{alcanes}_{\text{fond}}$ , nous pouvons établir si les apports en hydrocarbures aliphatiques sont récents. La figure 4-22 rapporte ces ratios et seulement trois sites ont une valeur supérieure à 1, qui indique soit un dépôt récent d'alcane au sédiment ou un milieu moins favorable à la dégradation des hydrocarbures. Le ratio le plus élevé est obtenu pour l'échantillon BSI\_3\_3, situé dans la partie nord de la baie. Les résultats pour les trois échantillons prélevés au site de rivière Pentecôte (PTRP1 à 3), illustrent une variation importante, qui peut être naturelle, du contenu en hydrocarbures aliphatiques (alcanes) dans les sédiments à un site donné.

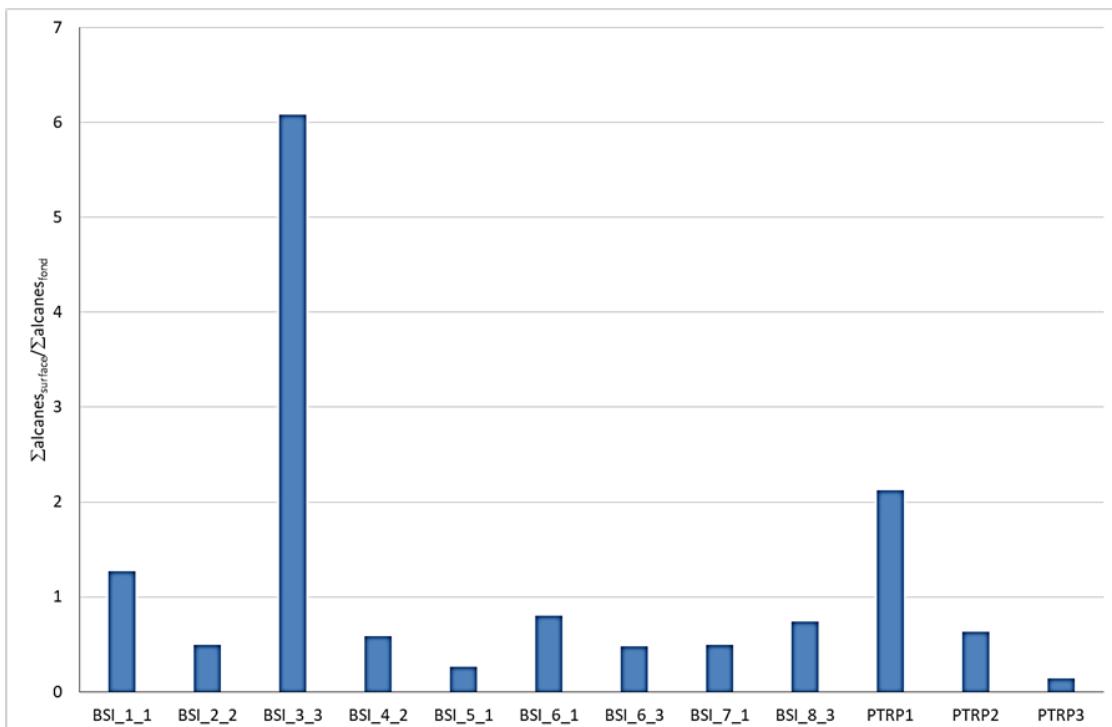


Figure 4-22 : Ratios des concentrations totales des hydrocarbures aliphatiques (alcanes) dans le sédiment de la couche de surface sur les concentrations totales des hydrocarbures aliphatiques dans le sédiment de la couche de fond  
Le site de référence est PTRP (rivière Pentecôte).

Les sources de cette classe d'hydrocarbures sont multiples, elles peuvent être anthropiques (mazout, diésel, lubrifiants) et naturelles (végétaux terrestres et marins). Le calcul du ratio des alcanes de faible poids moléculaire sur celui des alcanes de poids moléculaires élevés,  $\sum C_{10}-C_{23} / \sum C_{24}-C_{40}$ , est un indicateur classique de l'origine probable de ces hydrocarbures. Comme les produits pétroliers contiennent une plus grande proportion d'alcane légers, surtout les produits raffinés comme le diésel, un ratio au-delà de 1 indique la dominance d'une source pétrogénique (essentiellement anthropique).

La figure 4-23 rapporte ce ratio pour tous les échantillons analysés. Le ratio est supérieur à 1 pour vingt-deux échantillons sur cinquante. Le ratio le plus élevé est près de 30 pour l'échantillon BSI\_5\_1\_fond, situé à l'extérieur de la baie, à l'est. L'ensemble de ces valeurs peut sembler surprenant puisqu'il implique une contamination étendue du sédiment par les produits pétroliers, jusqu'aux sites de références et dans les argiles postglaciaires. Cependant, la quantification des alcanes à longue

chaîne de carbone (> C30) n'est pas simple ; une sous-estimation de leur concentration entraînera une surestimation du ratio.

Si le sédiment est vraiment contaminé par un produit pétrolier comme le diésel, la présence des hydrocarbures aromatiques polycycliques méthylés devrait être importante.

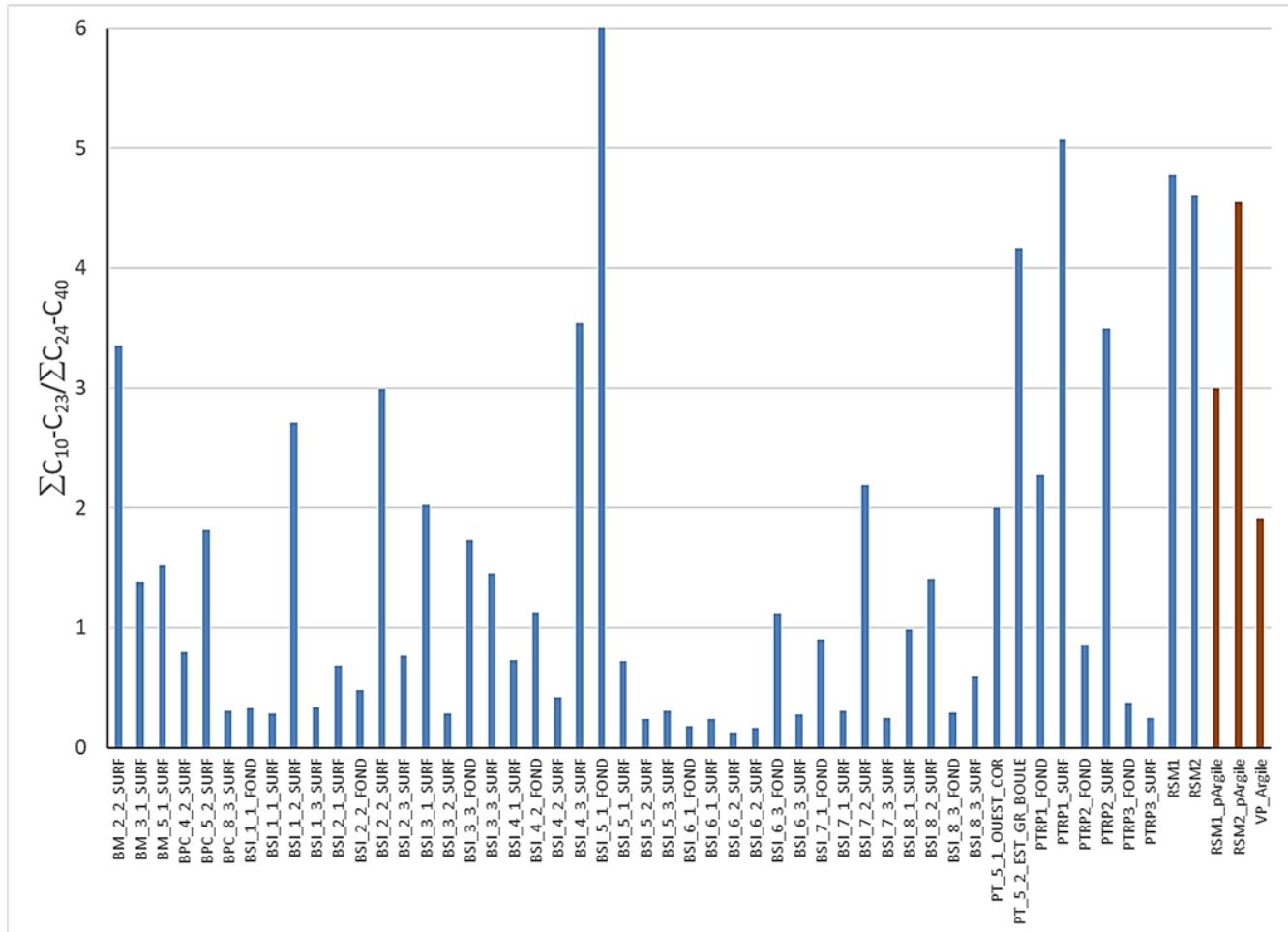


Figure 4-23 : Ratios de la somme des concentrations des hydrocarbures alcanes légers sur la somme des concentrations des hydrocarbures lourds ( $\Sigma C_{10}-C_{23}/\Sigma C_{24}-C_{40}$ )

Les sites de références sont ouest Corossoil (PT\_5\_1), est Grosse Boule (PT\_5\_2), rivière Pentecôte (PTRP) et rivière Sainte-Marguerite (RSM).

#### 4.2.4.2 Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

L'annexe E4 affiche l'ensemble des concentrations en hydrocarbures aromatiques polycycliques mesurées en 2013, 2014 et 2016 (E4-1, E4-2 et E4-3) et l'annexe A4 présente pour cinq HAP normés (fluorène, acénaphhtène, anthracène, dibenzo anthracène et fluoranthène), une carte des concentrations réelles rencontrées aux stations en 2016 ainsi qu'une représentation de la diffusion de l'élément considéré, prédite par deux méthodes différentes (A4-14 à A4-18). La figure 4-24 rapporte la concentration totale en HAP pour tous les échantillons de sédiment global. Aucun des trois HAP méthylés mesurés (1-méthynaphthalène, 2-méthynaphthalène et méthylchrysène) n'a été détecté

dans les échantillons de sédiment global, ni dans la fraction argileuse des argiles postglaciaires. Ceci appuie l'hypothèse précédente, c'est-à-dire que la détection inadéquate des alcanes lourds a conduit à la surestimation de la contamination des sédiments par les produits pétroliers.

La somme la plus élevée, à un peu plus de 600 µg/kg, a été mesurée dans l'échantillon de sédiment de surface prélevé au site BSI\_1\_3. Ce site est situé près des installations de l'aluminerie Alouette. La deuxième concentration totale en HAP la plus élevée a été mesurée à l'un des sites témoins, soit l'échantillon PT\_5\_1 situé à l'ouest de l'île Corossol. Comme pour les alcanes, la fraction argileuse des argiles postglaciaires présente des concentrations en HAP totaux plus élevées que l'ensemble des sédiments. Cependant, c'est le rétène qui est détecté majoritairement dans ces échantillons.

Les niveaux de contamination par les HAP observés dans la majorité des échantillons se retrouvent donc sous le seuil reconnu pour un sédiment modérément contaminé (entre 100 et 500 µg/kg de sédiment sec) selon la littérature (De Mora et al., 2010). En fait, il est considéré qu'un sédiment contenant des hydrocarbures (somme des alcanes et HAP) à une concentration de moins de 10 000 µg/kg est peu pollué (De Mora et al., 2010). Ce niveau de contamination n'est jamais atteint dans les échantillons prélevés durant la campagne de 2016.

Cependant, parmi les 13 HAP normés au Canada pour la qualité des sédiments (Environnement Canada et MDDEP, 2007) et mesurés dans nos échantillons, l'acénaphthène était présent à une concentration supérieure à la concentration seuil produisant un effet sur la faune marine, soit 6 µg/kg, dans 20 échantillons sur 50, dont les trois échantillons de la baie Manitou considérée comme non-impactée. Il dépasse le critère CEO dans 10 échantillons et le critère CEP (concentration produisant un effet probable) pour un échantillon (tableau 4-18). Cet échantillon est le sédiment d'un des sites de références, rivière Pentecôte. Ce HAP était aussi présent dans les échantillons de sédiment de la campagne de 2014, à des concentrations dépassant le critère de qualité CSE dans 10 % des échantillons. L'acénaphthène n'a pas été détecté dans la fraction argileuse des argiles postglaciaires. Toutefois, il est important de souligner que l'acénaphthène comme d'autres HAP peut provenir du transport aérien de contaminants générés lors de feux de forêt par exemple.

Les annexes A4-20, A4-21, A4-22 et A4-13 (figures A4-62, A4-63 A4-64) affichent respectivement les HAP normés dont la concentration mesurée est au seuil normalisé d'effets rares, ceux dont la concentration mesurée est au seuil normalisé produisant un effet et ceux dont la concentration mesurée est au seuil normalisé d'effets occasionnels pour 2016.

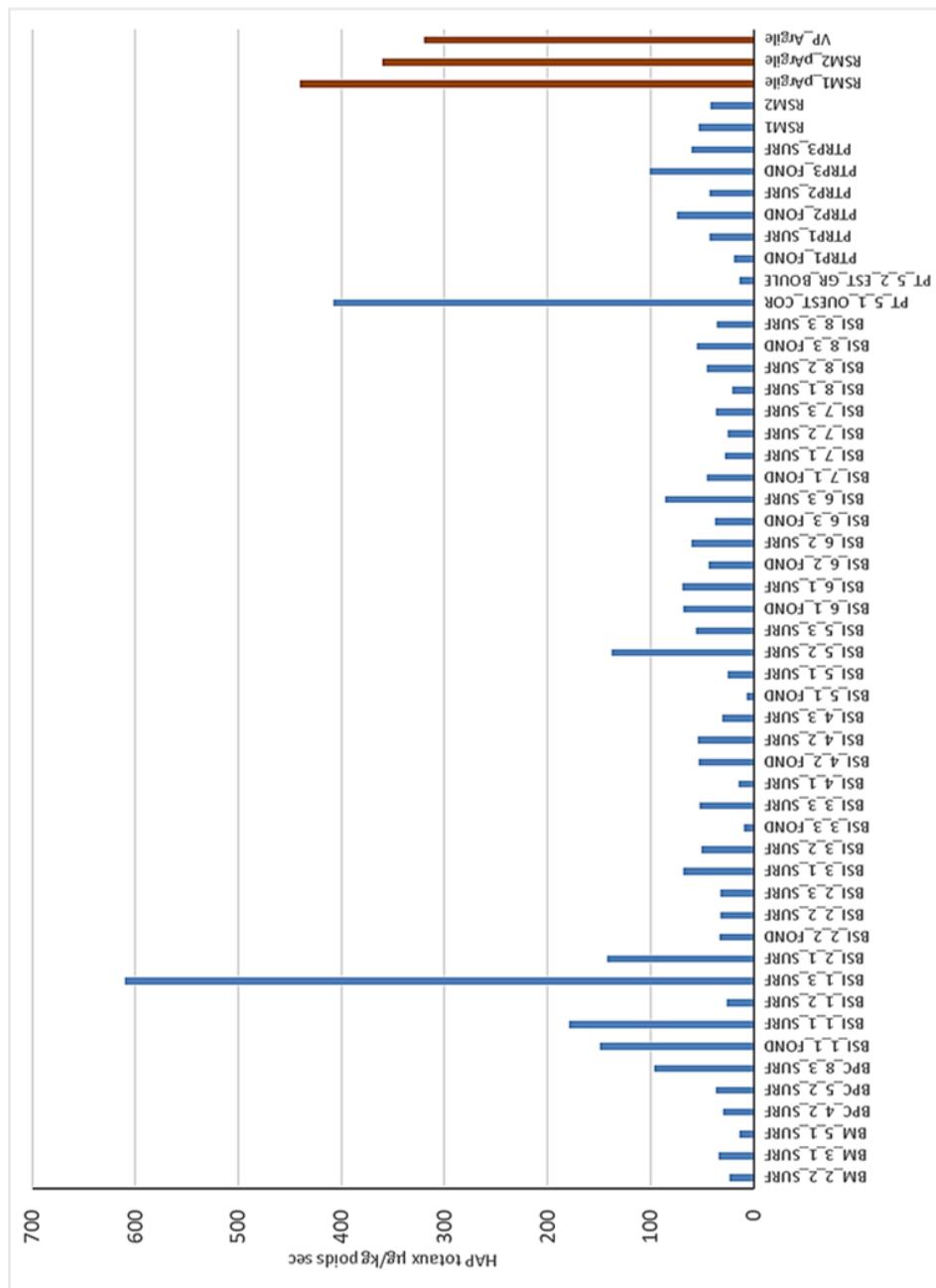
La source des HAP peut se définir comme étant pétrogénique (associée aux combustibles fossiles « intacts ») ou pyrogénique, donc émis et produits lors de la combustion des carburants et des matières solides (exemple : chauffage au bois).

Plusieurs indices ont été proposés pour distinguer ces sources pour les HAP (Tobiszewski et Namiesnik, 2012). Il a été retenu l'indice de diagnostic basé sur la concentration de l'anthracène et du phénanthrène (ANT/ANT + PHE). Cet indice a une valeur seuil de 0,1; en-deçà la source est pétrogénique et au-delà la source est pyrogénique. Selon cet indice calculé à partir des résultats d'analyse des HAP pour tous les échantillons de sédiment, la ou les sources d'émission seraient essentiellement pyrogéniques puisque la valeur de cet indice est supérieure à 0,1 (figure 4-25).

Les HAP associés aux sédiments proviennent donc en partie de la combustion des carburants fossiles liquides: transport routier, transport maritime, transport ferroviaire, chauffage domestique et industriel et autres activités nécessitant un apport énergétique. L'indice de diagnostic basé sur la concentration du rétène et du chrysène par le calcul du ratio RET/(RET +CHY) permet de cibler les sources pyrogéniques.

La combustion du bois de chauffage et du charbon produit un ratio entre 0,6 et 1,0 alors que la combustion du diésel produit un ratio autour de 0,25. La figure 4-26 montre que dans les échantillons pour lesquels il a été possible de calculer ce ratio, la signature de la combustion de combustibles solides (ratio > 0,6) domineraient les apports de HAP dans le sédiment pour plus de 50 % des sites.

Aucun HAP méthylé n'a été détecté dans les échantillons analysés.



*Figure 4-24 : Concentration totale des hydrocarbures aromatiques polycycliques en µg/kg de sédiment sec*  
*Les sites de références sont ouest Corossol (PT\_5\_1), est Grosse Boule (PT\_5\_2), rivière Pentecôte (PTRP), Baie Manitou (BM) et rivière Sainte-Marguerite (RSM). Les barres en orangé identifient les résultats pour la fraction argile de ces échantillons.*

Tableau 4-18 : Ensemble des échantillons de sédiment de la campagne 2016. Concentration ( $\mu\text{g/kg}$ , poids sec) des hydrocarbures aromatiques polycycliques normés (9 sur 13), ayant dépassé au moins une fois l'un des critères

| Site                | ACE  | PHE  | ANT  | FLA             | PY   | B(a)A | CHY   | B(a)P | D(ah)A |
|---------------------|------|------|------|-----------------|------|-------|-------|-------|--------|
| BM_2_2_SURF         | 11,6 | 0,7  | 5,4  | ND <sup>1</sup> | ND   | 0,1   | 0,02  | ND    | ND     |
| BM_3_1_SURF         | 13,5 | 0,6  | 5,8  | ND              | ND   | ND    | 0,02  | 1,9   | 7,1    |
| BM_5_1_SURF         | 10,8 | 0,2  | 2,3  | ND              | ND   | ND    | 0,02  | ND    | ND     |
| BPC_4_2_SURF        | 15,9 | 1,0  | ND   | ND              | ND   | ND    | 0,14  | 2,1   | 6,5    |
| BPC_5_2_SURF        | 18,7 | 0,9  | 6,6  | ND              | ND   | 0,5   | 0,14  | 1,8   | 6,5    |
| BPC_8_3_SURF        | 8,4  | 3,5  | 3,5  | 8,3             | 6,6  | 2,2   | 2,75  | 3,0   | 6,6    |
| BSI_1_1_FOND        | 6,6  | 7,4  | 15,9 | 14,3            | 14,8 | 8,0   | 12,84 | 9,8   | 9,1    |
| BSI_1_1_SURF        | 7,2  | 5,1  | 17,2 | 9,4             | 14,1 | 29,0  | 15,79 | 11,2  | 14,5   |
| BSI_1_2_SURF        | 12,2 | 0,1  | ND   | ND              | ND   | 0,6   | 0,28  | ND    | 6,6    |
| BSI_1_3_SURF        | 19,5 | 32,6 | 28,1 | 62,8            | 66,8 | 47,3  | 57,68 | 57,3  | 21,4   |
| BSI_2_1_SURF        | 29,6 | 4,5  | 46,3 | 8,7             | 9,4  | ND    | 2,70  | 3,9   | 6,7    |
| BSI_2_2_FOND        | 22,3 | 0,2  | ND   | ND              | ND   | 0,6   | 0,51  | 2,1   | 7,1    |
| BSI_2_2_SURF        | ND   | 0,3  | 6,0  | ND              | ND   | 0,3   | 0,22  | ND    | 7,1    |
| BSI_2_3_SURF        | ND   | ND   | ND   | 2,0             | ND   | ND    | 0,22  | 2,3   | 7,2    |
| BSI_3_1_SURF        | 36,4 | 0,9  | 19,4 | ND              | ND   | ND    | ND    | ND    | 7,0    |
| BSI_3_2_SURF        | ND   | 1,5  | 7,5  | 5,8             | 5,5  | ND    | 2,10  | 3,6   | ND     |
| BSI_3_3_FOND        | ND   | ND   | ND   | ND              | ND   | ND    | 0,15  | ND    | 7,0    |
| BSI_3_3_SURF        | 28,4 | 1,6  | 5,1  | ND              | ND   | ND    | 0,16  | 2,0   | 7,9    |
| BSI_4_1_SURF        | 8,4  | ND   | 6,2  | ND              | ND   | ND    | ND    | ND    | ND     |
| BSI_4_2_FOND        | 30,1 | 2,0  | 13,3 | ND              | ND   | ND    | 0,72  | 2,5   | ND     |
| BSI_4_2_SURF        | 14,8 | 1,4  | ND   | ND              | ND   | ND    | 1,29  | 2,9   | 7,8    |
| BSI_4_3_SURF        | ND   | 0,9  | 4,1  | 2,2             | ND   | 0,2   | 0,42  | 2,5   | ND     |
| BSI_5_1_FOND        | ND   | 0,1  | ND   | ND              | ND   | 0,2   | 0,29  | ND    | ND     |
| BSI_5_1_SURF        | 15,4 | ND   | 6,9  | ND              | ND   | 0,3   | 0,24  | 1,6   | ND     |
| BSI_5_2_SURF        | 3,7  | 0,2  | 8,9  | ND              | ND   | ND    | ND    | ND    | 7,9    |
| BSI_5_3_SURF        | 10,3 | 0,6  | 9,2  | ND              | ND   | 1,0   | 0,85  | 1,9   | 8,6    |
| BSI_6_1_FOND        | 14,8 | 2,5  | 4,9  | 4,5             | ND   | ND    | 1,13  | 3,1   | 8,2    |
| BSI_6_1_SURF        | 3,0  | 2,0  | 15,7 | 6,1             | 4,7  | 1,8   | 2,85  | 3,0   | 6,9    |
| BSI_6_2_PROF        | ND   | 0,6  | 3,9  | 4,0             | ND   | ND    | ND    | 3,5   | 8,2    |
| BSI_6_2_SURF        | ND   | 2,4  | 5,9  | 8,6             | 6,3  | 1,6   | 1,63  | 3,8   | 7,4    |
| BSI_6_3_FOND        | ND   | 4,1  | 4,6  | ND              | ND   | ND    | 2,46  | 1,9   | 6,7    |
| BSI_6_3_SURF        | ND   | 8,2  | 14,5 | 11,8            | 9,9  | ND    | 3,77  | 5,0   | ND     |
| BSI_7_1_PROF        | ND   | 1,3  | ND   | 4,1             | ND   | 1,1   | 1,65  | 3,2   | 8,3    |
| BSI_7_1_SURF        | ND   | 1,2  | 1,1  | ND              | ND   | ND    | 1,18  | 2,4   | ND     |
| BSI_7_2_SURF        | 11,7 | ND   | 5,9  | ND              | ND   | ND    | 0,20  | 1,9   | ND     |
| BSI_7_3_SURF        | 12,0 | ND   | ND   | ND              | ND   | ND    | ND    | 2,5   | ND     |
| BSI_8_1_SURF        | ND   | 0,4  | 5,0  | ND              | ND   | ND    | 0,24  | 1,9   | 7,6    |
| BSI_8_2_SURF        | 11,9 | 1,5  | 8,1  | ND              | 7,9  | ND    | 0,97  | 2,2   | 7,5    |
| BSI_8_3_FOND        | 22,9 | 1,8  | 4,9  | ND              | ND   | ND    | 0,91  | ND    | 6,6    |
| BSI_8_3_SURF        | ND   | 0,9  | 2,8  | 3,3             | ND   | ND    | 0,60  | 3,1   | ND     |
| PT_5_1_OUEST_COR    | ND   | 75,9 | 48,6 | 87,0            | ND   | 39,5  | 35,75 | 26,8  | 9,7    |
| PT_5_2_EST_GR_BOULE | ND   | 0,3  | 3,2  | 2,3             | ND   | 0,2   | 0,29  | ND    | 6,3    |
| PTRP1_FOND          | 5,4  | 0,5  | ND   | ND              | ND   | 0,7   | 0,61  | ND    | 6,8    |
| PTRP1_SURF          | 31,0 | 1,6  | ND   | ND              | 4,3  | 0,2   | 0,25  | 1,6   | ND     |
| PTRP2_FOND          | 63,2 | 2,2  | ND   | ND              | ND   | ND    | 0,26  | ND    | 7,9    |
| PTRP2_SURF          | 40,7 | 0,9  | ND   | ND              | ND   | 0,5   | 0,02  | ND    | ND     |
| PTRP3_FOND          | 96,7 | 1,0  | ND   | ND              | ND   | ND    | 0,45  | 1,9   | ND     |
| PTRP3_SURF          | 55,9 | ND   | 4,4  | ND              | ND   | ND    | ND    | ND    | ND     |
| RSM1                | 13,9 | 6,4  | ND   | ND              | 24,0 | ND    | 1,58  | ND    | ND     |
| RSM2                | 10,0 | 2,1  | ND   | ND              | 13,0 | ND    | 0,79  | ND    | 6,3    |

Note 1 : ND indique non-détecté lors de l'analyse. Couleurs références au tableau 4-17.

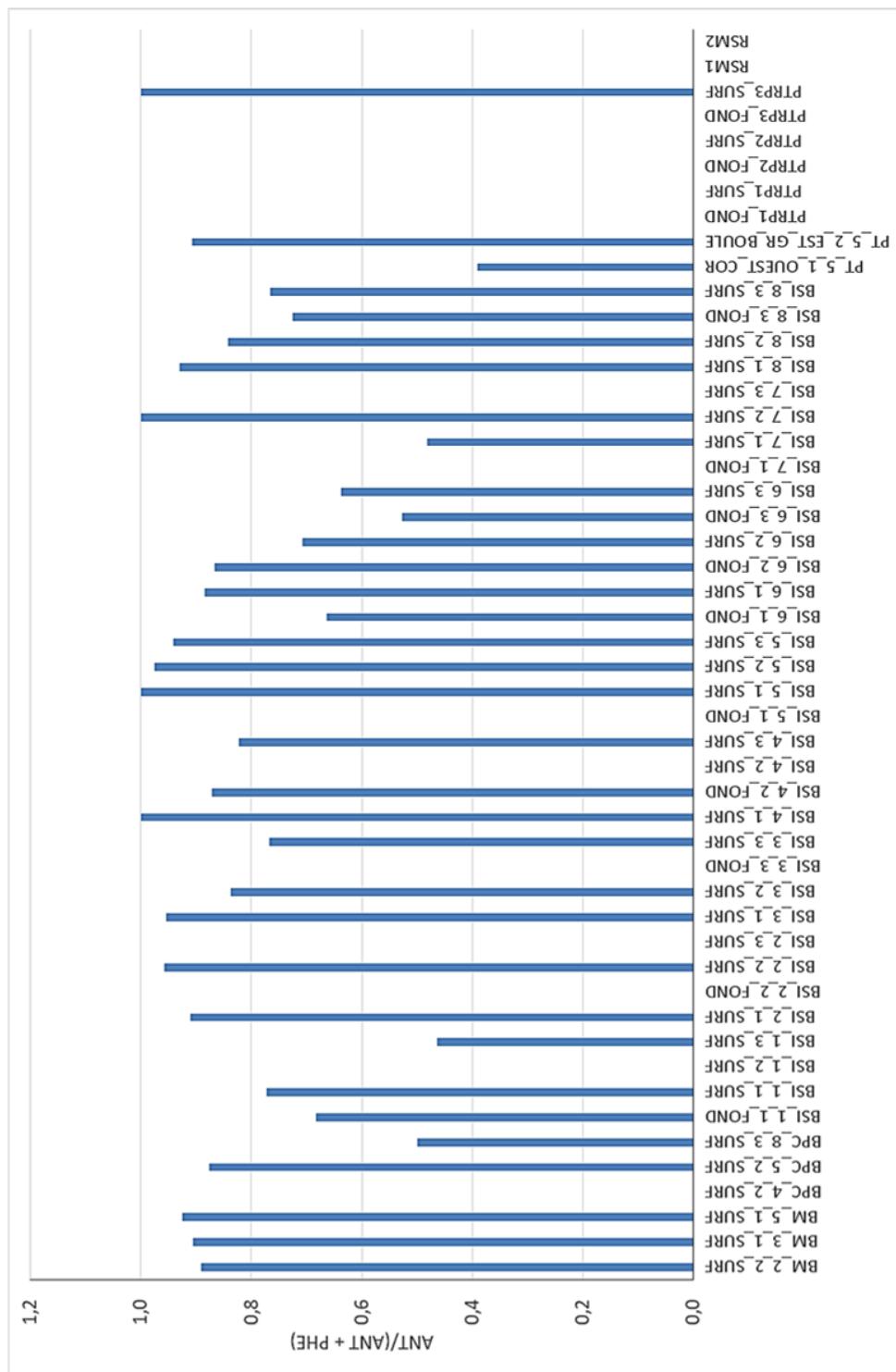


Figure 4-25 : Indice de diagnostic basé sur la concentration de l'anthracène et du phénanthrène (ANT/ANT + PHE)

*Les sites de références sont ouest Corosso (PT\_5\_1), est Grosse Boule (PT\_5\_2), rivière Pentecôte (PTRP) et rivière Sainte-Marguerite (RSM).*

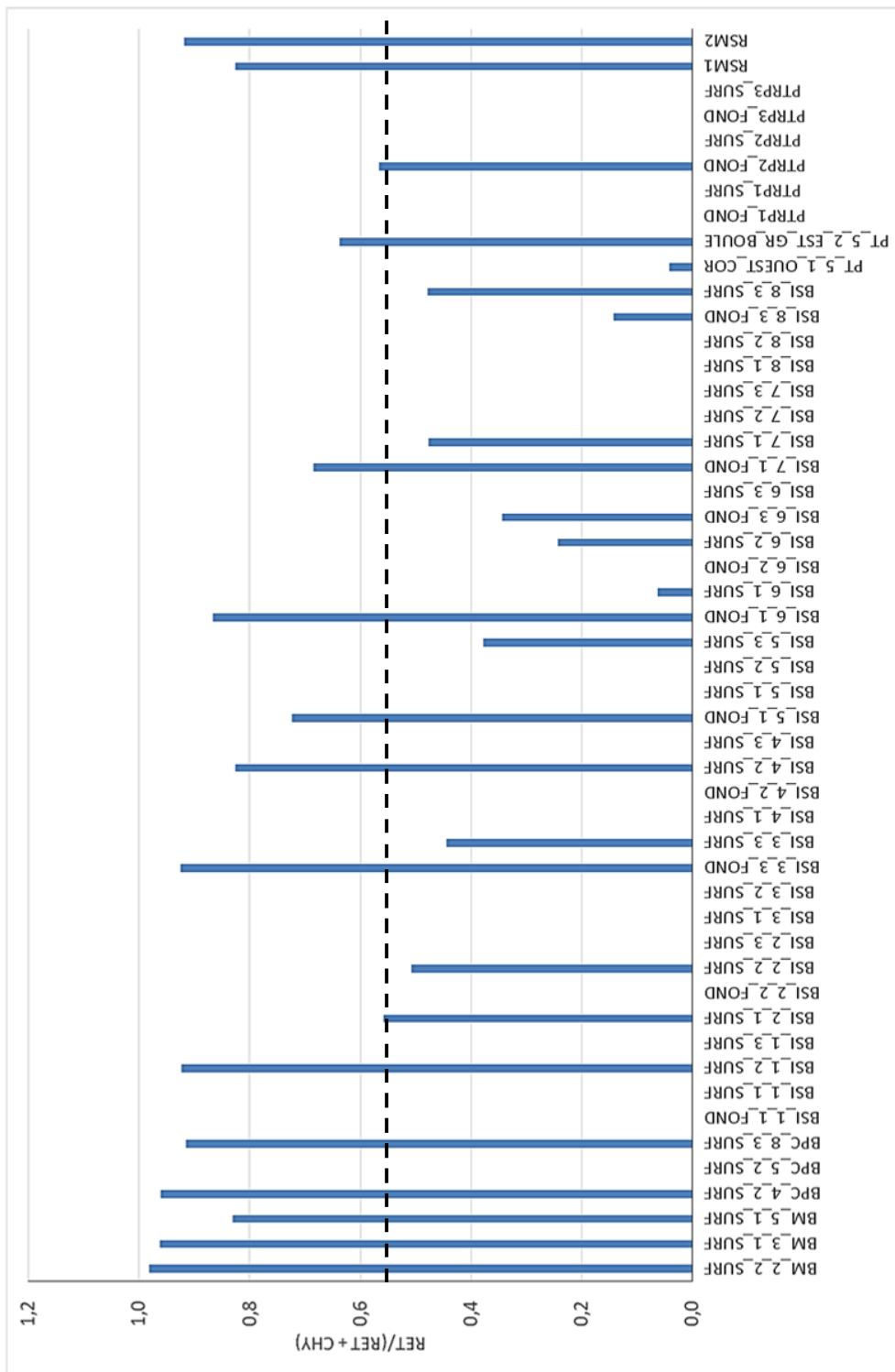
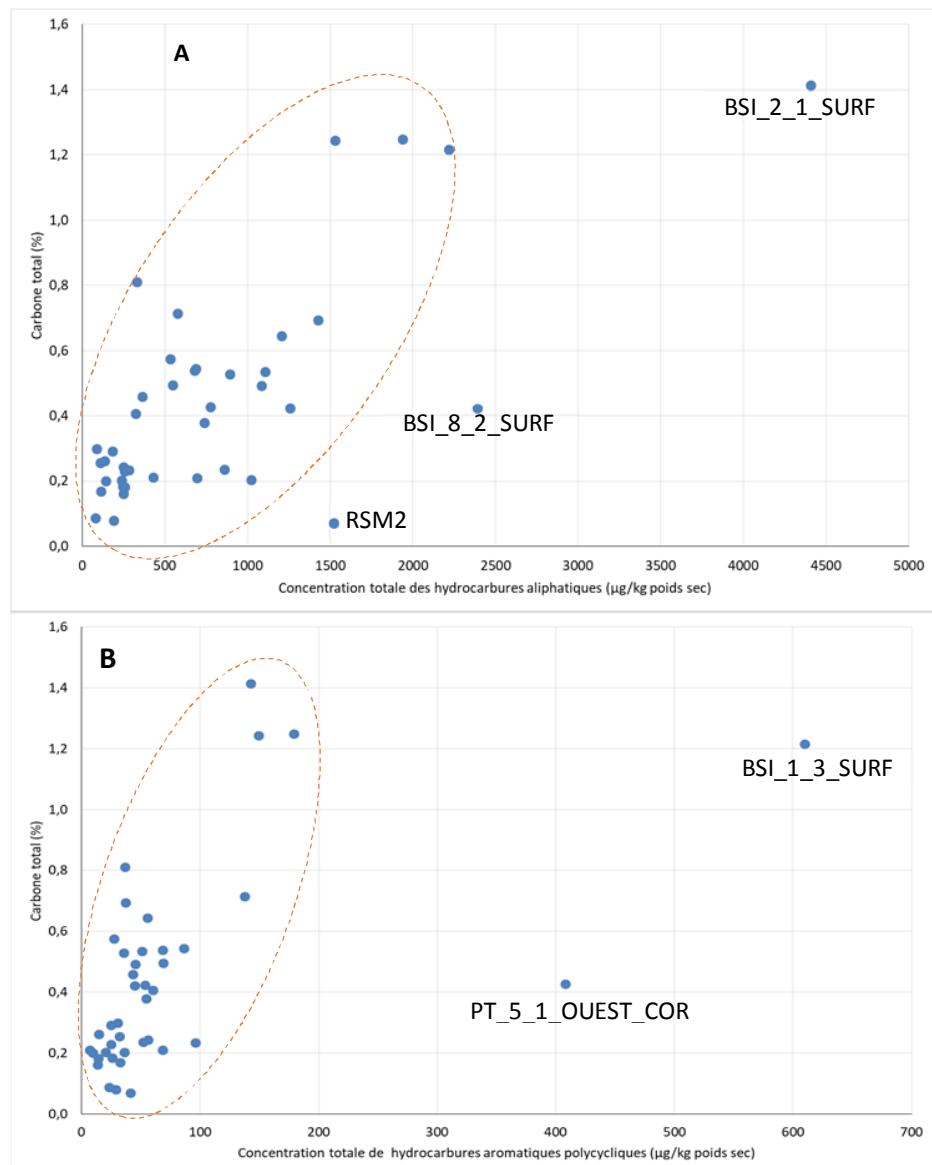


Figure 4-26 : Indice de diagnostic basé sur la concentration du rétène et du chrysène (RET/RET + CHY)  
La ligne pointillée noire indique la valeur au-delà de laquelle l'indice correspondrait à la combustion de combustibles solides. Les sites de références sont ouest Corossol (PT\_5\_1), est Grosse Boule (PT\_5\_2), rivière Pentecôte (PTRP), baie Manitou (BM) et rivière Sainte-Marguerite (RSM).

L'un des vecteurs des hydrocarbures aliphatiques et HAP vers le sédiment sont les particules riches en carbone émises lors de la combustion et les particules d'origine non pyrogéniques riches en carbone qui ont une grande capacité d'adsorption des hydrocarbures dissous. Ces particules peuvent sédimerter loin des sources d'émission. La figure 4-27 montre une certaine corrélation, en excluant les points excentriques, entre le contenu en carbone des sédiments (%C) et la concentration des hydrocarbures aliphatiques (A) ainsi que celle des HAP (B) dans les échantillons de campagne de 2016. Nous pouvons avancer deux explications : d'une part les hydrocarbures sont associés aux particules au lieu d'émission, d'autre part il est connu que les particules fines en suspension dans la colonne d'eau sont recouvertes d'un film organique qui favorise l'accumulation des hydrocarbures à leur surface. Le processus global d'apport des hydrocarbures au sédiment de la zone d'étude est certainement composé de ces deux aspects.



#### 4.2.5 Matière organique et isotopes stables du carbone et de l'azote

La figure A4-67 (annexe A) présente le pourcentage de matière organique contenu dans les sédiments des stations échantillonnées et l'annexe F affiche les données de carbone, d'azote, ainsi que le rapport carbone-azote pour les années d'échantillonnage 2013, 2014 et 2016.

L'analyse du carbone et de l'azote dans les sédiments permet de distinguer le niveau de matière organique présent dans les sédiments et sa nature. Celle-ci est présente dans les sédiments sous différentes formes (matières humiques, substances chimiques, matières végétales et animales) dont le contenu en azote varie selon les sources.

Le carbone est aussi présent sous forme de carbonates inorganiques (exemple  $\text{CaCO}_3$ ) qui proviennent, en milieu aquatique, de la désagrégation des coquilles, de la précipitation abiotique et biotique (par la sédimentation de phytoplancton formés de frustules en calcite) et de l'érosion des roches de surface riches en calcite. Un apport excessif de carbone organique au milieu aquatique provoque une dégradation de la qualité de l'environnement, en raison des bactéries aérobiques qui assimile le carbone organique, un processus qui réduit la quantité d'oxygène dissous, contribuant ainsi à l'eutrophisation de l'environnement et au développement de zones hypoxiques dans le sédiment.

En milieu côtier, on retrouve souvent entre 1 et 3 % de carbone et parfois même jusqu'à 5 à 8 % lorsque beaucoup de carbone est apporté par le milieu terrestre (INREST, 2013). Le contenu en azote du sédiment est plus faible que celui du carbone, souvent par un facteur dix et plus. La matière organique fraîche, comme le phytoplancton, est plus riche en azote alors que la matière organique dégradée est appauvrie en azote. Les rejets des eaux usées peu ou pas traitées représentent cependant un apport d'azote important au point de rejet.

Il n'existe aucune réglementation, norme, critère, recommandation ou directive concernant la concentration de carbone dans les sédiments marins.

La figure 4-28 regroupe les valeurs en pourcentage du carbone total et de l'azote total des échantillons de sédiment (qui n'a pas été traité pour retirer le carbone inorganique) des campagnes 2014 et 2016.

De façon générale, on observe que le carbone et l'azote varient de façon positive avec un rapport C/N autour de 10, en accord avec une source commune probablement marine (C/N entre 4 et 12), avec la valeur la plus élevée en carbone et azote dans le sédiment de surface au site BSI\_2\_1. Les écarts à cette tendance sont de deux types : soit un sédiment enrichi en azote, ce qui est observé seulement pour des échantillons de la campagne 2014; soit un sédiment appauvri en azote, ce que l'on observe pour des sites échantillonnés en 2014 et 2016.

L'enrichissement en azote du sédiment peut être naturel, à partir d'un apport d'une source végétale riche en protéines ou d'une source microbienne dans le sédiment; mais également anthropique par le rejet d'eaux usées qui transporterait de la matière particulaire avec une concentration élevée en azote. Cependant, seul le site P3C est situé près de l'émissaire de la ville de Sept-Îles et le rejet d'eaux usées ne peut expliquer la proportion importante d'azote aux sites R1A, R2C et R4D. Dans la région de Sept-Îles, les engrains chimiques azotés utilisés en agriculture représentent certainement un apport négligeable à la zone d'étude.

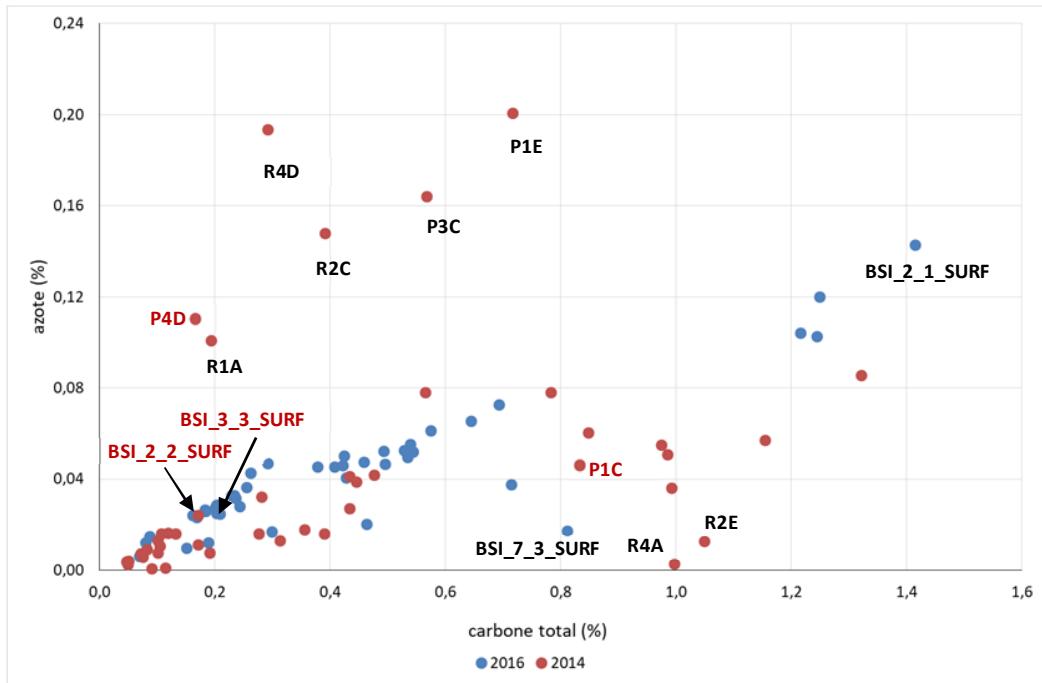


Figure 4-28 : Relation entre les concentrations du carbone total et de l'azote total dans les échantillons de sédiment de surface des campagnes 2014 et 2016

En milieu côtier, un sédiment pauvre en azote peut résulter d'un apport de matière organique riche en cellulose et lignine d'origine terrestre ; ces classes de composés ne contiennent pas d'azote dans leur structure moléculaire, ce qui peut être le cas pour les sites R4A. Il est possible également que la matière organique accumulée dans le sédiment soit fortement dégradée ; les composés organiques riches en azote sont plus facilement dégradables par les bactéries, pendant le séjour des particules dans la colonne d'eau ou une fois déposées sur le sédiment. Le contenu en carbone du sédiment est alors associé à de la matière organique dite réfractaire. Le carbone d'un sédiment pauvre en azote peut également être associé aux carbonates de calcium et magnésium. Le sédiment de surface des sites R2E et BSI\_7\_3\_SURF en sont deux exemples, leur rapport C/N est 95 et 55 respectivement et leur facteur d'enrichissement en calcium est 17 et 7, indiquant une source de calcium autre que les argiles postglaciaires.

La mesure du contenu en carbone du sédiment après l'élimination des carbonates (par traitement à l'acide dilué) permet de distinguer la nature dominante du carbone, soit organique ou inorganique. La figure 4-29 regroupe les résultats pour les échantillons de la campagne 2016. D'une part, quelques sites ont un sédiment dominé par le carbone inorganique; ainsi le carbone du sédiment de surface du site BSI\_7\_3 est inorganique à 88 %, sa concentration en carbone passe de 0,81 % à 0,10 % après l'élimination des carbonates. D'autre part, le sédiment de certains sites est constitué de moitié par du carbone inorganique, par exemple le sédiment de surface du site BSI\_4\_3. Mais pour la majorité des sites de la campagne de 2016, le carbone du sédiment est surtout de nature organique, comme pour le sédiment de surface du site BSI\_2\_1 qui a les concentrations de carbone total (1,4 %) et carbone organique (1,25 %) les plus élevées. L'élimination de la fraction inorganique du carbone total révèle la nature marine de la matière organique du sédiment de l'ensemble des stations, par un rapport C/N moyen de  $10,7 \pm 2,3$  ( $n = 38$ ), alors qu'il est  $12,6 \pm 8,1$  lorsque calculé sur la base du carbone total du sédiment. L'important écart-type de cette valeur moyenne C/N s'explique par une concentration

importante de carbone inorganique, qui résulte en un rapport C/N élevé, dans quelques échantillons, comme pour le sédiment de surface à la station BSI\_7\_3 avec une valeur C/N = 55. En éliminant les carbonates, le rapport C/N s'en trouve diminué; le rapport C/N pour l'échantillon BSI\_7\_3\_SURF, calculé avec les résultats de l'analyse de l'azote et du carbone après traitement du sédiment à l'acide dilué, est de 7,2. Des apports élevés de matière organique d'origine terrestre résulteraient en un rapport C/N > 15 et plus (Rumolo *et al.*, 2011), et le traitement à l'acide changerait peu ce rapport puisque le carbone serait associé aux particules de fibres végétales ou aux substances humiques et non aux carbonates. Pour exemple, le rapport C/N avec le carbone total de la fraction argileuse des sites RSM1 et RSM2 (intérieur rivière Sainte-Marguerite) est 18,3 et 17,8 respectivement, des valeurs dans la gamme d'une signature terrigène, et change peu avec des valeurs C/N de 16,9 et 17,2 après traitement. Les valeurs de carbone total et azote total des quatre sites identifiés précédemment comme contaminés par un enrichissement sévère en plusieurs métaux de leur fraction argileuse, soit BSI\_2\_2, BSI\_3\_3, P1C et P4D, ne se démarquent pas de l'ensemble des échantillons (figure 4-28).

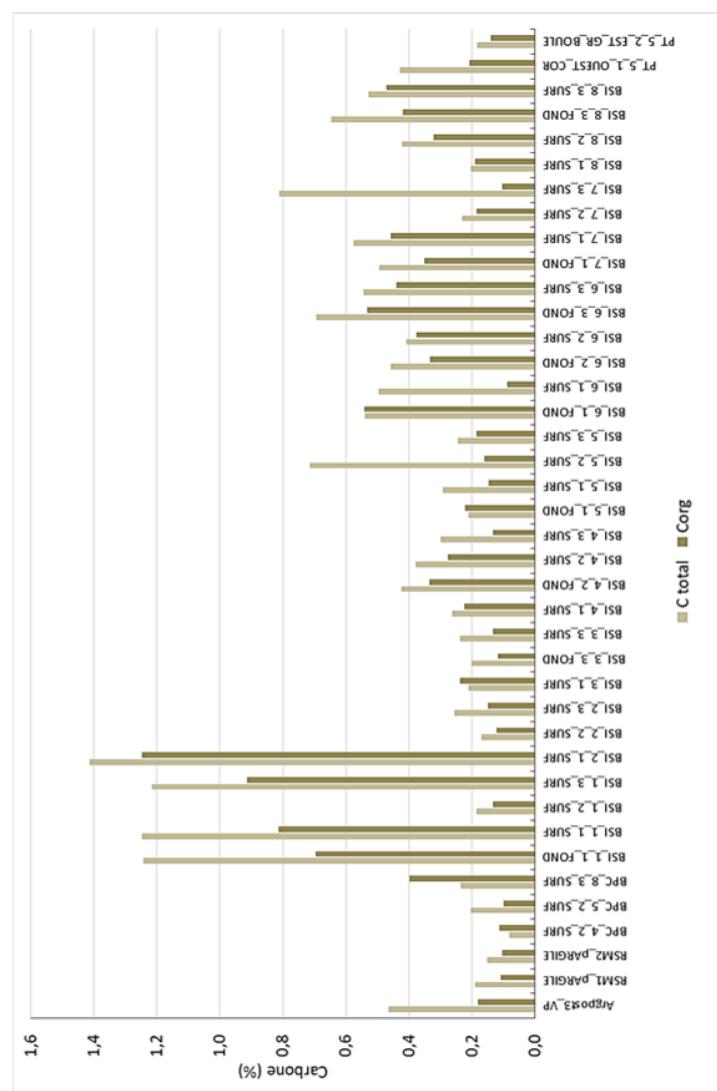


Figure 4-29 : Comparaison de la concentration en carbone (%) dans le sédiment des échantillons de 2016, avant (C total) et après le traitement à l'acide dilué pour éliminer les carbonates (Corg)

L'annexe F présente les rapports des isotopes du carbone et de l'azote (F4-2, F4-3 et F4-4). La mesure du rapport des isotopes stables du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) et de l'azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ) apporte une information supplémentaire sur la nature des sources de la matière carbonée (organique et inorganique), présente dans le sédiment. Dans l'estuaire et le golfe du St-Laurent, la matière organique du sédiment qui a une origine marine a des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  entre 4 ‰ et 10 ‰ et des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  dans la gamme de -20‰ à -26‰ (St-Onge et Hillaire-Marcel, 2001).

La matière organique d'origine terrestre a des valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  entre 1 ‰ et 10 ‰ et des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  dans la gamme de -25 ‰ à -30 ‰ (Rumolo *et al.*, 2011), selon les plantes d'où provient cette matière organique. En milieu aquatique, le phytoplancton est un vecteur important de matière organique vers le sédiment qui est sous la couche photique, alors que les algues unicellulaires benthiques produisent *in situ*, sur la couche de surface du sédiment, de la matière organique si l'intensité lumineuse est suffisante. La valeur  $\delta^{13}\text{C}$  du sédiment dépend alors des espèces d'algues unicellulaires, les algues planctoniques ont des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  surtout autour de -20 à -25 ‰ alors que les algues benthiques marines ont des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  dans la gamme de -16 à -22 ‰ (France, 1995). Des valeurs nettement plus positives de  $\delta^{13}\text{C}$ , c'est-à-dire un carbone enrichi en  $^{13}\text{C}$ , dans la gamme de +1 à -10 ‰, sont associées aux carbonates. Enfin, des valeurs nettement plus négatives de  $\delta^{13}\text{C}$ , donc un carbone appauvri en  $^{13}\text{C}$ , dans la gamme de -30 à -45 ‰, correspondent à une matière organique dégradée ou à des combustibles fossiles (Rumolo *et al.*, 2011).

Les résultats de l'analyse des sédiments non-acidifiés, pour l'ensemble des échantillons de sédiment des campagnes 2014 et 2016, sont rapportés à la figure 4-30. On constate une grande variété de signatures isotopiques, centrées autour de la signature de la matière organique d'origine marine (zone bleutée). Les sédiments avec des valeurs de  $\delta^{13}\text{C} > -10\text{ ‰}$  correspondent aux sites riches en carbonates identifiés précédemment (par exemple R2E et BSI\_7\_3\_SURF) et indique que la station R4A a un aussi un sédiment riche en carbonates, plutôt qu'en matière organique terrestre.

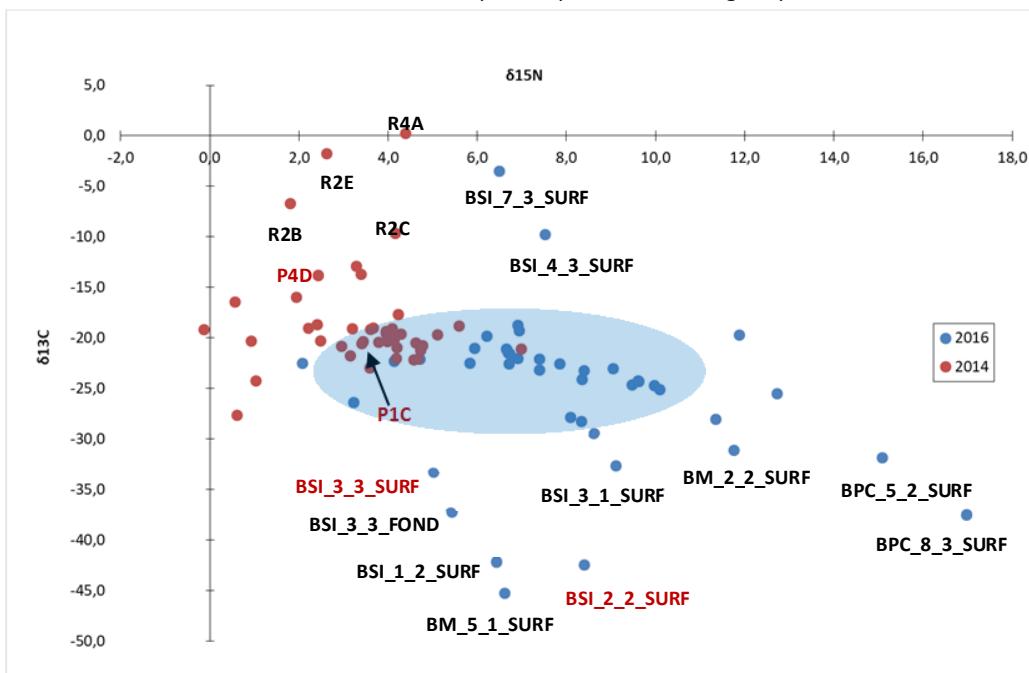


Figure 4-30 : Relation entre les valeurs du rapport des isotopes stables du carbone ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ou  $\delta^{13}\text{C}$ ) et de l'azote ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  ou  $\delta^{15}\text{N}$ ) pour les échantillons de sédiment global des campagnes de 2014 et 2016  
La zone bleue représente le domaine de la matière organique d'origine marine.

Les sites de la baie de Sept-Îles qui ont un sédiment avec une valeur  $\delta^{13}\text{C}$  plus négative ( $< -30\text{\textperthousand}$ ) se regroupent en deux zones avec des valeurs comparables. L'une se retrouve au nord-est de la baie avec une valeur  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-33\text{\textperthousand}$  (BSI\_3\_1 et BSI\_3\_3) et l'autre au sud-ouest de la baie, près des installations portuaires de la compagnie minière Wabush, avec une valeur  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-42\text{\textperthousand}$  (BSI\_1\_2 et BSI\_2\_2). Les produits pétroliers ont des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  plus négatives que  $-30\text{\textperthousand}$ , avec un rapport C/N élevé, mais les résultats de l'analyse des hydrocarbures n'ont pas montré une contamination du sédiment des sites BSI\_1\_2 et BSI\_2\_2 plus importante que les autres sites.

Pour ces quatre sites, la concentration en carbone total est plutôt faible ( $\leq 0,2\%$ ) et le rapport C/N varie entre 8,4 et 8,7 soit dans l'intervalle de la matière organique marine. Les signatures  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-33$  à  $-42\text{\textperthousand}$  correspondent peut-être à une matière organique produite par les algues unicellulaires benthiques, puisque la profondeur à ces stations est de 3 mètres et moins.

Les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  les plus élevées sont obtenues des sédiments de surface de deux sites de la baie de Port-Cartier BPC\_5\_2 et BPC\_8\_3 (figure 4-30). Leur valeur de  $\delta^{13}\text{C}$  est plus négative que  $-30\text{\textperthousand}$  et leur rapport C/N est 9,5 et 8,3 respectivement. L'hypothèse d'une source *in situ* de matière organique par l'activité photosynthétique des algues benthiques est peu probable, en raison de la profondeur de plus de 12 mètres (45 mètres pour le site BPC\_8\_3). Une source animale est possible; les valeurs  $\delta^{15}\text{N}$  augmentent avec la position trophique de l'animal, la production de fèces des espèces benthiques carnivores peut « marquer » isotopiquement le sédiment si la densité de la faune benthique est suffisante. Par contre, les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  sont plus négatives que ce qui est observé habituellement pour une source animale. De telles valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  sont aussi attribuées aux rejets d'eaux usées domestiques; le site BPC\_5\_2 est situé près de la côte dans les limites de la ville, mais le site BPC\_8\_3 est localisé plus au large où l'influence d'un rejet urbain devrait être minime.

Pour un site donné, la signature isotopique  $\delta^{13}\text{C}$  peut évidemment résulter d'un mélange de différentes sources de carbone. Le traitement du sédiment des échantillons de la campagne de 2016, pour éliminer les carbonates, a eu pour effet de réduire la gamme des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  à un intervalle ( $-20\text{\textperthousand}$  à  $-25\text{\textperthousand}$ ) qui correspond à celui de la matière organique d'origine marine (figure 4-31).

Les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  les plus positives et les plus négatives sont estompées (par exemple pour l'échantillon BSI\_7\_3\_SURF et BSI\_1\_2\_SURF). L'élimination de la signature  $\delta^{13}\text{C}$  associée aux carbonates (qui tend vers 0) s'explique simplement par le dégazage du  $\text{CO}_2$  formé par la réaction de l'acide avec l'ion carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ).

Par contre, le changement d'une valeur très négative  $\delta^{13}\text{C} = -42\text{\textperthousand}$  à une valeur plus positive à  $-25\text{\textperthousand}$  est plus difficile à expliquer. Le carbone qui est appauvri en  $^{13}\text{C}$  doit être dégazé du sédiment sous l'action de l'acide sur les molécules qui sont constituées de ce carbone. La nature de ces molécules devra être définie.

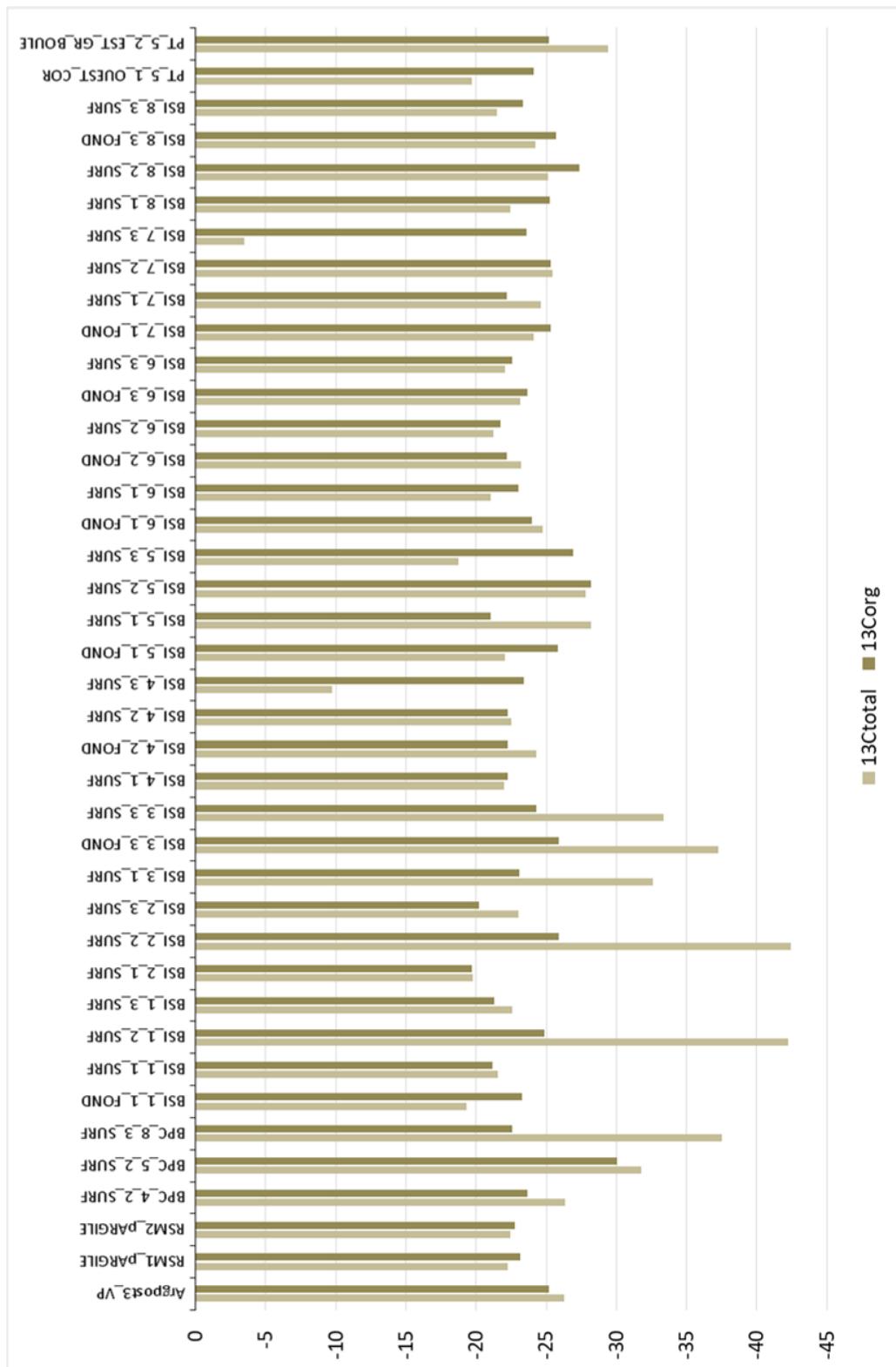


Figure 4-31 : Comparaison de la signature du rapport des isotopes stables du carbone  $\delta^{13}\text{C}$  dans le sédiment des échantillons de 2016, avant ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{total}}$ ) et après le traitement à l'acide dilué pour éliminer les carbonates ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ )

## 4.3 Constats et recommandations de la Partie I

### 4.3.1.1 Partie I : Portrait général

L'étude de la qualité des sédiments a été réalisée à travers trois campagnes d'échantillonnage effectuées en 2013, 2014 et 2016. Les deux campagnes de 2013 et 2014 ont permis d'obtenir des données de base essentielles afin d'établir un portrait préliminaire. Le but spécifique de la troisième campagne de prélèvements (juin à août 2016) était de compléter et de raffiner le portait des impacts des activités humaines sur le milieu.

Au cours des échantillonnages des stations de suivi de qualité des sédiments en 2013, 2014, 2016 et 2017, ce sont 19 428 données qui ont été récoltées.

Parmi ces données, 12,08% disposent d'un ou de critère(s) de qualité et/ou recommandation(s) canadienne(s) (figure 4-32). Dans l'ensemble des données, 87,92% respectent ces critères et 1,59 % ne respectent pas les critères de qualité ou recommandations canadiennes.

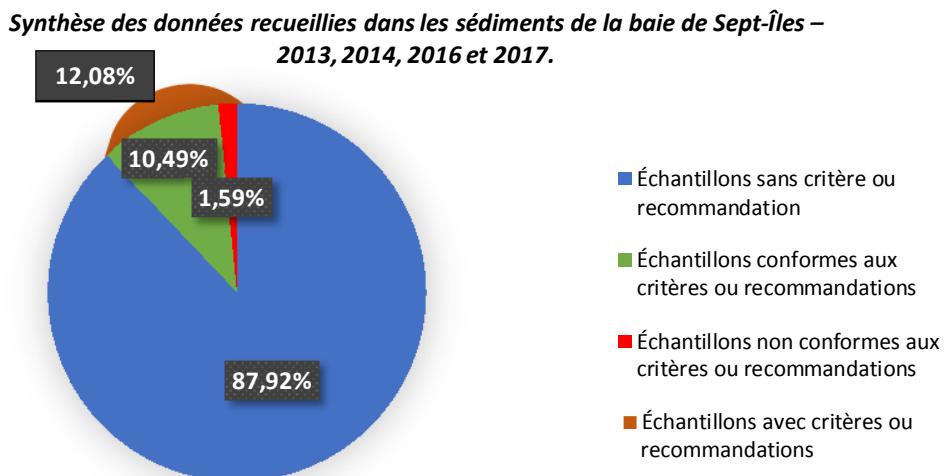
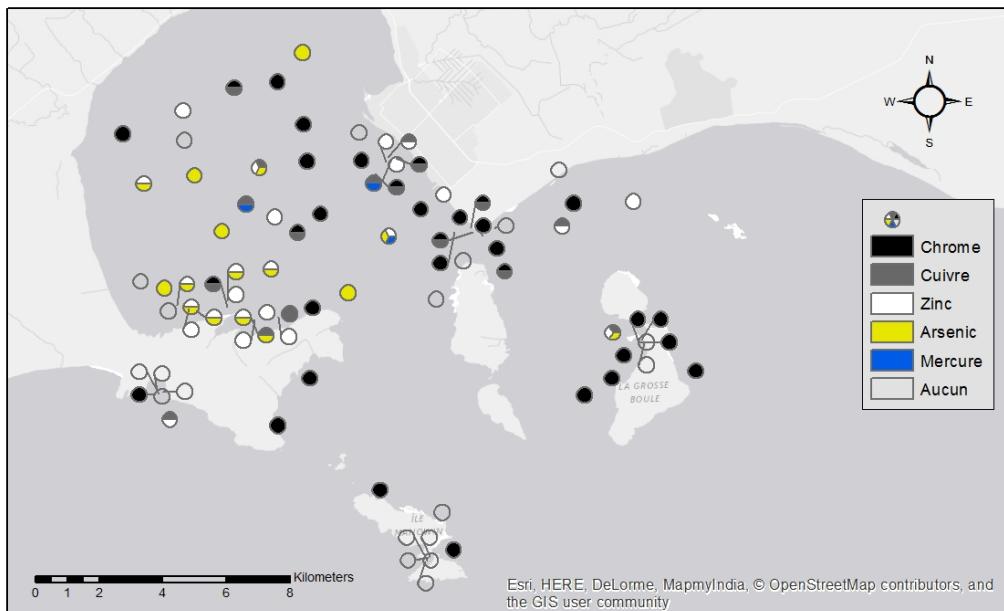


Figure 4-32 : Synthèse des données recueillies dans les sédiments de la baie de Sept-Îles – 2013, 2014, 2016 et 2017.

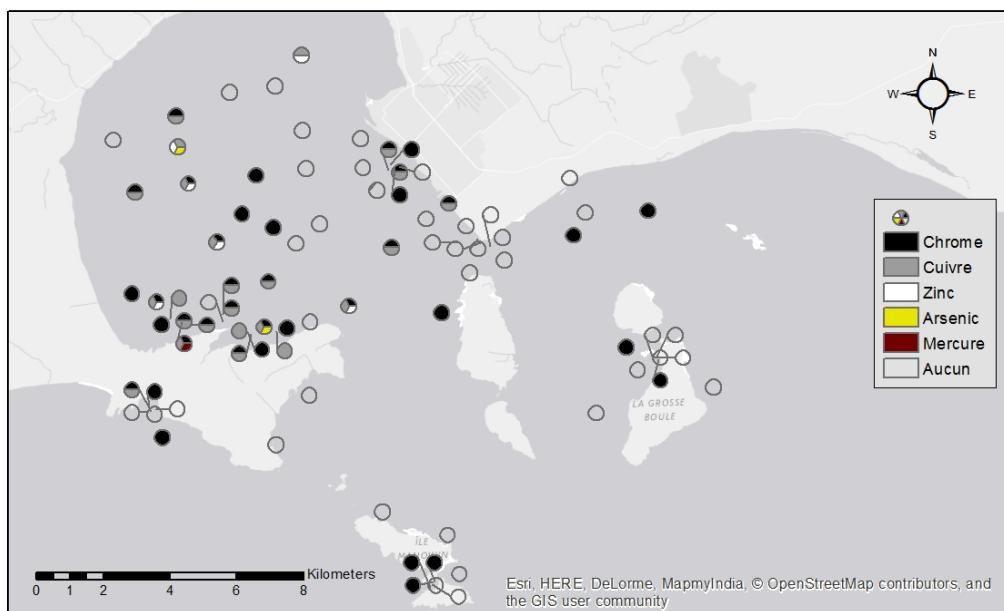
Le tableau 4-19 présente un résumé des résultats obtenus (le tableau est présenté à la fin de la section). Il est à souligner que les données et résultats analytiques représentent les conditions prévalant lors de l'échantillonnage.

Rappelons qu'un contaminant est une substance dont la concentration dans l'environnement dépasse les teneurs naturelles observées dans le milieu sous étude. Le contaminant devient un polluant lorsque sa concentration atteint un seuil qui peut possiblement causer des perturbations aux organismes vivants les plus sensibles du milieu impacté. Il est donc important d'établir un critère de contamination et un critère de pollution.

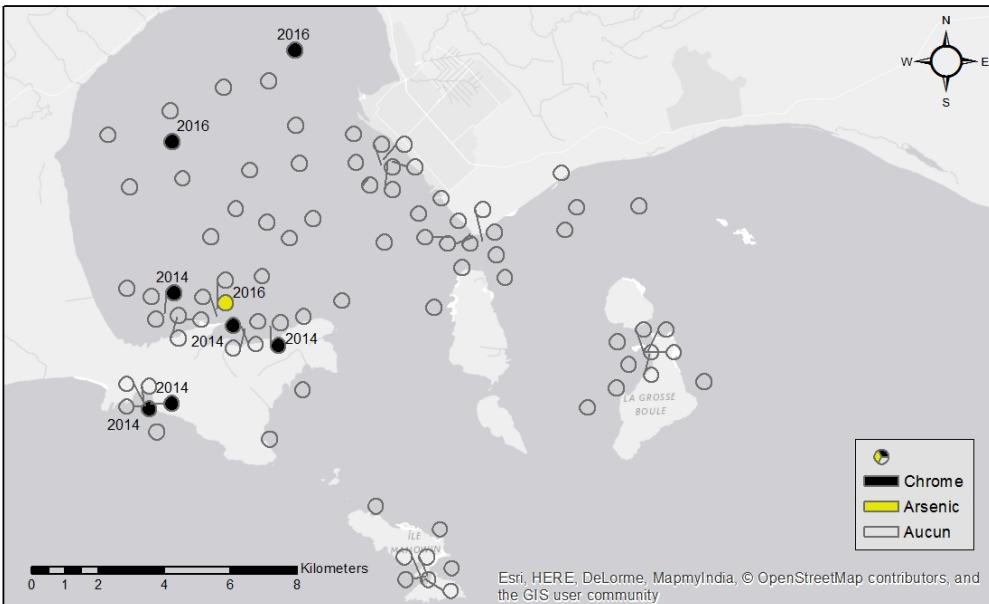
Pour les métaux, l'analyse des argiles postglaciaires de la région de Sept-Îles a permis d'établir des critères seuils pour établir un niveau d'enrichissement (ou de contamination) pour chacun des huit métaux normés (chrome, nickel, cuivre, zinc, arsenic, cadmium, mercure et plomb) dans tous les échantillons prélevés dans la baie de Sept-Îles et ses alentours (figures 4-33, 4-34 et 4-35).



*Figure 4-33 : Concentration d'effets rares (CER) des métaux normalisés, Métaux dont la concentration mesurée est au seuil normalisé d'effets rares (MDDELCC) ; Lorsque plus d'un métal est au seuil de concentration d'effets rares à une station, les métaux sont représentés par les parts divisées dans un même point.*



*Figure 4-34 : Concentration seuil produisant un effet (CSE) des métaux normalisés, Métaux dont la concentration mesurée est au seuil normalisé produisant un effet (MDDELCC)*



*Figure 4-35 : Métaux dont la concentration mesurée est au seuil normalisé produisant un effet (MDDELCC), Concentration d'effets occasionnels (CEO) des métaux normalisés*

En appliquant à la fois le critère de concentration qui permet d'obtenir une gradation des effets et la normalisation avec le fer pour obtenir un facteur d'enrichissement, nous avons pu préciser l'état de la contamination des sédiments de la baie.

La première constatation est que le chrome, le cuivre, le nickel, le zinc et le plomb ne dépassent pas les teneurs naturelles des argiles postglaciaires, malgré une concentration dans le sédiment souvent supérieure au critère CSE dans le cas du chrome, surtout pour le sédiment de surface. Cependant, l'arsenic, le cadmium et le mercure ont des facteurs d'enrichissement qui atteignent ou dépassent le seuil d'un sédiment modérément contaminé.

Dans la fraction argile des sédiments de surface, ces éléments, reconnus pour leur toxicité, ont leur concentration qui dépasse nettement leur critère CSE, jusqu'à dépasser par un facteur six le critère le plus sévère (CEF) dans le cas du mercure dans la fraction argile de l'échantillon prélevé en 2014 près du quai de la minière IOC (P4D2014). Les sites échantillonnés près des installations des minières Cliffs (à l'époque) et IOC Rio Tinto (BSI\_2\_2 et P4D2014 respectivement) révèlent les concentrations les plus élevées pour l'arsenic, le cadmium et le mercure dans la fraction argile. Ces deux sites présentent également les facteurs d'enrichissement du fer les plus élevés, c'est-à-dire que la concentration en fer dépasse les teneurs naturelles des argiles postglaciaires. Les deux autres sites qui représentent une contamination importante de leur fraction argileuse par les métaux avec critères établis sont BSI\_3\_3 et P1C. Ces quatre sites (P1C, P4D, BSI\_2\_2 et BSI\_3\_3), par leur contenu en métaux de leur fraction argileuse, représentent les zones de la baie de Sept-Îles qui doivent recevoir une attention particulière. Bien que les concentrations en métaux du sédiment global de ces sites soient en général plus faibles que dans leur fraction argileuse, le fait que cette fraction argileuse soit enrichie en certains métaux par rapport aux argiles postglaciaires démontre un processus de contamination des particules les plus fines qui sédimentent à ces endroits précis, celles les plus susceptibles d'être captées par la faune marine. Les différents indices géochimiques utilisés (comme le rapport  $100(\text{Ti}/\text{Al})$ ) montrent que les particules de taille de  $2 \mu\text{m}$  et moins du sédiment de ces quatre sites ont des caractéristiques qui les

démarquent des particules de taille semblable des autres sites. La source de ces particules reste à confirmer.

L'arsenic, le cadmium et le mercure sont à surveiller; en revanche, le molybdène est le métal qui présente les facteurs d'enrichissement dans le sédiment les plus élevés. Sa source peut être naturelle, mais son utilisation dans plusieurs domaines industriels représente un potentiel d'émission anthropique dans la baie de Sept-Îles. Il serait pertinent d'établir la liste des produits qui contiennent du molybdène qu'utilisent les différentes industries.

Le trafic maritime dans la baie de Sept-Îles n'a pas entraîné la contamination persistante du sédiment par le biocide à base d'étain maintenant interdit dans la peinture de la coque des navires, le tributylétain (TBT). Cependant, la méthode analytique utilisée pour le quantifier nous a permis de détecter, dans la fraction argileuse des cinq échantillons testés pour le TBT, un composé organique du plomb qui s'apparente au tétraéthylplomb. Sa présence est plus forte dans le sédiment des sites P1C et P4D que dans le sédiment des sites BSI\_2\_2 et BSI\_3\_3. La nature de ce composé du plomb doit être confirmée, puisque sa toxicité est plus importante que le plomb inorganique et que cela permettrait d'identifier la source la plus probable.

Les résultats obtenus de l'analyse du sédiment pour les hydrocarbures linéaires indiquent une faible contamination de la baie, sans révéler de teneurs particulièrement élevées dans les sites près des zones à forte activités industrielles comparativement aux sites considérés non-impactés. En effet, les sites de référence îles Corossol (PT\_5\_1) et Grosse Boule (PT\_5\_2), baie Manitou (BM), rivière Pentecôte (PTRP) et rivière Sainte-Marguerite (RSM) présentent des teneurs en hydrocarbures qui dépassent à quelques reprises les concentrations mesurées dans la baie.

L'apport des hydrocarbures aliphatiques (alcanes) au sédiment ne semblent pas avoir fluctué beaucoup dans le temps, puisque les concentrations dans la couche de surface et la couche du fond sont comparables à la plupart des sites, à l'exception du site BSI\_3\_3 qui contient six fois plus d'alcanes dans sa couche de surface.

Pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), la concentration totale la plus élevée, mais sous le seuil d'un sédiment peu contaminé, est rapportée dans le sédiment de surface pour le site BSI\_1\_3 situé près des installations de l'aluminerie Alouette. Par contre, la deuxième concentration la plus élevée se retrouve au site à l'ouest de l'île Corossol.

Les sources de HAP, selon deux indices diagnostics, sont d'origine pyrogénique et se partageraient entre des émissions associées à la combustion des combustibles solides (bois, charbon) et la combustion de combustibles liquides (diésel).

Comme pour la campagne de 2014, ce sont les HAP acénaphthène et dibenzo(a,h)anthracène qui dépassent à plusieurs reprises le critère de concentration seuil produisant un effet sur la faune marine. Cependant, c'est dans les sédiments prélevés à rivière Pentecôte que le dépassement est le plus important. Toutefois, la source du dibenzo(a,h)anthracène est peut être naturelle.

Le contenu en carbone total du sédiment serait un facteur non-négligeable dans le processus de transport des hydrocarbures vers le milieu benthique ; on observe, pour les échantillons de la campagne 2016, une augmentation de la concentration des hydrocarbures avec le pourcentage de carbone dans les échantillons.

La figure 4-36 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) totaux réelles mesurées aux stations.

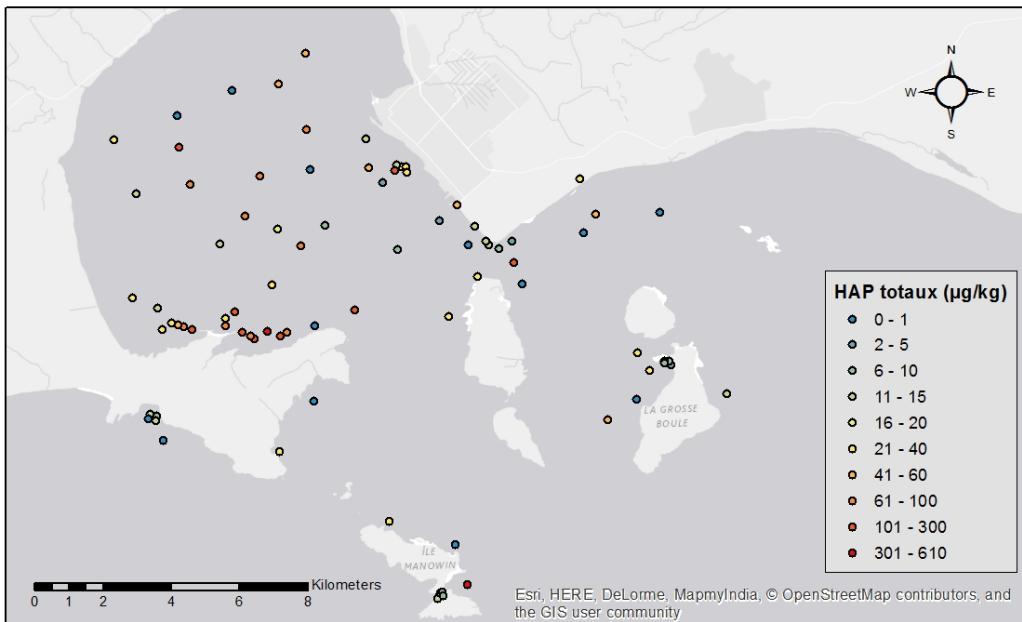


Figure 4-36 : Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) totaux, Concentrations en hydrocarbures aromatiques polycycliques totaux ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) aux stations et représentées par classes de concentration

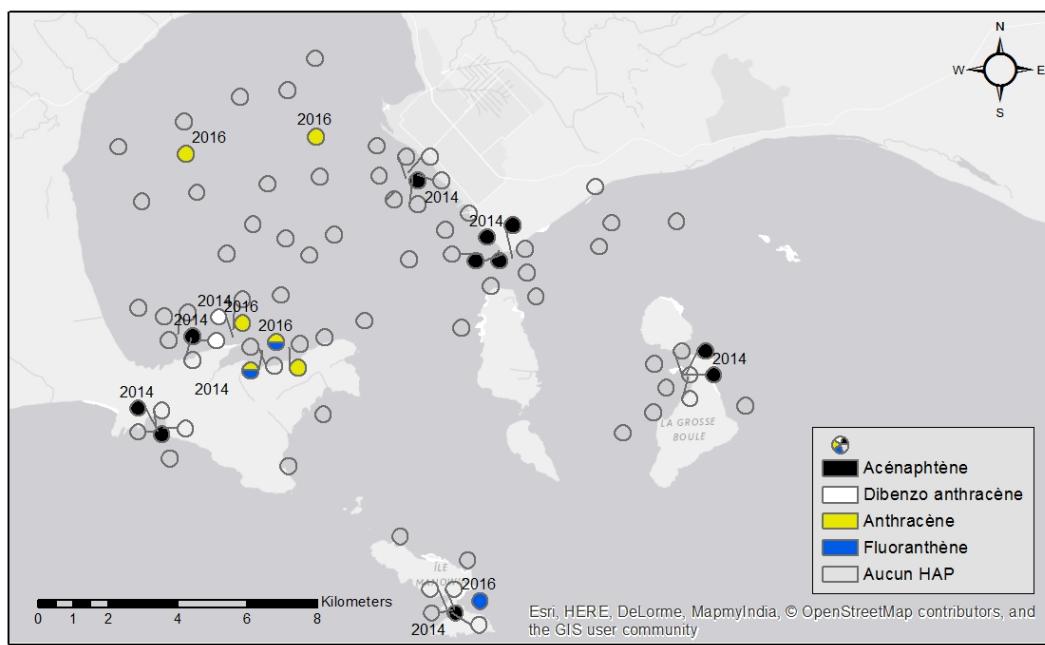


Figure 4-37: Concentration d'effets rares (CER) des seuils normalisés de concentration en hydrocarbures ; Hydrocarbures aromatiques polycycliques dont la concentration mesurée est au seuil normalisé d'effets rares (MDDELCC) ; Lorsque plus d'un métal est au seuil de concentration d'effets rares à une station, les métaux sont représentés par des parts divisées dans un même point.

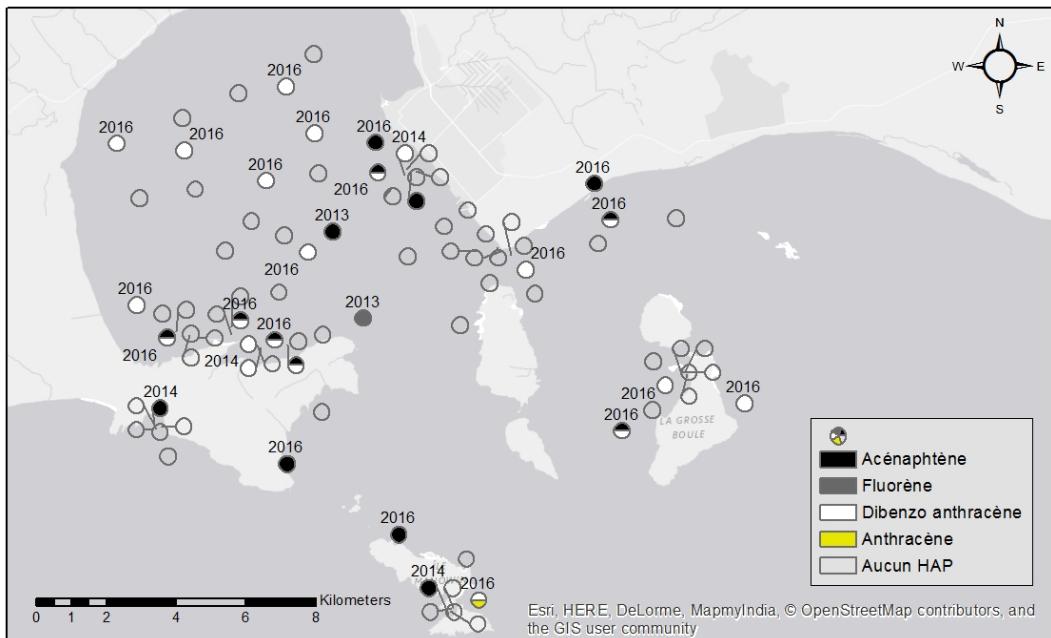


Figure 4-38: Concentration seuil produisant un effet (CSE) des seuils normalisés de concentration en hydrocarbures ; Hydrocarbures aromatiques polycycliques dont la concentration mesurée est au seuil normalisé produisant un effet (MDDELCC)

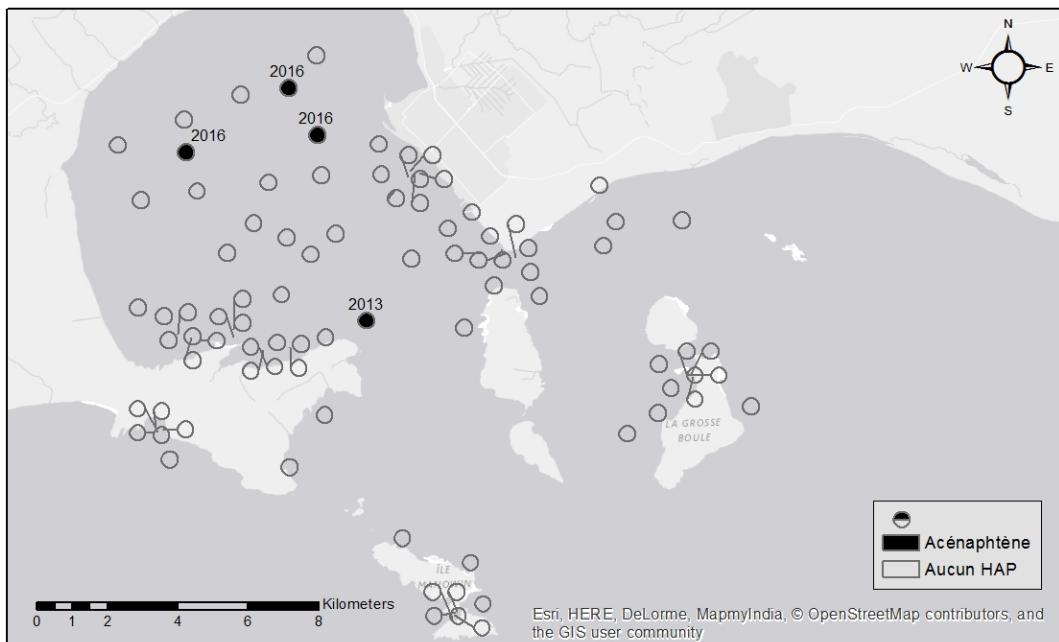


Figure 4-39 : Concentration d'effets occasionnels (CEO) des seuils normalisés de concentration en hydrocarbures ; Hydrocarbures aromatiques polycycliques dont la concentration mesurée est au seuil normalisé d'effets occasionnels (MDDELCC)

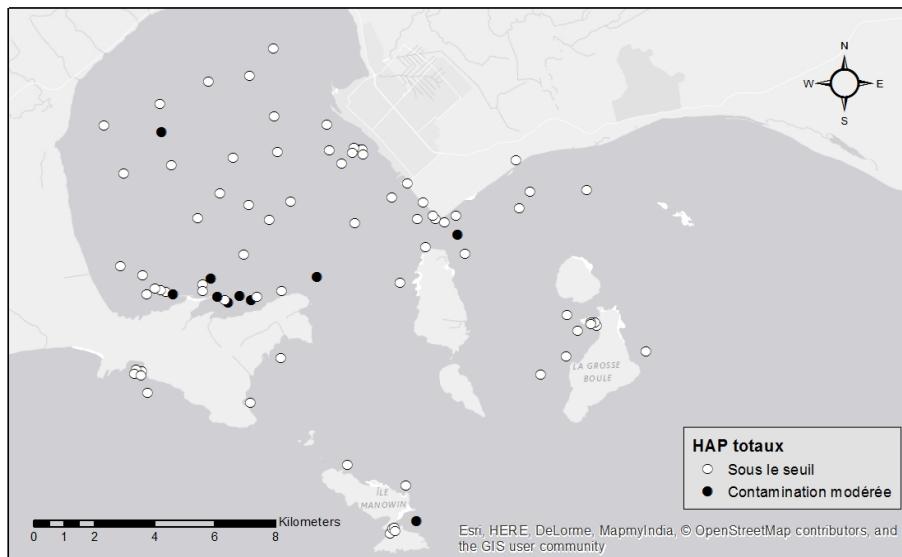


Figure 4-40 : Seuil de contamination modérée en HAP totaux ; Stations où la concentration en hydrocarbures aromatiques polycycliques totaux est sous le seuil de contamination et au-dessus du seuil pour une contamination modérée (Mora et al. 2010)

Selon les résultats de l'analyse des isotopes stables des échantillons des campagnes 2014 et 2016, la source principale de carbone et d'azote pour le sédiment de surface serait la matière organique d'origine marine. L'exception serait le sédiment des sites de la baie de Port-Cartier BPC\_5\_2 et BPC\_8\_3 dont la source de matière organique reste à confirmer. La matière organique marine peut être produite par les processus biologiques dans la baie de Sept-Îles (littoral, colonne d'eau, milieu benthique) ou être importée du golfe par les courants marins. Une stratégie applicable pour distinguer les sources externes à la baie de la matière organique serait de capter les particules en suspension à l'aide de pièges à sédiment placés selon un gradient spatial de la baie vers le large. Cela permettrait également de mesurer les métaux (notamment l'arsenic qui est assimilé naturellement par le phytoplancton lors de la production primaire) et les hydrocarbures associés à cette matière organique d'origine marine importée.

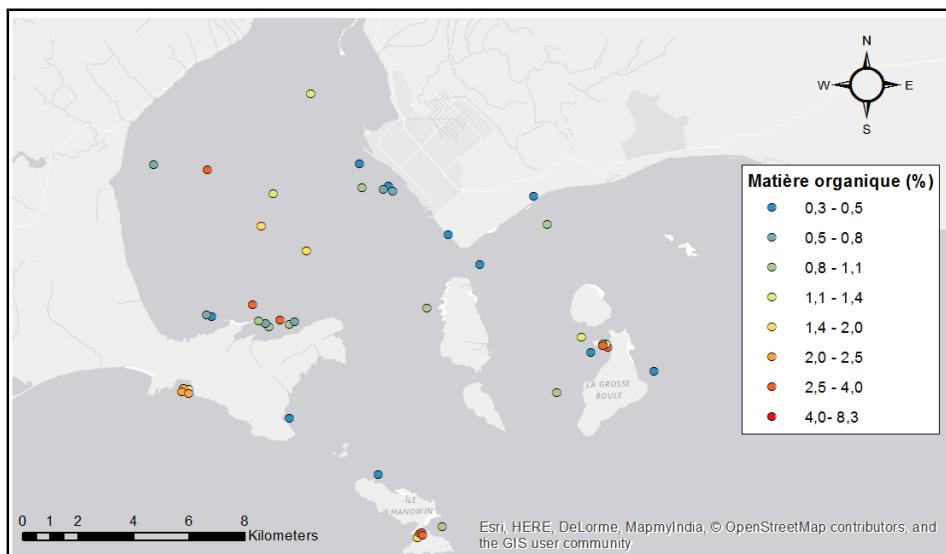


Figure 4-41 : Matière organique ; Pourcentage de matière organique contenu dans les sédiments des stations échantillonées, représenté par classes de pourcentages

La phase III a (campagne 2016) du projet de l'étude de la qualité du sédiment de la baie de Sept-Îles a permis d'établir que la proportion des argiles dans le sédiment est un indicateur de la présence des métalloïdes et métaux qui présentent un risque de pollution (surtout arsenic, cadmium, mercure et molybdène) et que la teneur en carbone total (exprimée en pourcentage) serait un indicateur de la présence des hydrocarbures à des concentrations plus élevées. Ceci est en accord avec les cartes de la distribution de la matière organique (figure 4-41) dont les valeurs plus élevées concordent assez bien avec les concentrations plus élevées de contaminants.

La caractérisation des argiles postglaciaires établit des valeurs naturelles de référence qui pourront servir comme critère seuil de contamination dans les études futures. Il est fortement recommandé de rencontrer les autorités gouvernementales tant au niveau provincial que fédéral afin d'établir des critères basés sur les caractéristiques géologiques de la Côte-Nord.

Dans cet esprit, pour obtenir un inventaire plus précis des sources anthropiques potentielles, il serait pertinent de caractériser chimiquement les principaux vracs transbordés aux différents quais du port de Sept-Îles. Cela constituerait en quelque sorte une librairie de signatures chimiques qui pourra être consultée pour valider la contribution, ou l'absence de contribution, d'un produit en particulier à la composition chimique des sédiments.

Finalement, la caractérisation chimique des sédiments de la baie de Sept-Îles, lors des trois phases, a permis d'établir un portrait de la qualité des sédiments. Le potentiel de transfert des contaminants vers la faune benthique est discuté dans le chapitre 5.

*Tableau 4-19 : Résumé de l'ensemble des données recueillies pour les stations de suivi*

| Paramètres                                  | Nombre de données prélevées | Critères pour la qualité des sédiments marins et/ou recommandations canadiennes pour la qualité des sédiments marins | % des données rencontrant les critères ou recommandations | Nombre de valeurs dépassant les critères ou recommandations | Constats et recommandations                                  | Références section |
|---|-----------------------------|--|---|---|--|--------------------|
| <i>Hydrocarbures alytaphiques (alcanes)</i> |                             |  |   |   |  |                    |
| C10-C50                                     | 2342                        | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 1248 valeurs non détectées (NF/ND) et 30 valeurs sont LOQ    | 4.2.4.1            |
| <i>Matière organique et isotopes</i>        |                             |  |   |   |  |                    |
| C/N   | 166                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 20 valeurs non déterminées (ND), 3 valeurs NS et 3 réplicats | 4.2.5              |
| %C  | 166                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 18 valeurs non déterminées (ND) et 3 réplicats               | 4.2.5              |
| %N  | 166                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 17 valeurs non déterminées (ND) et 3 réplicats               | 4.2.5              |
| $\delta^{15}\text{N}/\text{14N}$            | 141                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 17 valeurs non déterminées (ND) et 3 réplicats               | 4.2.5              |
| $\delta^{13}\text{C}/\text{12C}$            | 141                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 18 valeurs non déterminées (ND) et 3 réplicats               | 4.2.5              |
| C mg  | 50                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 9 valeurs NS   | 4.2.5              |
| N mg  | 50                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 8 valeurs NS   | 4.2.5              |

N/D : non déterminé

N/S : non significative

N/A : non applicable

N/F : non détecté, sous la limite de détection

LOQ : résultat sous la limite de quantification

C : carbone

N : azote

%C : contenu en carbone des sédiments

%N : contenu en azote des sédiments

C/N : rapport carbone sur azote

$\delta^{15}\text{N}/\text{14N}$  : rapport des isotopes stables de l'azote

$\delta^{13}\text{C}/\text{12C}$  : rapport des isotopes stables du carbone

| Paramètres                   | Nombre de données prélevées | Critères pour la qualité des sédiments marins et/ou recommandations canadiennes pour la qualité des sédiments marins | % des données rencontrant les critères ou recommandations | Nombre de valeurs dépassant les critères ou recommandations | Constats et recommandations | Références section |
|------------------------------|-----------------------------|--|---|---|-----------------------------|--------------------|
| <b>Granulométrie</b>         |                             |  |   |   |                             |                    |
| Granulométrie                | 9900                        | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.1              |
| <b>Métaux et métalloïdes</b> |                             |  |   |   |                             |                    |
| Aluminium                    | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Antimoine                    | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Argent                       | 65                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 2 valeurs sont N/D          | 4.2.3.2            |
| Arsenic                      | 129                         | CER : 4,3 mg/kg, CSE : 7,2 mg/kg, CEO : 19 mg/kg, CEP : 42 mg/kg, CEF : 150 mg/kg                                    | 84,50%  | 16 (CER) ; 3 (CSE) ; 1 (CEO)                                |                             | 4.2.3.1            |
| Baryum                       | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Béryllium                    | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Bismuth                      | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Bore                         | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Cadmium                      | 129                         | CER : 0,32 mg/kg, CSE : 0,67 mg/kg, CEO : 2,1 mg/kg, CEP : 4,2 mg/kg, CEF : 7,2 mg/kg                                | 100%  | 0   |                             | 4.2.3.1            |
| Calcium                      | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Chrome                       | 129                         | CER : 30 mg/kg, CSE : 52 mg/kg, CEO : 96 mg/kg, CEP : 160 mg/kg, CEF : 290 mg/kg                                     | 27,91%  | 38 (CER) ; 45 (CSE) ; 10 (CEO)                              |                             | 4.2.3.1            |
| Césium                       | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Cuivre                       | 129                         | CER : 11 mg/kg, CSE : 19 mg/kg, CEO : 42 mg/kg, CEP : 110 mg/kg, CEF : 230 mg/kg                                     | 63,57%  | 22 (CER) ; 25 (CSE)   |                             | 4.2.3.1            |
| Cobalt                       | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Étain                        | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Fer                          | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Gallium                      | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Germanium                    | 48                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Indium                       | 65                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Lithium                      | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Magnésium                    | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Manganèse                    | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Mercure                      | 129                         | CER : 0,051 mg/kg, CSE : 0,13 mg/kg, CEO : 0,29 mg/kg, CEP : 0,7 mg/kg, CEF : 1,4 mg/kg                              | Entre 93,80 % et 96,12 %                                  | 4 (CER) ; 1 (CSE)   | 3 valeurs sont N/D          | 4.2.3.1            |
| Molybdène                    | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Nickel                       | 129                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Plomb                        | 129                         | CER : 18 mg/kg, CSE : 30 mg/kg, CEO : 54 mg/kg, CEP : 110 mg/kg, CEF : 180 mg/kg                                     | 100%  | 0   |                             | 4.2.3.1            |
| Potassium                    | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Rubidium                     | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Sélénium                     | 48                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Sodium                       | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Strontium                    | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Thallium                     | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Titane                       | 73                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Uranium                      | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Vanadium                     | 113                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |                             | 4.2.3.2            |
| Zinc                         | 129                         | CER : 70 mg/kg, CSE : 120 mg/kg, CEO : 180 mg/kg, CEP : 270 mg/kg, CEF : 430 mg/kg                                   | 74,42%  | 23 (CER) ; 10 (CSE)   |                             | 4.2.3.1            |

N/D : non déterminé

N/A : non applicable

N/F : non détecté, sous la limite de détection

LOQ : résultat sous la limite de quantification

CER : Concentration d'effets rares

CSE : Concentration seuil produisant un effet

CEO : Concentration produisant un effet probable (déblais de dragage)

| Paramètres   | Nombre de données prélevées | Critères pour la qualité des sédiments marins et/ou recommandations canadiennes pour la qualité des sédiments marins | % des données rencontrant les critères ou recommandations | Nombre de valeurs dépassant les critères ou recommandations | Constats et recommandations  | Références section |
|--|-----------------------------|--|---|---|--|--------------------|
| <i>Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)</i> |                             |  |   |   |  |                    |
| 5-Méthylchrysène                                     | 65                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 20 valeurs non détectées (NF) et 2 valeurs LOQ   | 4.2.4.2            |
| 1-Méthynaphtalène                                    | 51                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 51 valeurs non détectées (NF)  | 4.2.4.2            |
| 2-Méthynaphtalène                                    | 51                          | CER : 16 µg/kg, CSE : 20 µg/kg, CEO : 63 µg/kg, CEP : 200 µg/kg, CEF : 380 µg/kg                                     | 100%  | 0   | 51 valeurs non détectées (NF). La limite de détection utilisée étant de 0,8 µg/kg, les valeurs ne peuvent donc pas dépasser les critères de qualité existant.  | 4.2.4.2            |
| Acénaphthène   | 116                         | CER : 3,7 µg/kg, CSE : 6,7 µg/kg, CEO : 21 µg/kg, CEP : 89 µg/kg, CEF : 940 µg/kg                                    | 35%   | 15 (CER) ; 25 (CSE) ; 11 (CEO) ; 1 (CEP)                    | 17 valeurs non détectées (NF) et 19 valeurs LOQ. La limite de détection utilisée étant de 0,4 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. La limite de quantification étant de 2 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. | 4.2.4.2            |
| Acénaphthylène                                       | 116                         | CER : 3,3 µg/kg, CSE : 5,9 µg/kg, CEO : 31 µg/kg, CEP : 130 µg/kg, CEF : 340 µg/kg                                   | 100%  | 0   | 48 valeurs non détectées (NF) et 24 valeurs LOQ. La limite de détection utilisée étant de 0,4 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. La limite de quantification étant de 2 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. | 4.2.4.2            |
| Anthracène   | 116                         | CER : 16 µg/kg, CSE : 47 µg/kg, CEO : 110 µg/kg, CEP : 240 µg/kg, CEF : 1100 µg/kg                                   | 93,97%  | 6 (CER) ; 1 (CSE)   | 16 valeurs non détectées (NF) et 23 valeurs LOQ. La limite de détection utilisée étant de 0,4 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. La limite de quantification étant de 2 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. | 4.2.4.2            |
| Benzo(a)anthracène                                   | 116                         | CER : 27 µg/kg, CSE : 75 µg/kg, CEO : 280 µg/kg, CEP : 690 µg/kg, CEF : 1900 µg/kg                                   | 97,41%  | 3 (CER)   | 46 valeurs non détectées (NF) et 2 valeurs LOQ. La limite de détection utilisée étant de 0,4 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. La limite de quantification étant de 2 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse.  | 4.2.4.2            |
| Benzo(b,k,j)fluoranthène                             | 65                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 1 valeur non détectée (NF) et 16 valeurs LOQ   | 4.2.4.2            |
| Benzo(b)fluoranthène                                 | 51                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 5 valeurs non détectées (NF)   | 4.2.4.2            |
| Benzo(k)fluoranthène                                 | 51                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 37 valeurs non détectées (NF)  | 4.2.4.2            |
| Benzo(g,h,i)perilène                                 | 51                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 28 valeurs non détectées (NF)  | 4.2.4.2            |
| Benzo(a)pyrène                                       | 116                         | CER : 34 µg/kg, CSE : 89 µg/kg, CEO : 230 µg/kg, CEP : 760 µg/kg, CEF : 1700 µg/kg                                   | 99,14%  | 1 (CER)   | 17 valeurs non détectées (NF) et 17 valeurs LOQ. La limite de détection utilisée étant de 0,4 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. La limite de quantification étant de 2 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. | 4.2.4.2            |

N/D : non déterminé

N/A : non applicable

N/F : non détecté, sous la limite de détection

LOQ : résultat sous la limite de quantification

CER : Concentration d'effets rares

CSE : Concentration seuil produisant un effet

CEO : Concentration produisant un effet probable (déblais de dragage)

| Paramètres   | Nombre de données prélevées | Critères pour la qualité des sédiments marins et/ou recommandations canadiennes pour la qualité des sédiments marins | % des données rencontrant les critères ou recommandations | Nombre de valeurs dépassant les critères ou recommandations | Constats et recommandations  | Références section |
|--|-----------------------------|--|---|---|--|--------------------|
| <b>Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)</b> |                             |  |   |   |  |                    |
| Chrysène   | 116                         | CER : 37 µg/kg, CSE : 110 µg/kg, CEO : 300 µg/kg, CEP : 850 µg/kg, CEF : 2200 µg/kg                                  | 98,28%  | 2 (CER)   | 6 valeurs non détectées (NF) et 15 valeurs LOQ. La limite de détection utilisée étant de 0,4 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. La limite de quantification étant de 2 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse.  | 4.2.4.2            |
| Cyclopenta(c,d)pyrène                                | 65                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 10 valeurs non détectées (NF) et 9 valeurs LOQ   | 4.2.4.2            |
| Dibenzo(a,h)anthracène                               | 116                         | CER : 3,3 µg/kg, CSE : 6,3 µg/kg, CEO : 43 µg/kg, CEP : 140 µg/kg, CEF : 200 µg/kg                                   | 67,24%  | 2 (CER); 35 (CSE); 1 (CEO)                                  | 18 valeurs non détectées (NF) et 22 valeurs LOQ. La limite de détection utilisée étant de 0,4 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. La limite de quantification étant de 2 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. | 4.2.4.2            |
| Dibenzo-ae-pyrène                                    | 40                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |  | 4.2.4.2            |
| Diphenzo-ah-pyrène                                   | 40                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |  | 4.2.4.2            |
| Dibenzo-pyrène                                       | 40                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   |  | 4.2.4.2            |
| Fluoranthène   | 116                         | CER : 27 µg/kg, CSE : 110 µg/kg, CEO : 500 µg/kg, CEP : 1500 µg/kg, CEF : 4200 µg/kg                                 | 98,28%  | 2 (CER)   | 22 valeurs non détectées (NF) et 14 valeurs LOQ. La limite de détection utilisée étant de 0,4 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. La limite de quantification étant de 2 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. | 4.2.4.2            |
| Fluorène   | 116                         | CER : 10 µg/kg, CSE : 21 µg/kg, CEO : 61 µg/kg, CEP : 140 µg/kg, CEF : 1200 µg/kg                                    | 99,14%  | 1 (CSE)   | 51 valeurs non détectées (NF) et 22 valeurs LOQ. La limite de détection utilisée étant de 0,4 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. La limite de quantification étant de 2 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. | 4.2.4.2            |
| Indeno(1,2,3-cd)pyrène                               | 116                         | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 39 valeurs non détectées (NF)  | 4.2.4.2            |
| Méthylchrysène                                       | 51                          | Aucun critère ni recommandation  | N/A   | N/A   | 51 valeurs non détectées (NF)  | 4.2.4.2            |
| Naphtalène   | 116                         | CER : 17 µg/kg, CSE : 35 µg/kg, CEO : 120 µg/kg, CEP : 390 µg/kg, CEF : 1200 µg/kg                                   | 100%  | 0   | 33 valeurs non détectées (NF) et 24 valeurs LOQ. La limite de détection utilisée étant de 0,4 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. La limite de quantification étant de 2 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. | 4.2.4.2            |
| Phénanthrène   | 116                         | CER : 23 µg/kg, CSE : 87 µg/kg, CEO : 250 µg/kg, CEP : 540 µg/kg, CEF : 2100 µg/kg                                   | 97,41%  | 3 (CER)   | 7 valeurs non détectées (NF) et 16 valeurs LOQ. La limite de détection utilisée étant de 0,4 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse. La limite de quantification étant de 2 µg/kg, aucune valeur obtenue ne la dépasse.  | 4.2.4.2            |

N/D : non déterminé

N/A : non applicable

N/F : non détecté, sous la limite de détection

LOQ : résultat sous la limite de quantification

CER : Concentration d'effets rares

CSE : Concentration seuil produisant un effet

CEO : Concentration produisant un effet probable (déblais de dragage)

## 4.4 Partie II : Sources potentielles de l'arsenic

### 4.4.1 Introduction (Auteur : Richard St-Louis, Ph.D.)

Le projet de recherche mené de 2013 à 2016 sur le suivi de la qualité des sédiments dans la baie de Sept-Îles, dans le cadre de l'observatoire de veille environnementale de la baie de Sept-Îles, révèle pour l'arsenic que des concentrations élevées sont observables dans le sédiment de surface, accompagnées de facteurs d'enrichissement modérément sévère. La figure 4-42 montre que trois endroits dans la baie présentent des niveaux d'arsenic près ou supérieurs à la concentration seuil produisant un effet sur la faune aquatique (CSE = 7,2 mg/kg de sédiment).

Les sources de l'arsenic peuvent être naturelles et anthropiques (activités actuelles et passées), situées dans les limites de la baie mais également dans les limites du bassin versant des rivières qui se jettent dans la baie de Sept-Îles.

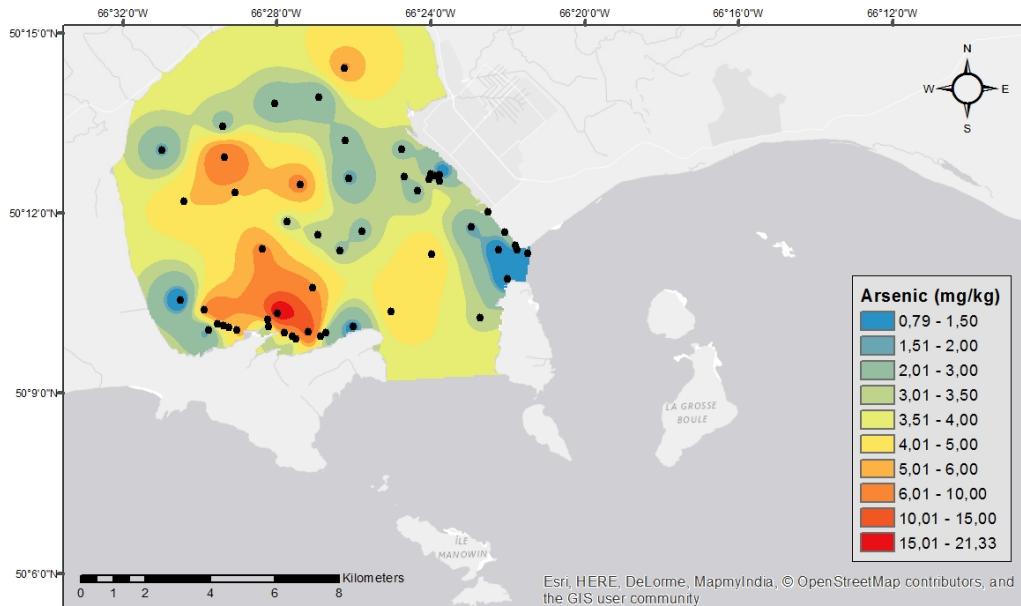


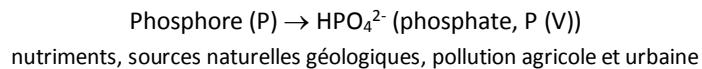
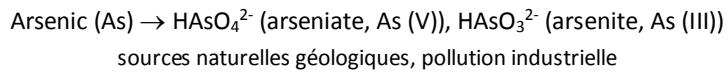
Figure 4-42 : Distribution de l'arsenic selon les classes de concentration (mg/kg) prédictes dans le sédiment de la baie de Sept-Îles par une méthode d'interpolation, à partir des mesures réalisées sur les échantillons prélevés en 2013, 2014 et 2016

Les embouchures des rivières Hall, des Rapides, Au Foin et du Poste, les principaux affluents de la baie, se trouvent à proximité de deux zones de concentrations élevées en arsenic.

Ces rivières peuvent être une source d'arsenic au sédiment de la baie, car il se produit un phénomène de formation de colloïdes puis de particules en raison du changement de salinité et de pH, lorsque leurs eaux douces rencontrent les eaux salées de la baie. Selon leur taille et les courants marins, les particules sédimentent dans la baie ou seront exportées vers les eaux du fleuve.

Ces particules entraîneront une partie des métaux et métalloïdes (comme l'arsenic) qui étaient dissous et qui ont une affinité pour s'adsorber sur la surface des particules.

Les eaux du golfe sont également une source potentielle de particules enrichies en arsenic, puisque cet élément accompagne le phosphore dans le cycle biologique de la production primaire marine. Il est connu que le phytoplancton assimile l'ion arséniate  $\text{AsO}_4^{3-}$ , de façon analogue aux ions phosphates  $\text{PO}_4^{3-}$ , un nutriment essentiel à la production primaire, en raison de leur similarité chimique :



La sédimentation des cellules algales et des fèces produites par le zooplancton herbivore entraîne alors cet arsenic vers le sédiment.

Les concentrations en arsenic dissous augmentent avec la salinité dans le système marin du Saint-Laurent. Dans l'intervalle de salinité de 0 à 31 ‰, la concentration d'arsenic total dissous augmente de 0,5 µg/L à 1,4 µg/L dans l'estuaire du St-Laurent (Tremblay et Gobeil, 1990).

Les processus biogéochimiques naturels expliquent le profil d'arsenic dans le sédiment du golfe du St-Laurent, avec une concentration plus élevée à l'interface eau-sédiment où l'arsenic précipite avec la formation d'oxydes de fer (Gobeil, 1996).

Des particularités régionales peuvent entraîner des concentrations en arsenic dans le sédiment qui sont plus élevées que dans le golfe, comme pour le sédiment du fjord du Saguenay (Figure 4-43).

Dans le système aquatique du fjord, les eaux douces de surface de la rivière Saguenay contiennent des concentrations importantes d'oxydes de fer sous forme colloïdale ; ces colloïdes coagulent au contact de l'eau salée, sous la couche d'eau saumâtre de surface, et sédimentent en entraînant l'arsenic.

Dans le sédiment, des réactions complexes d'oxydo-réduction, qui dépendent de la présence d'oxygène (milieu oxique) ou de son absence (milieu anoxique) et qui impliquent les oxydes de fer et de manganèse, contrôlent la présence d'arsenic dans la couche de surface du sédiment (Mucci, 1998).

La figure 4-44 résume les processus géochimiques probables qui influencent la présence de l'arsenic dans le sédiment, à partir des résultats d'une étude menée dans le fjord du Saguenay.

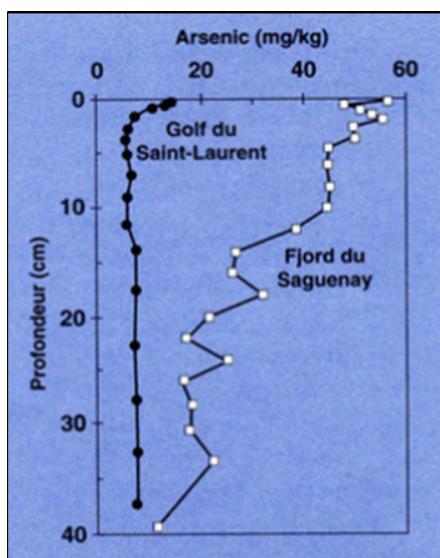


Figure 4-43 : Profil de l'arsenic dans le sédiment marin du golfe du St-Laurent et du fjord du Saguenay, tiré de Gobeil 1996

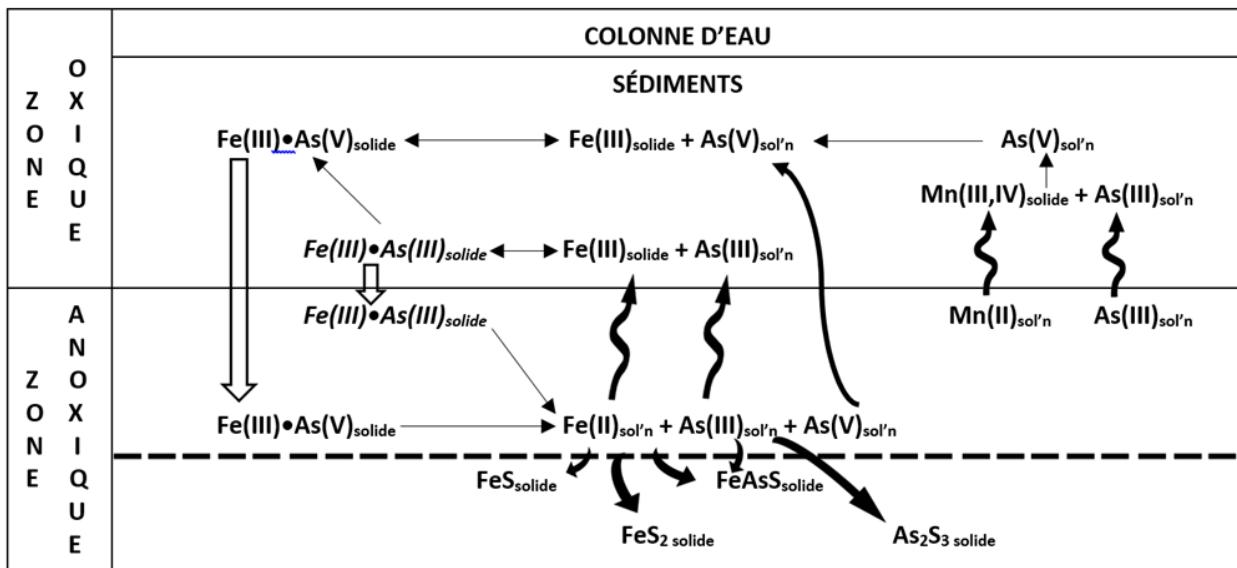


Figure 4-44 : Voies de transformation redox de l'arsenic (As) dans le sédiment marin, sous l'influence du manganèse (Mn) et du fer (Fe)

Les chiffres romains entre parenthèses indiquent l'état d'oxydation de l'élément. Tiré de Mucci 1998.

Le manganèse et le fer ont donc un rôle à jouer dans l'accumulation de l'arsenic dans le sédiment, puisque l'arsenic a une affinité pour les oxydes de manganèse et de fer insolubles.

La figure 4-45 illustre la relation entre la concentration de l'arsenic et celle du manganèse et du fer dans les échantillons de sédiment global de la baie de Sept-Îles prélevés en 2016.

De façon générale, la concentration en arsenic dans le sédiment augmente avec celle du manganèse et du fer. Si la source est principalement les sédiments issus des bassins versants des affluents de la baie, les relations arsenic-manganèse ou arsenic-fer devraient y être comparables.

Comme il existe une corrélation entre les concentrations de l'arsenic et celles de manganèse et du fer, selon les analyses sur les sédiments de la campagne de 2016, il y a nécessairement une corrélation entre les concentrations du fer et du manganèse. C'est ce qu'illustre la figure 4-46 pour l'ensemble des sédiments prélevés en 2016 : de surface et de fond de la baie de Sept-Îles, des sédiments de surface de la baie de Port-Cartier, de rivière Pentecôte et de rivière Sainte-Marguerite.

Dans ces environnements sédimentaires, ces deux métaux ont donc des sources communes et subissent des transformations géochimiques probablement interreliées, comme celles du modèle de la figure 4-43.

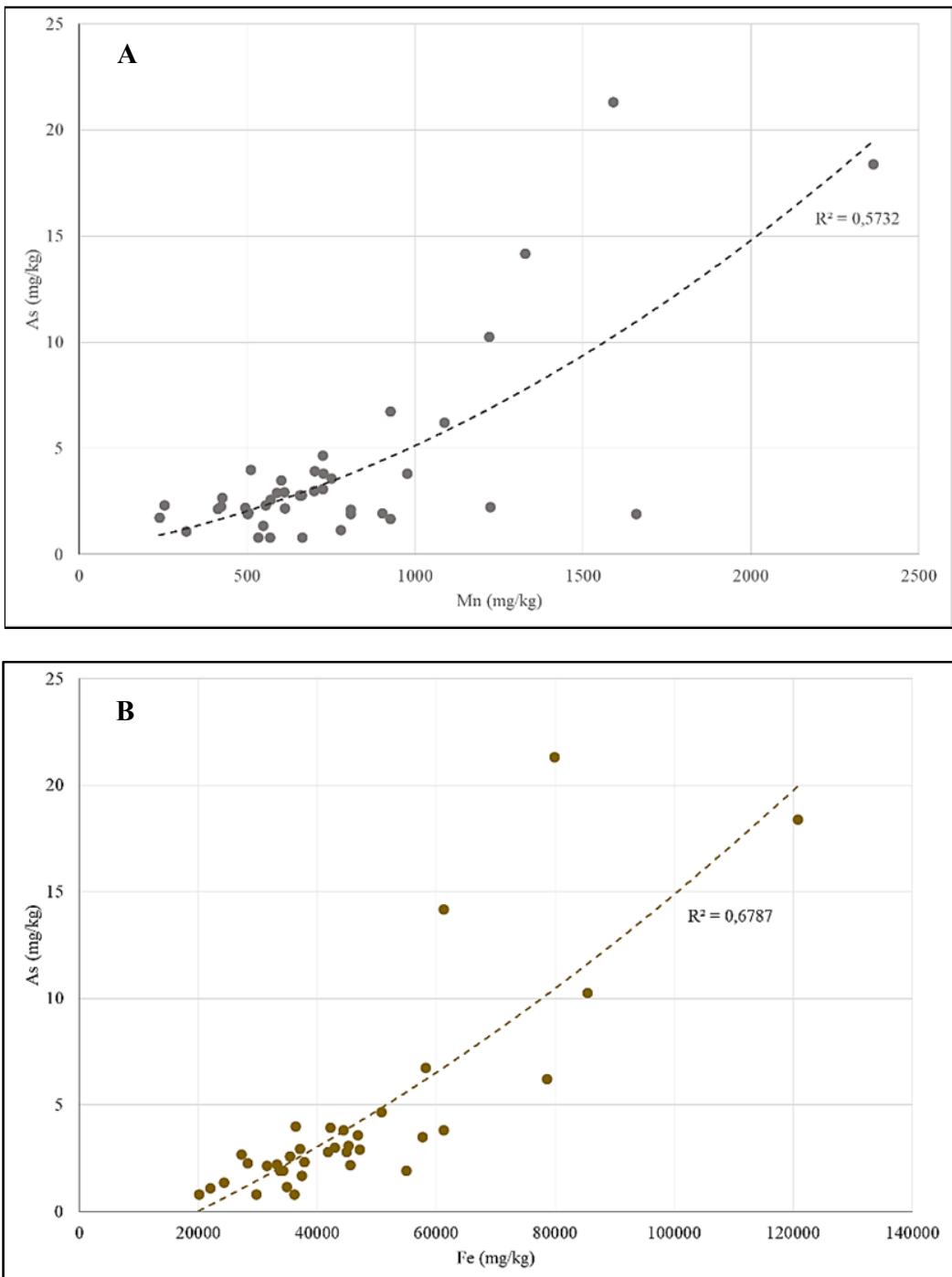


Figure 4-45 : Relation entre les concentrations de l'arsenic et du manganèse (A), et du fer (B) dans les échantillons de sédiment global (fond et surface) de la baie de Sept-Îles prélevés en 2016

Les concentrations dans la fraction argileuse ne sont pas incluses. Les concentrations sont exprimées en mg/kg de poids sec.

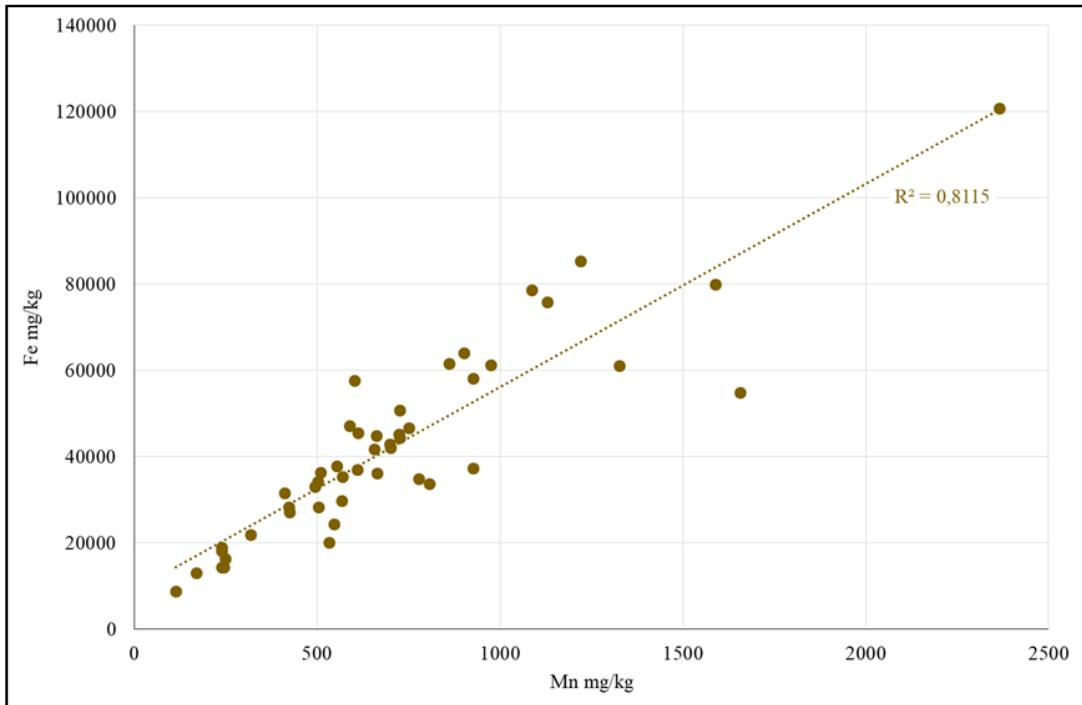


Figure 4-46 Relation entre les concentrations du manganèse et du fer dans les échantillons de sédiment global (fond et surface) de la baie de Sept-Îles prélevés en 2016

Les concentrations dans la fraction argileuse ne sont pas incluses. Les concentrations sont exprimées en mg/kg de poids sec.

Le milieu marin est en général très dynamique et les processus biogéochimiques énoncés précédemment sont influencés par des facteurs physiques.

Le régime hydrodynamique de la baie de Sept-Îles, décrit en détail dans le chapitre 8, est dominé par les courants de marée qui induisent un mouvement de va-et-vient des eaux du golfe dans la baie. À marée montante, les courants longent la rive en direction nord-ouest alors qu'à la marée descendante, ils longent toujours la rive, mais en direction inverse (sud-est).

Une image satellitaire captée le 13 octobre 2006 illustre de façon spectaculaire la sortie de l'eau de surface dans le chenal de l'est, entre la Pointe-aux-Basques et l'île Grande Basque (figure 4-47).

Bien qu'il soit considéré que les affluents de la baie n'ont que peu d'effet sur le système hydrodynamique généré par les marées, les quatre rivières ont un impact direct sur le transport des matières dans la baie, comme l'illustre les images satellites de la figure 4-48.

L'image de 1997 montre que les rivières des Rapides, au Foin et du Poste semblent avoir une influence en surface jusque dans le milieu de la baie de Sept-Îles; l'image de 2016 détaille l'influence que peut avoir la rivière du Poste sur le transport de particules le long du front de mer urbain.

À ces processus naturels, s'ajoutent des événements d'origine anthropique qui introduisent des particules dans l'écosystème marin de la baie.

L'image satellitaire de la figure 4-49 montre ce qui semble un transport de surface de particules, qui colorent en rouge les eaux, issues des installations portuaires de Pointe Noire et qui sont entraînées vers le nord-ouest, au moment de la captation de cette image.



Figure 4-47 : Image Landsat/Copernicus datée 13 octobre 2006,  
Source : 2018, Digital Globe Image Nasa de Google Earth



Figure 4-48 : Embouchure H = rivière Hall; R = rivière des Rapides; F = rivière Au Foin; P = rivière du Poste  
(Source : Google Earth, Images Landsat/Copernicus datées 30 décembre 1997(A) et 10 mai 2016 (B))

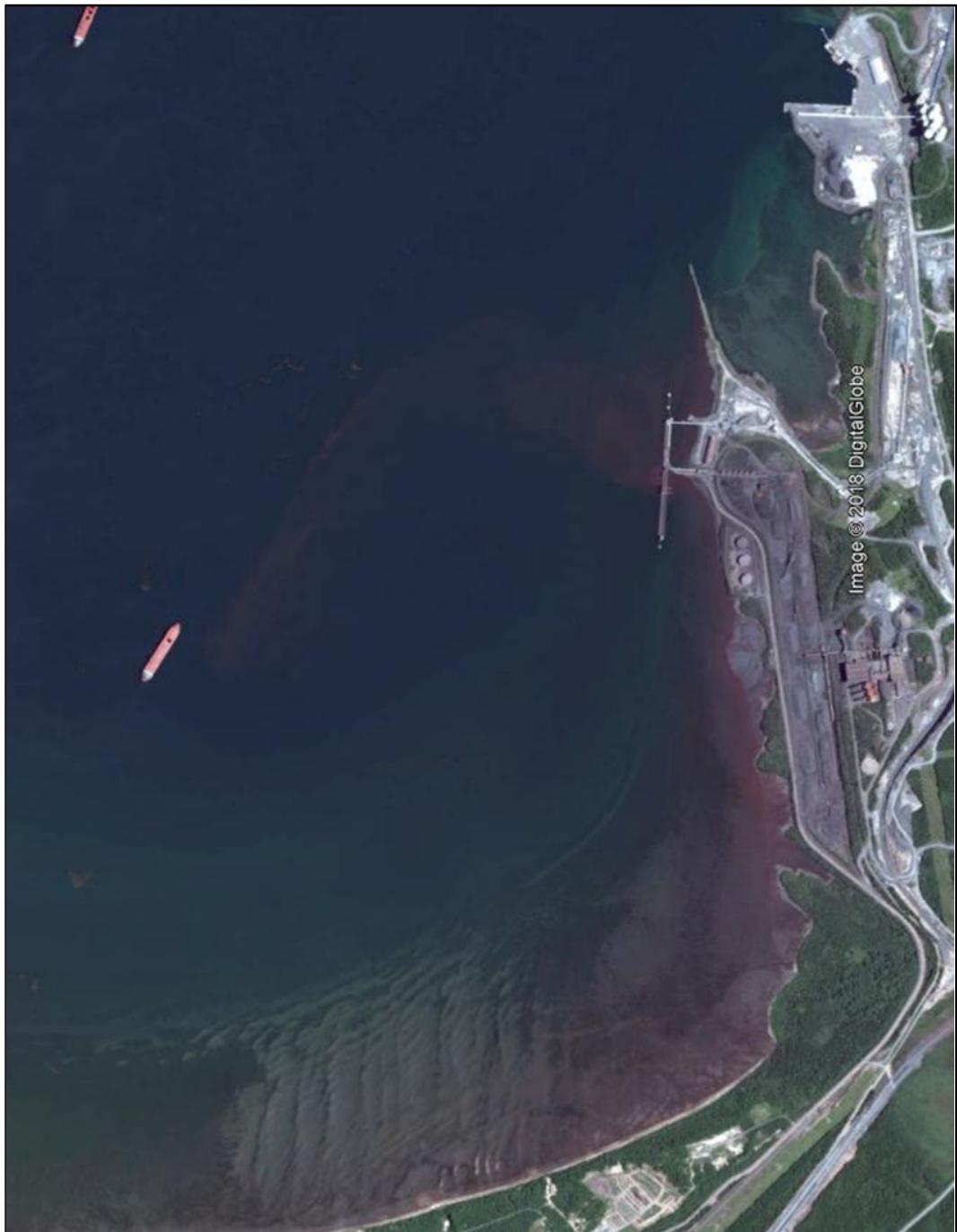


Figure 4-49 : Image Landsat/Copernicus datée 24 août 2010, tirée de Google Earth

#### 4.4.2 Objectif (Auteur : Richard St-Louis, Ph.D.)

L'objectif est donc d'établir les sources les plus probables de l'arsenic pour le sédiment de la baie de Sept-Îles. Il est proposé un modèle de distribution de l'arsenic à partir des résultats obtenus lors des trois campagnes d'échantillonnage (notamment confirmer ou infirmer la relation entre l'arsenic et le manganèse), et à partir de nouvelles données chimiques provenant de l'analyse d'échantillons d'eau et de sédiment des rivières Hall, des Rapides, au Foin, du Poste et d'échantillons supplémentaires d'argile postglaciaire. La rivière Moisie a également été échantillonnée, son influence possible sur les eaux de la baie a été évoquée dans le chapitre 8 du rapport. Les échantillons d'eau serviront à calculer les apports en métaux de ces rivières et les échantillons d'argiles permettront de réduire les incertitudes sur les niveaux naturels des métaux et métalloïdes dans le sédiment.

#### 4.4.3 Sites et échantillonnage (Auteur : Richard St-Louis, Ph.D.)

Les figures 4-50 à 4-55 illustrent les sites d'échantillonnage visités du 20 au 22 novembre 2017, à des périodes de la journée correspondant à la marée basse. Pour chaque site (Hall, des Rapides, Au Foin et du Poste), il a été prélevé un échantillon d'eau pour mesurer les paramètres chimiques dissous et particulaires et deux échantillons de sédiments, l'un de surface et l'autre constitué d'argiles. Pour la rivière Moisie, seul le sédiment de surface a été prélevé, alors qu'un échantillon d'argiles a été prélevé au site du Vieux Poste.

Les eaux ont été filtrées au laboratoire de l'INREST et les échantillons ont été envoyés à l'UQAR pour les analyses des métaux sur les sédiments, la fraction dissoute et la fraction particulaire retenue sur les filtres de polycarbonate.



Figure 4-50 : Localisation des cinq sites d'échantillonnage sur les rivières, en novembre 2017  
 (Source : Google Earth)



Figure 4-51 : Détail du site d'échantillonnage de la rivière des Rapides (Source : Google Earth)

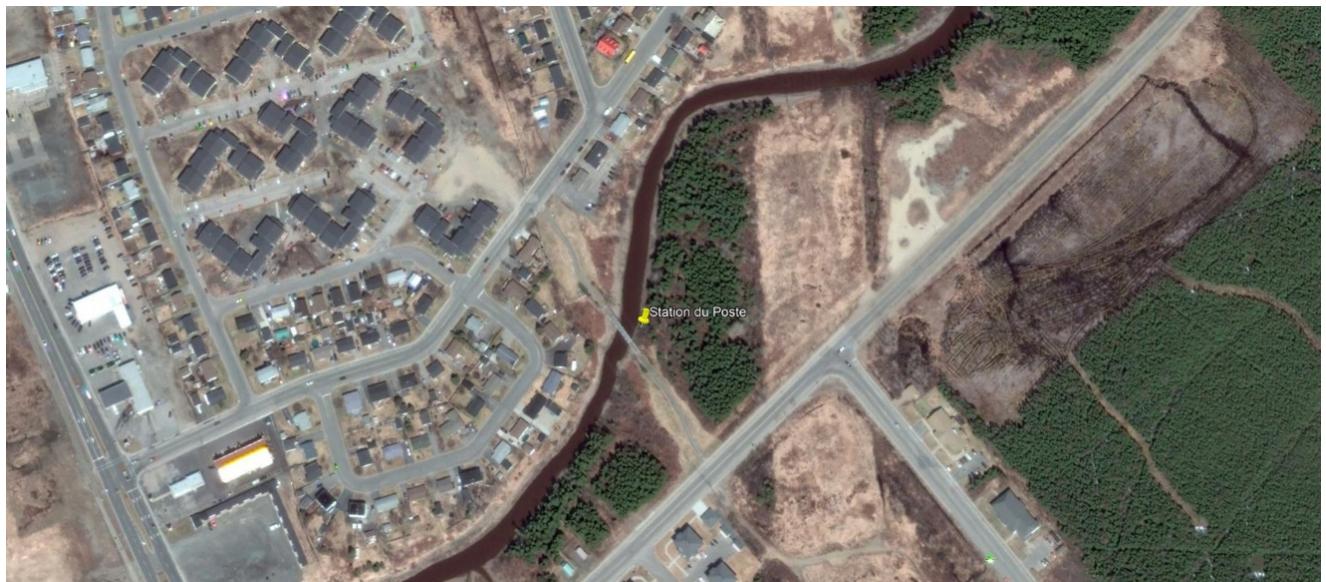


Figure 4-52 : Détail du site d'échantillonnage de la rivière du Poste (Source : Google Earth)



Figure 4-53 : Détail du site d'échantillonnage de la rivière Au Foin (Source : Google Earth)

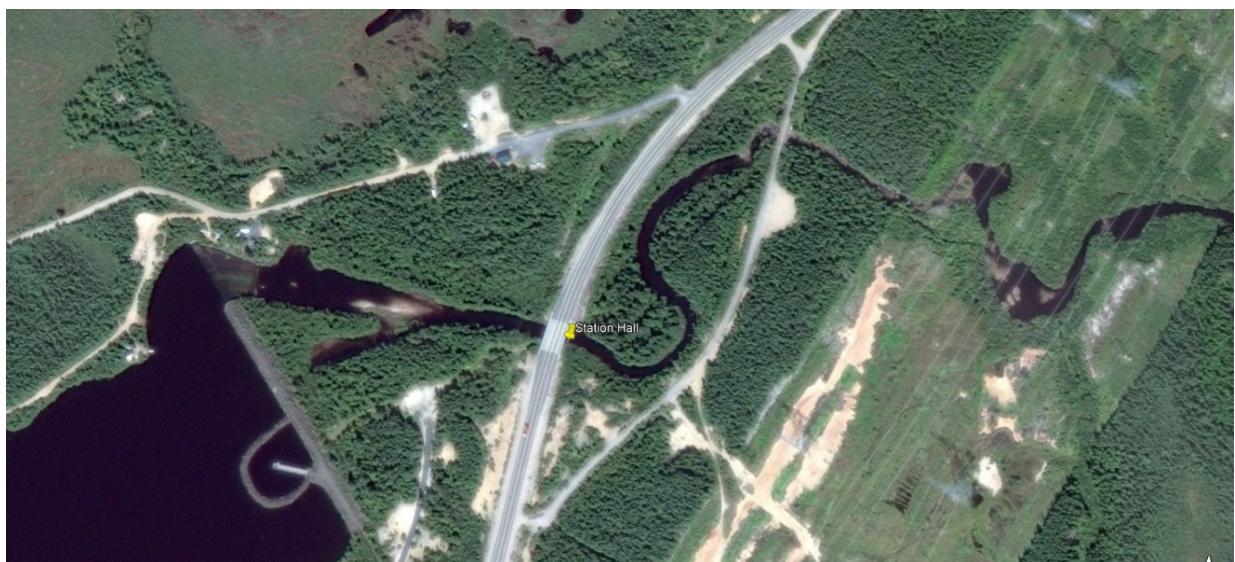


Figure 4-54 : Détail du site d'échantillonnage de la rivière Hall (Source : Google Earth)

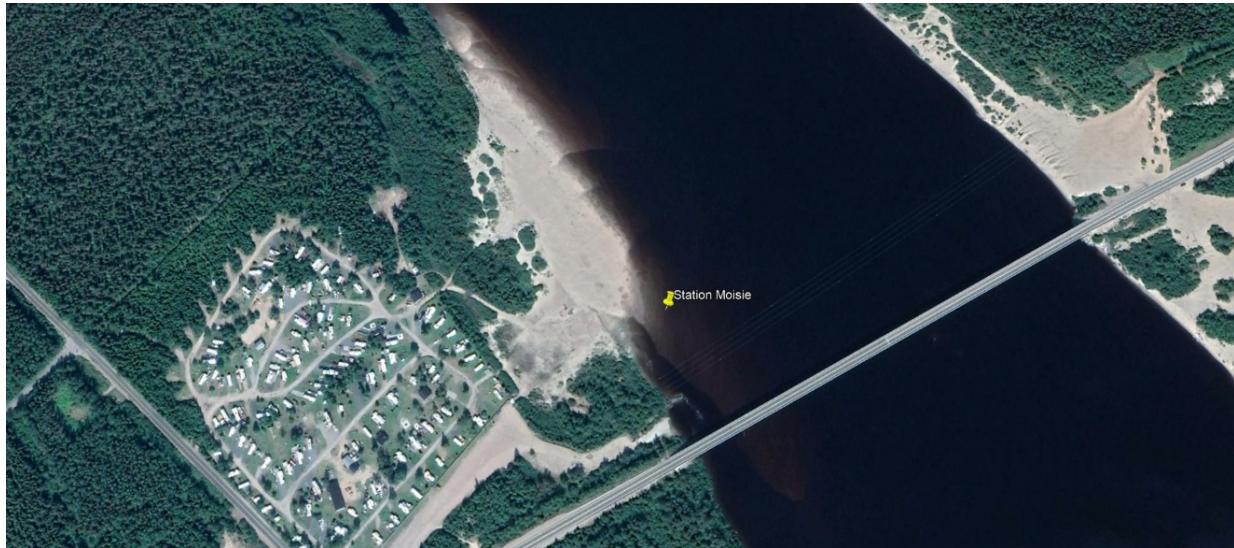


Figure 4-55 : Détail du site d'échantillonnage de la rivière Moisie (Source : Google Earth)

## 4.5 Résultats et discussion

### 4.5.1 Minéralogie de la fraction argileuse (< 2µm) des sédiments de rivières de Sept-Îles (Auteur : J-C Montero-Serrano, Ph.D.)

La minéralogie de la fraction argileuse fait référence à la minéralogie des phyllosilicates compris dans la fraction de la taille des argiles (généralement les grains inférieurs à 2 µm). Les minéraux argileux sont identifiés par diffraction des rayons X selon le protocole expérimental adapté par Bout-Roumazeilles *et al.* (1999) et Montero-Serrano *et al.* (2009). Un total de 9 échantillons sur 10 (y compris les sédiments de surface et d'argile postglaciaire) ont été analysés par diffraction des rayons X afin de déterminer la minéralogie du cortège argileux (figure 4-46A). Les échantillons étudiés ont été recueillis dans les rivières Hall, Des Rapides, Au Foin, du Poste et Moisie ainsi qu'au site du Vieux-Poste. Cependant, l'échantillon prélevé dans la rivière Moisie (Moisie\_Sed\_SURF) n'a pas assez d'argiles pour permettre d'étudier le cortège argileux.

#### 4.5.1.1 Méthode préparatoire

Préalablement les échantillons ont été passés au tamis humide afin de récupérer la fraction inférieure à 63 µm, constituée principalement de particules de taille silts et argiles. Afin d'isoler la fraction détritique, la matière organique et les carbonates biogéniques ont été supprimés des échantillons avec 10 ml de peroxyde (30 %) et 10 ml d'acide chlorhydrique (HCl; 0.5 M), respectivement. La déflocculation des argiles a été réalisée par des lavages successifs des échantillons à l'eau distillée jusqu'à atteindre une solution de pH relativement neutre. La fraction argileuse des sédiments a été isolée par décantation selon la loi de Stokes, concentrée par centrifugation et orientée par maculage humide sur des lames de verre.

Les échantillons ont été analysées à l'aide d'un diffractomètre PANalytical X'Pert Powder afin d'obtenir des diagrammes DRX. L'instrument est adapté avec un tube de cuivre (Cu K-alpha = 1.54178 Å) qui opèrera à 45 kV et 40 mA et un monochromateur en graphite post-diffraction. Pour chacun des échantillons, les analyses ont été réalisées en fonction de trois conditions : (1) l'échantillon est séché à l'air ambiant (série normale), (2) une saturation à l'éthylène glycol est appliquée pendant 12 h (série glycol), (3) l'échantillon est chauffé à 490°C pendant 2 h (série chauffée). Les échantillons sont mesurés entre 2.49° et 32.49° 2θ (deux-théta) pour les séries normales et glycol, et entre 2.49° et 14.5° 2θ pour la série chauffée.

L'analyse des données obtenues à partir des mesures XRD (pics obtenus par diffraction des rayons X) permet d'identifier chacun des minéraux argileux en fonction des valeurs respectives de l'espace basal (en angström, Å) qui les caractérise (Brown and Brindley, 1980). La smectite (S) est caractérisée par un pic à 14 Å pour la série normale, qui augmente à 17 Å après saturation à l'éthylène glycol et retombe à 10 Å pour la série chauffée. L'illite (I) est déterminée par des pics à 10 Å, 5Å, et 3.33 Å, qui restent inchangés au cours des trois séries. La kaolinite (K) est mise en évidence par des pics à 7.2 Å et 3.58 Å qui disparaissent pour la série chauffée alors que les pics correspondant à la chlorite (C) (14 Å, 7.2 Å, 4.75 Å et 3.54 Å) restent stables pour les trois séries. La distinction entre la kaolinite et la chlorite repose sur un balayage à haute résolution entre 3.60 Å et 3.50 Å. L'amphibole, le quartz et le feldspath sont des composants communs de fraction de taille argileuse mais ils ne sont pas inclus dans la détermination semi-quantitative puisque ce ne sont pas des minéraux argileux. Finalement, l'analyse semi-quantitative de l'abondance des minéraux argileux est déterminée en fonction de la surface des pics [17 Å (smectite) + 10 Å (illite) + 7.2 Å (kaolinite et chlorite)] et additionnée pour donner 100 %. Puisque les séries normale et glycol dans les échantillons analysés donne les mêmes spectres (indicative de l'absence de smectite), les mesures de surface des pics ont été réalisées sur les séries normales en utilisant le logiciel Macintosh MacDiff version 4.2.5 (Petschick, 2000). L'erreur de reproductibilité pour cette méthode de mesure est de l'ordre de 5 %.

#### 4.5.1.2 Résultats et interprétation

Les sédiments étudiés sont constitués principalement de 88-92 % d'illite, 5-9 % de chlorite, et 2-4 % de kaolinite (tableau 4-20 ; figure 4-56B-D). La smectite est absente dans tous les diagrammes de DRX étudiés. Dans la zone d'étude, la distribution d'illite et de chlorite dans les argiles postglaciaires est relativement homogène avec une moyenne de 90 ± 2 % et 7 ± 2 %, respectivement (Figure 4-56B-C). La distribution de kaolinite est très hétérogène et constitue <4 % de la fraction argileuse (Figure 4-56D). Ces résultats suggérant que les sédiments proviennent d'une même source sédimentaire (ex. les granites du bouclier canadien).

*Tableau 4-20 : Minéralogie de la fraction argileuse des sédiments de la région de Sept-Îles*

| Zone        | Échantillons | Latitude (°N) | Longitude (°O) | Smectite (%) | Illite (%) | Chlorite (%) | Kaolinite (%) |
|-------------|--------------|---------------|----------------|--------------|------------|--------------|---------------|
| Des Rapides | R_SURF       | 50.269        | -66.458        | 0            | 90.3       | 7.7          | 2.0           |
| Des Rapides | R_ARG        | 50.269        | -66.458        | 0            | 89.1       | 9.4          | 1.6           |
| Hall        | H_SURF       | 50.220        | -66.570        | 0            | 89.8       | 7.4          | 2.8           |
| Hall        | H_ARG        | 50.220        | -66.570        | 0            | 88.2       | 7.5          | 4.3           |
| Au Foin     | F_SURF       | 50.264        | -66.403        | 0            | 92.2       | 5.7          | 2.1           |
| Au Foin     | F_ARG        | 50.264        | -66.403        | 0            | 88.5       | 8.4          | 3.1           |
| Du Poste    | DP_SURF      | 50.229        | -66.393        | 0            | 91.6       | 5.8          | 2.5           |
| Du Poste    | DP_ARG       | 50.229        | -66.393        | 0            | 88.4       | 8.3          | 3.4           |
| Vieux-Poste | VP_ARG       | 50.226        | -66.403        | 0            | 91.7       | 5.4          | 2.9           |

Afin de mieux caractériser l'illite (minéral d'argile le plus abondant dans les sédiments), l'indice de cristallinité de l'illite et l'indice d'Esquevin ont été mesurés sur les diagrammes DRX (tableau 4-21). L'indice d'Esquevin, ou indice d'altération chimique (Esquevin, 1969), est le rapport entre l'intensité d'illite mesurée à 5 Å par rapport à celle à 10 Å. Un indice d'Esquevin inférieur à 0,5 représente des illites riches en Fe-Mg (tel que biotites et micas), et est caractéristique pour les roches physiquement érodées et peu altérées. Un indice supérieur à 0,5 suggère la présence d'illites riches en Al qui sont formées par une forte hydrolyse. Tous les échantillons étudiés présentent un indice d'Esquevin homogène ~0,016, suggérant la présence des illites riches en Fe-Mg dans les sédiments étudiés (figures 4-20E et 4-47A).

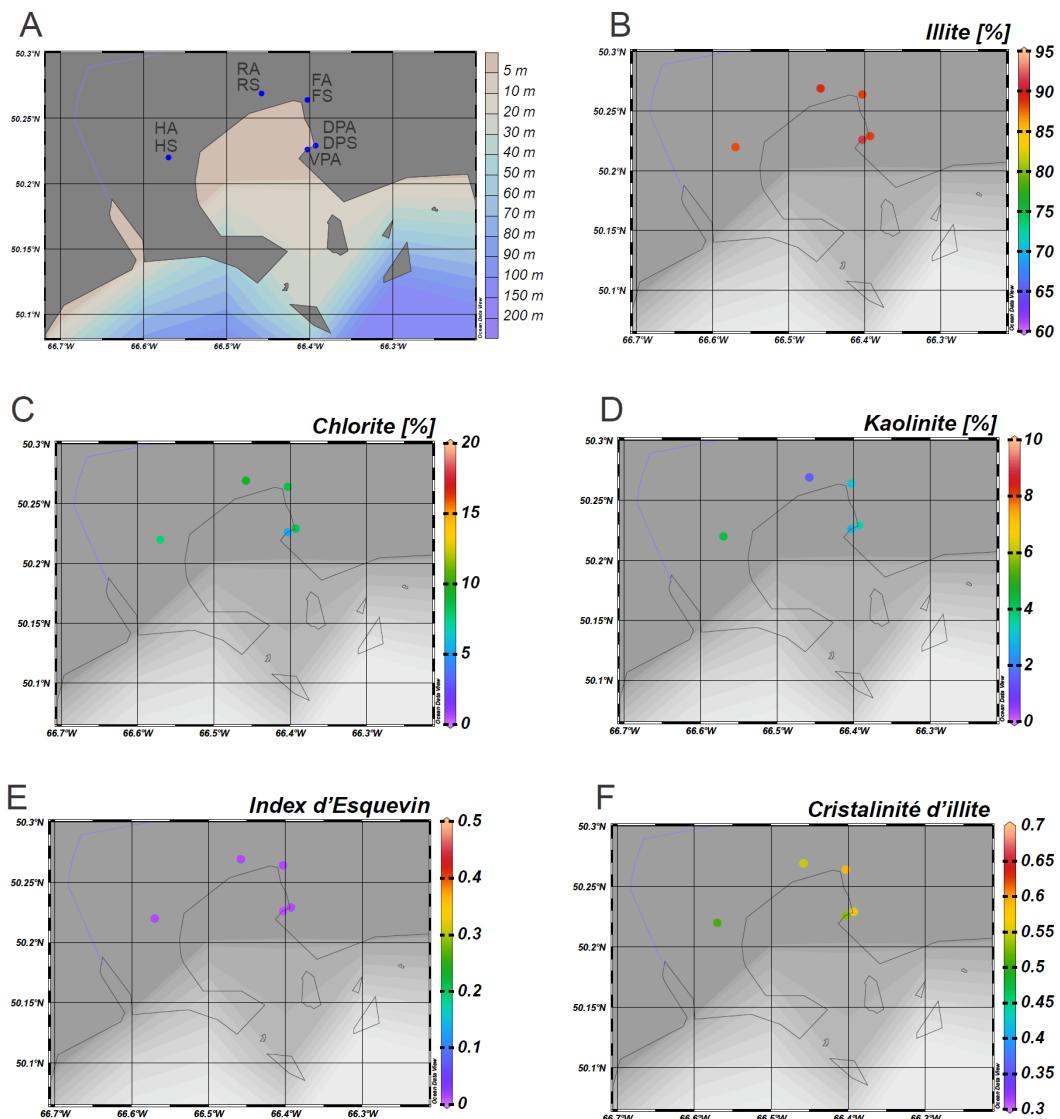


Figure 4-56 : Localisation des échantillons analysés (A), cartes de distribution relative d'argiles (B-D), et cartes de la caractérisation des illites : Indice d'Esquevin (E) et cristalinité d'illite (F)

Tableau 4-21 : Rapport d'intensités des argiles et caractérisation des illites, suivant l'indice d'Esquevin et cristallinité, des sédiments de la région de Sept-Îles. I: illite, K: kaolinite, C: chlorite

| Zone        | Échantillons | Latitude<br>(°N) | Longitude<br>(°O) | I/C-K<br>(10Å/7.1Å) | Indice<br>d'Esquevin | Cristallinité<br>de l'illite | I<br>10Å<br>(cps) | C-K<br>7.1Å<br>(cps) |     |
|-------------|--------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|-----|
| Des Rapides | R_SURF       | 50.269           | -66.458           | 9.3                 | 0.005                |                              | 0.783             | 5031                 | 539 |
| Des Rapides | R_ARG        | 50.269           | -66.458           | 8.1                 | 0.014                |                              | 0.548             | 3291                 | 404 |
| Hall        | H_SURF       | 50.220           | -66.570           | 8.8                 | 0.023                |                              | 0.567             | 5534                 | 631 |
| Hall        | H_ARG        | 50.220           | -66.570           | 7.5                 | 0.016                |                              | 0.508             | 4206                 | 561 |
| Au Foin     | F_SURF       | 50.264           | -66.403           | 11.8                | 0.015                |                              | 0.48              | 4170                 | 353 |
| Au Foin     | F_ARG        | 50.264           | -66.403           | 7.7                 | 0.017                |                              | 0.591             | 4626                 | 599 |
| Du Poste    | DP_SURF      | 50.229           | -66.393           | 11.0                | 0.025                |                              | 0.444             | 2489                 | 227 |
| Du Poste    | DP_ARG       | 50.229           | -66.393           | 7.6                 | 0.016                |                              | 0.559             | 2474                 | 326 |
| Vieux-Poste | VP_ARG       | 50.226           | -66.403           | 11.0                | 0.012                |                              | 0.531             | 3623                 | 330 |

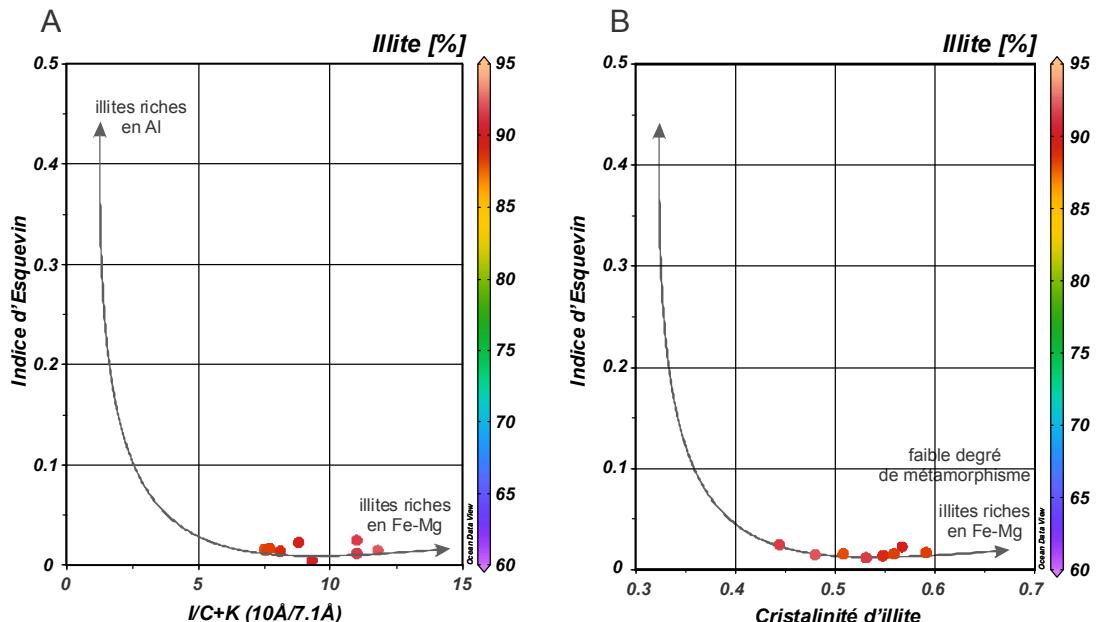


Figure 4-57 : Teneur relative d'illite vs. l'indice d'Esquevin (A) et cristallinité de l'illite (B) des sédiments de la région de Sept-Îles

D'autre part, l'indice de cristallinité de l'illite correspond à la largeur de moitié-taille (FWHM) de la réflexion d'illite à 10 Å (Chamley, 1989). La cristallinité de l'illite est inversement proportionnelle au degré de métamorphisme : un indice de cristallinité élevé indique un faible degré de métamorphisme tandis qu'un faible indice de cristallinité de l'illite reflète un degré élevé de métamorphisme. Tous les échantillons étudiés présentent un faible indice de cristallinité de l'illite (figures 4-56F et 4-57B), et suivent la même tendance de l'indice d'Esquevin (figure 4-57A). Ceci soutient l'idée que les argiles postglaciaires ont pour origine des roches avec un faible degré de métamorphisme. En s'appuyant sur plusieurs études sédimentologiques (ex., Nota & Loring 1964; Dionne, 1977; Josenhans & Lehman 1999), l'ensemble des résultats obtenus ici suggèrent que les décharges d'eau de fonte provenant du

bouclier canadien associées avec un haut niveau marin (Clark et al. 1978), induisent l'accumulation de sédiments argileux dans la région de Sept-Îles au cours de la déglaciation. En effet, les faibles conditions hydrodynamiques dans ce type d'environnement ont permis des conditions de dépôts moins turbulents, et par conséquent, une accumulation préférentielle des minéraux argileux.

La distribution de l'illite, l'indice d'Esquevin et la cristallinité de l'illite suggèrent que les dépôts argileux postglaciaires qui caractérisent la stratigraphie quaternaire régionale de la région de Sept-Îles sont principalement issus de l'érosion et de l'altération glaciaire des roches métamorphiques du bouclier canadien.

#### 4.5.2 Paramètres physico-chimiques, métaux dissous et particulaire de l'eau des rivières (auteur : Richard St-Louis, Ph.D.)

L'analyse des paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau a porté sur 15 paramètres (tableau 4-22). Ce qui ressort de cet ensemble de données est que les rivières du Poste et Au Foin se démarquent par leurs concentrations plus élevées en solides dissous, en solides totaux, en turbidité, en ions chlorures et en ions sulfates. Des valeurs plus élevées en solides dissous et totaux indiquent des processus d'érosion physiques et chimiques plus intenses dans leur bassin versant respectif. Ces deux rivières ont un pH légèrement basique comparable à celui de la rivière Moisie, qui s'explique par des concentrations importantes en cations basiques comme le calcium (tableau 4-23). Les rivières des Rapides et Hall ont un pH plus acide, typique des rivières qui traversent des tourbières. Pour plus de détails sur la qualité de l'eau des rivières, se référer au chapitre 3. Qualité de l'eau.

Les tableaux 4-23 et 4-24 rapportent les concentrations des métaux alcalins et alcalino-terreux dans la phase dissoute et dans la matière particulaire. En accord avec la concentration des ions chlorures, la concentration des contre-ions sodium (Na), magnésium (Mg) et potassium (K) est plus élevée dans la phase dissoute des rivières du Poste et Au Foin. Dans la phase particulaire, seul le sodium a une concentration plus élevée dans les rivières du Poste et Au Foin. De façon générale, la composition en alcalins et alcalino-terreux de la matière particulaire est comparable entre les rivières du Poste, aux Foin et Moisie avec des concentrations plus élevées que dans la matière particulaire des rivières Hall et des Rapides.

Tableau 4-22 : Caractéristiques physico-chimiques des rivières

|                              | Rapides | Du Poste | Au Foin | Hall  | Moisie |
|------------------------------|---------|----------|---------|-------|--------|
| DBO <sub>5</sub> (mg/L)      | 2       | 2        | 2       | 1     | <1     |
| DBO <sub>5C</sub> (mg/L)     | 2       | <1       | 1       | <1    | 1      |
| DCO (mg/L)                   | 34      | 41       | 44      | 43    | 17     |
| pH                           | 5,09    | 7,38     | 7,4     | 5,64  | 7,24   |
| Solides dissous (mg/L)       | 37      | 151      | 85      | 42    | 35     |
| Solides en suspension (mg/L) | 8       | 6        | <4      | <4    | <4     |
| Solides totaux (mg/L)        | 42      | 174      | 106     | 54    | 26     |
| Turbidité (UTN)              | 2,4     | 7,1      | 4       | 1,2   | 1,7    |
| Azote ammoniacal (mg/L)      | <0,05   | <0,07    | <0,05   | <0,05 | <0,05  |
| Azote total Kjeldhal (mg/L)  | <0,8    | <0,8     | <0,8    | <0,8  | <0,8   |
| Fluorures (mg/L)             | <0,1    | 0,1      | 0,1     | <0,1  | <0,1   |
| Phosphore total (mg/L)       | 0,04    | 0,05     | 0,04    | 0,04  | 0,03   |
| Phosphate (mg/L)             | 0,1     | 0,2      | 0,1     | 0,1   | 0,1    |
| Chlorures (mg/L)             | <1      | 56       | 16      | 2     | <1     |
| Nitrites et nitrates (mg/L)  | 0,03    | 0,14     | 0,14    | 0,05  | 0,1    |
| Sulfates (mg/L)              | 1,0     | 5,1      | 4,7     | 1,2   | 2,0    |

*Tableau 4-23 Concentration des métaux alcalins et alcalino-terreux dans la phase dissoute, moyenne de deux sous-échantillons par site*

|                 | <b>Li</b> | <b>Be</b> | <b>Na</b> | <b>Mg</b> | <b>K</b> | <b>Ca</b> | <b>Rb</b> | <b>Sr</b> | <b>Cs</b> | <b>Ba</b> |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Unité           | µg/L      | mg/L      | mg/L      | mg/L      | mg/L     | mg/L      | µg/L      | µg/L      | µg/L      | µg/L      |
| <b>Rapides</b>  | <LD       | <LD       | 1,43      | 0,30      | 0,27     | 0,55      | 0,77      | 5,62      | <LD       | 6,01      |
| <b>Au Foin</b>  | 0,66      | <LD       | 10,81     | 2,21      | 1,91     | 3,66      | 1,15      | 29,62     | <LD       | 5,14      |
| <b>du Poste</b> | 0,66      | <LD       | 33,32     | 3,23      | 1,83     | 3,03      | 1,23      | 33,14     | <LD       | 5,28      |
| <b>Hall</b>     | <LD       | <LD       | 2,21      | 0,47      | 0,45     | 0,80      | 1,31      | 6,75      | <LD       | 4,47      |
| <b>Moisie</b>   | <LD       | <LD       | 1,27      | 0,81      | 0,49     | 2,49      | 1,01      | 13,12     | <LD       | 8,85      |

*Tableau 4-24 : Concentration des métaux alcalins et alcalino-terreux dans la phase particulaire, moyenne de trois sous-échantillons par site*

|                 | <b>Li</b> | <b>Be</b> | <b>Na</b> | <b>Mg</b> | <b>K</b> | <b>Ca</b> | <b>Rb</b> | <b>Sr</b> | <b>Cs</b> | <b>Ba</b> |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Unité           | mg/k g    | mg/kg     | mg/kg     | mg/kg     | mg/kg    | mg/kg     | mg/k g    | mg/kg     | mg/k g    | mg/kg     |
| <b>Rapides</b>  | 0,42      | 0,20      | 1832      | 5185      | 1806     | 163364    | 17        | 128       | 0,43      | 161       |
| <b>Au Foin</b>  | 12,17     | 0,75      | 7055      | 8563      | 6929     | 218760    | 40        | 106       | 1,29      | 299       |
| <b>du Poste</b> | 7,21      | 0,64      | 10820     | 15471     | 11035    | 361767    | 46        | 255       | 1,15      | 444       |
| <b>Hall</b>     | 9,69      | <LD       | 1491      | 6197      | 802      | 359120    | 13        | 142       | 0,49      | 135       |
| <b>Moisie</b>   | 11,41     | 2,58      | 3022      | 11117     | 6514     | 179638    | 49        | 135       | 2,17      | 374       |

Une relation intéressante entre le sodium et le bore est observée pour la phase dissoute (figure 4-58). Les concentrations attendues du bore dans l'eau salée se retrouvent de 4 à 5 mg/litre, alors que des concentrations de 0,01 à 0,1 mg/L pour le bore correspondent à des teneurs naturelles dans les eaux douces. Nos concentrations en bore se retrouvent dans cet intervalle de teneurs naturelles. Mais la relation entre le sodium et le bore pourrait s'expliquer par l'influence de la marée haute, et donc d'un apport des eaux marines de la baie, au point d'échantillonnage de la rivière Au Foin et du Poste. Cependant, les heures de prélèvements ne correspondent pas à une marée haute. Une autre source commune de bore et de sodium reconnue sont les eaux usées, même traitées. Ces deux éléments sont très solubles et ne sont pas retirés des eaux lors de leur passage dans la station d'épuration. En fait, ce sont deux bons traceurs de la pollution urbaine (Neal *et al.*, 2010) dans les eaux douces.

Les tableaux 4-25 et 4-26 rapportent les concentrations des éléments autre que les métaux alcalins et alcalino-terreux dans la phase dissoute et particulaire.

L'arsenic a été détecté dans quatre échantillons sur cinq de la phase dissoute, mais les concentrations sont faibles, nettement sous la recommandation canadienne de 10 µg/L pour l'eau potable, et comparables aux valeurs les plus faibles rapportées pour les eaux de la rivière Saguenay (Tremblay et Gobeil, 1990). Les rivières Hall, des Rapides et Au Foin ont une concentration en arsenic comparable (0,06 à 0,10 µg/L), la rivière Du Poste a la concentration la plus élevée avec 0,33 µg/L.

L'arsenic associé à la matière particulaire n'a été détectée que dans les échantillons des rivières Au Foin et du Poste, avec une valeur à 45 mg/kg pour cette dernière. Cette valeur doit être considérée avec précaution, puisque l'arsenic n'a été détecté que pour un seul sous-échantillon de matière

particulaire en suspension sur trois à ce site. Le manganèse pour sa part a été détecté dans tous les échantillons de la phase particulaire, mais dans seulement deux échantillons de la phase dissoute. La corrélation entre les concentrations de l'arsenic et du manganèse, transportés par le flux des rivières, ne peut pas être établie dans le cadre de cet échantillonnage.

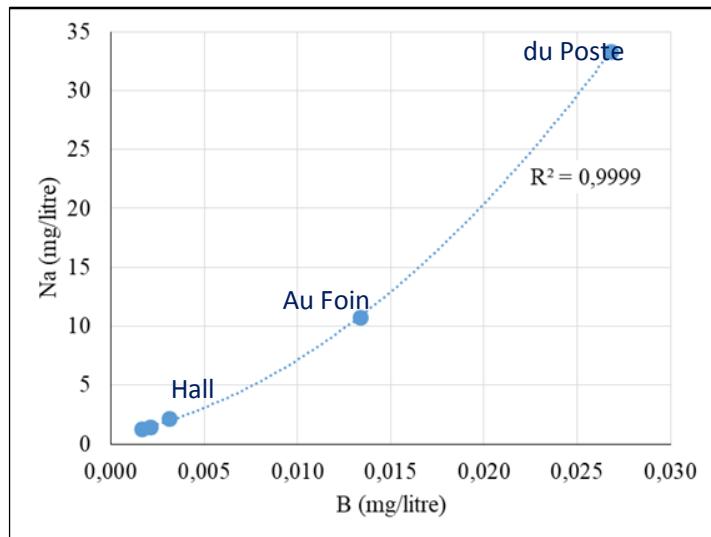


Figure 4-58 : Relation entre les concentrations du bore (B) et du sodium (Na) dans la phase dissoute de l'eau des rivières

Par contre, le fer a été détecté dans tous les échantillons de la phase dissoute de l'eau des rivières. Bien que le nombre d'échantillons d'eau des rivières soit limité, il est possible d'observer une corrélation entre l'arsenic et le fer, dans la phase dissoute (figure 4-59). C'est dans les eaux de la rivière du Poste que la concentration en fer et arsenic dissous est la plus élevée. Cependant, il n'y a pas de corrélation entre les concentrations de manganèse et de fer dans la matière particulaire.

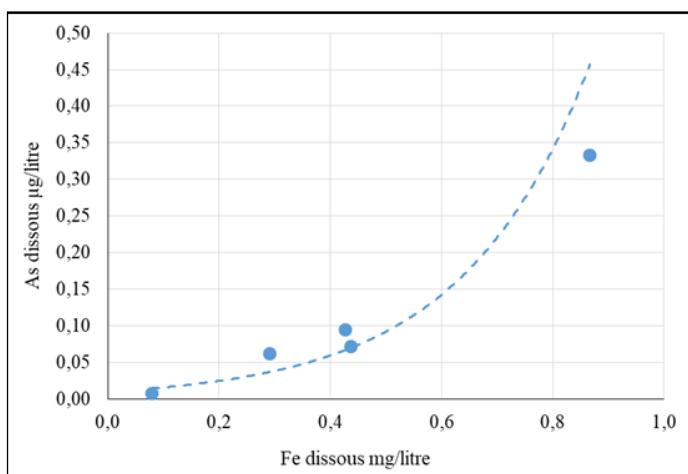


Figure 4-59 : Relation entre les concentrations totales de l'arsenic et du fer dans la phase dissoute de l'eau des rivières -La concentration de l'arsenic dans l'échantillon de la rivière Moisie a été extrapolée comme étant la moitié de la limite de détection de cet élément, soit 0,01 µg/L.

*Tableau 4-25 : Concentration des métaux et métalloïdes dans la phase dissoute, moyenne de deux sous-échantillons par site*

|          | B     | Al   | Ti   | V    | Cr   | Mn   | Fe   | Co   | Ni   | Cu   | Zn    | As   | Se   | Mo   | Cd   | Hg   | Tl   | Pb   | Bi    | U     |
|----------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Unité    | µg/L  | µg/L | µg/L | µg/L | µg/L | µg/L | µg/L | µg/L | µg/L | µg/L | µg/L  | µg/L | µg/L | µg/L | µg/L | ng/L | mg/L | µg/L | µg/L  | µg/L  |
| Rapides  | 2,11  | 0,33 | 1,4  | 0,18 | 0,25 | 7,98 | 0,29 | 0,21 | 0,37 | 0,49 | <LD   | 0,06 | <LD  | <LD  | 4,92 | <LD  | 0,67 | <LD  | 0,073 |       |
| Au Foin  | 13,37 | 0,12 | 1,88 | 0,21 | 0,19 | <LD  | 0,44 | 0,04 | 0,35 | 1,32 | <LD   | 0,07 | <LD  | 0,31 | 0,01 | 6,33 | <LD  | 0,23 | <LD   | 0,014 |
| du Poste | 26,79 | 0,14 | 2,25 | 0,61 | 0,62 | <LD  | 0,87 | <LD  | 0,45 | 0,69 | 2,93  | 0,33 | <LD  | <LD  | 6,78 | <LD  | 0,31 | <LD  | 0,021 |       |
| Hall     | 3,12  | 0,38 | 1,47 | 0,2  | 0,37 | 10,6 | 0,43 | 0,33 | 0,68 | 0,45 | 49,62 | 0,1  | <LD  | <LD  | 0,02 | 5,42 | <LD  | 1,26 | <LD   | 0,014 |
| Moisie   | 1,67  | 0,09 | 0,4  | <LD  | 0,13 | <LD  | 0,08 | <LD  | 0,31 | <LD  | 1,99  | <LD   | 0,046 |

*Tableau 4-26 : Concentration des métaux et métalloïdes dans la phase particulaire, moyenne de trois sous-échantillons par site*

|          | B     | Al    | Ti    | V     | Cr    | Mn    | Fe     | Co    | Ni    | Cu    | Zn    | As    | Se    | Mo    | Cd    | Hg    | Tl    | Pb    | Bi    | U     |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Unité    | mg/kg  | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg |
| Rapides  | 9     | 12074 | 402   | 22    | 45    | 211   | 19909  | 4,11  | <LD   | <LD   | 9046  | <LD   | 0,18  | <LD   | 4,95  | <LD   | 56    | <LD   | 2,43  |       |
| Au Foin  | 57    | 20865 | 726   | 40    | 46    | 649   | 45712  | 8,45  | <LD   | 52,6  | 11372 | 1     | 0,94  | <LD   | 1,05  | <LD   | 1     | 32    | <LD   | 1,05  |
| du Poste | 147   | 30345 | 935   | 105   | 121   | 1113  | 109352 | 12,5  | <LD   | 20,4  | 15267 | 45,81 | 0,32  | <LD   | 0,81  | 217   | <LD   | 59    | <LD   | 1,95  |
| Hall     | 50    | 14126 | 461   | 40    | 64    | 301   | 41591  | 4,39  | <LD   | 58,4  | 17494 | <LD   | 0,7   | <LD   | 4,39  | 212   | <LD   | 135   | <LD   | 2,3   |
| Moisie   | 92    | 25540 | 896   | 38    | 67    | 982   | 45047  | 16,12 | <LD   | 420,8 | 11915 | <LD   | 3,49  | <LD   | 4,45  | 16683 | 5     | 41    | 33,4  | 3,35  |

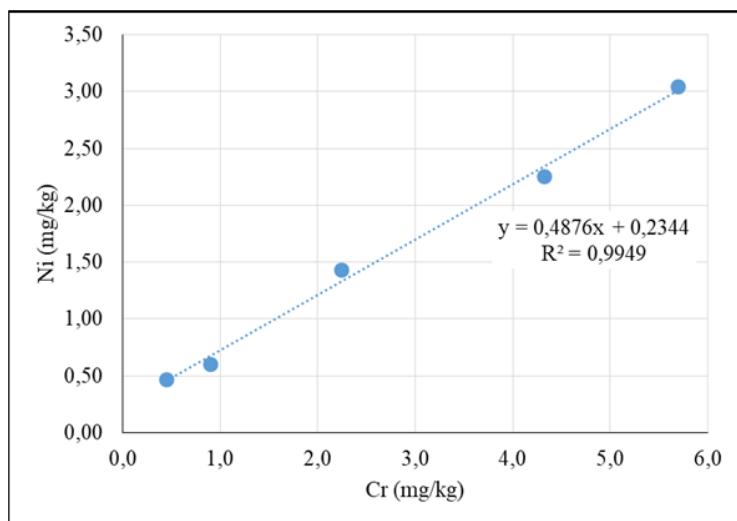
Tableau 4-27 : Concentration des métaux et métalloïdes dans le sédiment de surface

|                 | B     | Al    | Ti    | V     | Cr    | Mn    | Fe    | Co    | Ni    | Cu    | Zn    | As    | Se    | Mo    | Cd    | Hg    | Tl    | Pb    | U     |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Unité           | mg/kg | µg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg |
| <b>Rapides</b>  | 0,2   | 532   | 26    | 3,25  | 0,9   | 15    | 1391  | 0,4   | 0,6   | 0,38  | 2,53  | 0,09  | 0     | 0,011 | 0,002 | 11,13 | 0,002 | 0,399 | 0,042 |
| <b>Au Foin</b>  | 1,24  | 2194  | 111   | 7,75  | 5,7   | 56    | 3732  | 1,44  | 3,05  | 2,58  | 10,18 | 0,24  | 0,01  | 0,056 | 0,006 | 4,12  | 0,031 | 1,597 | 0,157 |
| <b>du Poste</b> | 2,56  | 994   | 54    | 3,97  | 2,24  | 31    | 2512  | 0,67  | 1,43  | 1,44  | 6,3   | 0,3   | 0     | 0,057 | 0,003 | 2,39  | 0,007 | 0,603 | 0,075 |
| <b>Hall</b>     | 0,68  | 1617  | 94    | 6,75  | 4,32  | 45    | 3138  | 1,09  | 2,25  | 2,11  | 7,04  | 0,29  | 0,01  | 0,078 | 0,005 | 1,12  | 0,023 | 0,574 | 0,127 |
| <b>Moisie</b>   | <LD   | 311   | 12    | 0,82  | 0,45  | 17    | 681   | 0,35  | 0,47  | 0,58  | 2,33  | 0,05  | 0,05  | 0,004 | 0,002 | 4,05  | <LD   | 0,174 | 0,023 |

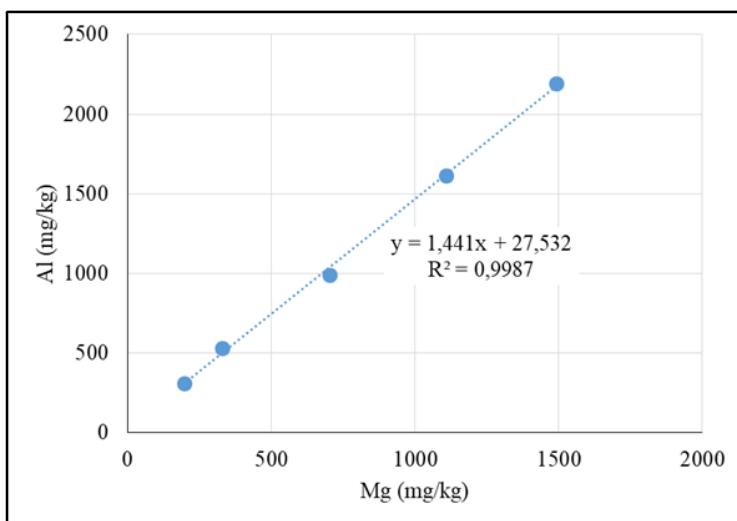
Tableau 4-28 : Concentration des métaux et métalloïdes dans les argiles

|                    | B     | Al    | Ti    | V     | Cr    | Mn    | Fe    | Co    | Ni    | Cu    | Zn    | As    | Se    | Mo    | Cd    | Hg    | Tl    | Pb    | U     |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Unité              | mg/kg | µg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg | mg/kg |
| <b>Rapides</b>     | 7     | 52337 | 9934  | 86    | 46    | 819   | 39439 | 15    | 24    | 19    | 83    | 1,78  | 0,03  | 0,74  | 0,03  | 2,81  | 0,31  | 6,84  | 2,57  |
| <b>Au Foin</b>     | 21,97 | 66727 | 9656  | 111   | 83    | 905   | 47266 | 17    | 31    | 23    | 79    | 4,16  | 0,09  | 1,07  | 0,07  | 12,65 | 0,41  | 7,68  | 2,44  |
| <b>du Poste</b>    | 37,47 | 36325 | 5647  | 77    | 54    | 544   | 33179 | 10    | 19    | 15    | 62    | 3,81  | 0,06  | 0,83  | 0,04  | 17    | 0,12  | 5,7   | 1,87  |
| <b>Hall</b>        | 8,63  | 57504 | 8691  | 103   | 76    | 801   | 40124 | 15    | 29    | 24    | 69    | 3,44  | 0,07  | 1,12  | 0,05  | 5,41  | 0,32  | 5,61  | 1,98  |
| <b>Vieux Poste</b> | 10,74 | 73349 | 10238 | 118   | 105   | 1164  | 46133 | 19    | 40    | 35    | 79    | 1,96  | 0,03  | 0,57  | 0,04  | 6,99  | 0,37  | 6,8   | 1,91  |

Les tableaux 4-27 et 4-28 rapportent les résultats pour l'analyse des métaux et métalloïdes extractibles dans les sédiments de surface et les argiles des affluents de la baie. Les échantillons d'argiles analysés pour les métaux extractibles correspondent au sédiment prélevé identifié argile, et non pas à la fraction argileuse qui s'obtient avec un traitement chimique pour isoler la fraction de taille inférieure à 2 microns. Les concentrations des métaux et métalloïdes sont plus élevées dans les argiles que dans le sédiment de surface des rivières, comme il a été observé dans les sédiments marins dans les campagnes précédentes. Les concentrations en métaux sont similaires. Les relations entre les traceurs géochimiques chrome vs nickel et magnésium vs aluminium, appliqués aux échantillons de sédiment de surface des rivières, donnent des résultats comparables à ce qui a été obtenu avec les sédiments marins (figures 4-50 et 4-51).



*Figure 4-60 : Relation entre la concentration en chrome et celle du nickel dans le sédiment de surface des échantillons des cinq rivières  
Les concentrations sont exprimées en mg/kg de poids sec.*



*Figure 4-61 : Relation entre la concentration en magnésium et celle de l'aluminium dans le sédiment de surface des échantillons des cinq rivières  
Les concentrations sont exprimées en mg/kg de poids sec.*

Ces fortes corrélations pour les deux paires de métaux ont une valeur de la pente similaire à celle obtenue avec les sédiments de surface des campagnes 2014 et 2016 (voir partie I de ce chapitre). Les échantillons d'argiles prélevés dans les rivières et au site du Vieux Poste présentent également des relations chrome/nickel et magnésium/aluminium linéaires, mais avec des pentes différentes : 0,3 et 3,2 respectivement.

Ces résultats suggèrent qu'une partie de la composition chimique des sédiments de surface de la baie est liée aux apports de sédiments des affluents. Par exemple, le débit moyen annuel de la rivière des Rapides est d'environ 22 m<sup>3</sup>/sec, soit  $7 \times 10^{11}$  litres par année. En considérant une concentration en matière particulaire de 8 mg/litre (tableau 4-22) et une concentration en chrome de 45 mg/kg dans cette matière particulaire (tableau 4-26), nous obtenons un apport annuel en chrome de 252 kilogrammes au sédiment de la baie, si tout le chrome est retenu dans la baie. Un apport annuel de plus ou moins 100 tonnes de fer est obtenu par ce calcul.

Cependant, il n'y a pas de covariance entre l'arsenic et le manganèse ou le fer, ni dans le sédiment de surface, ni dans les argiles. La figure 4-62 illustre cette observation pour l'arsenic et le manganèse.

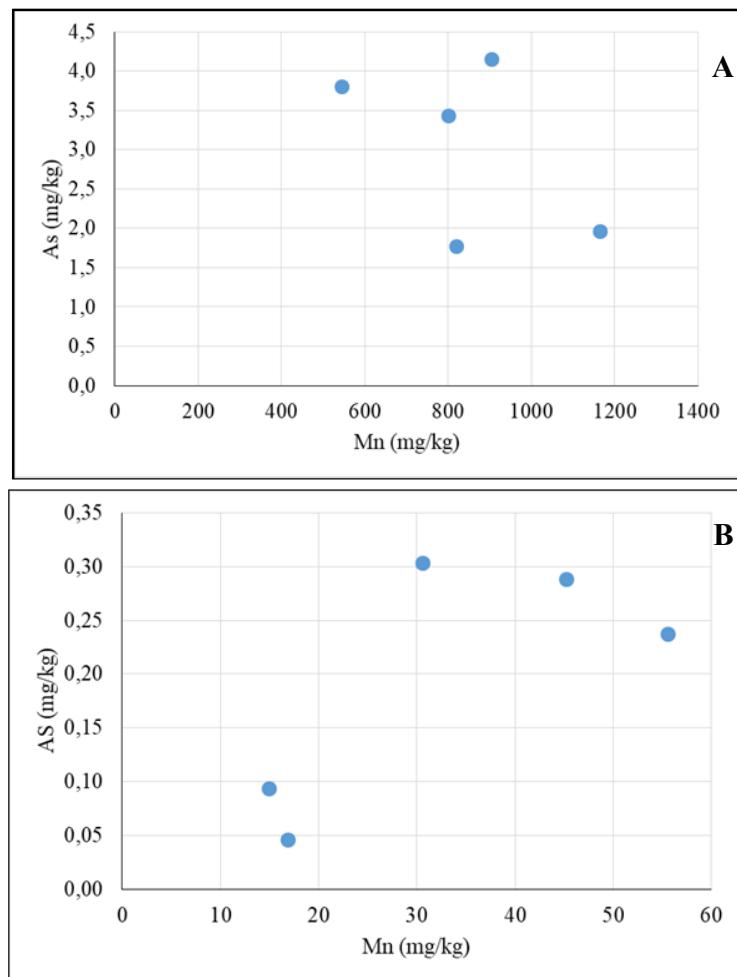


Figure 4-62 : Relation entre la concentration en manganèse et celle de l'arsenic dans les argiles de quatre rivières et du site du Vieux Poste (A) et le sédiment de surface des échantillons des cinq rivières (B)  
Les concentrations sont exprimées en mg/kg de poids sec.

Par contre, le fer et le manganèse présentent une certaine covariance positive dans leurs concentrations dans les sédiments des rivières, avec les valeurs les plus élevées pour les sédiments de rivière pour les échantillons de la rivière au Foins (figure 4-63). Le sédiment de surface de la rivière Moisie présente la concentration la plus faible en fer.

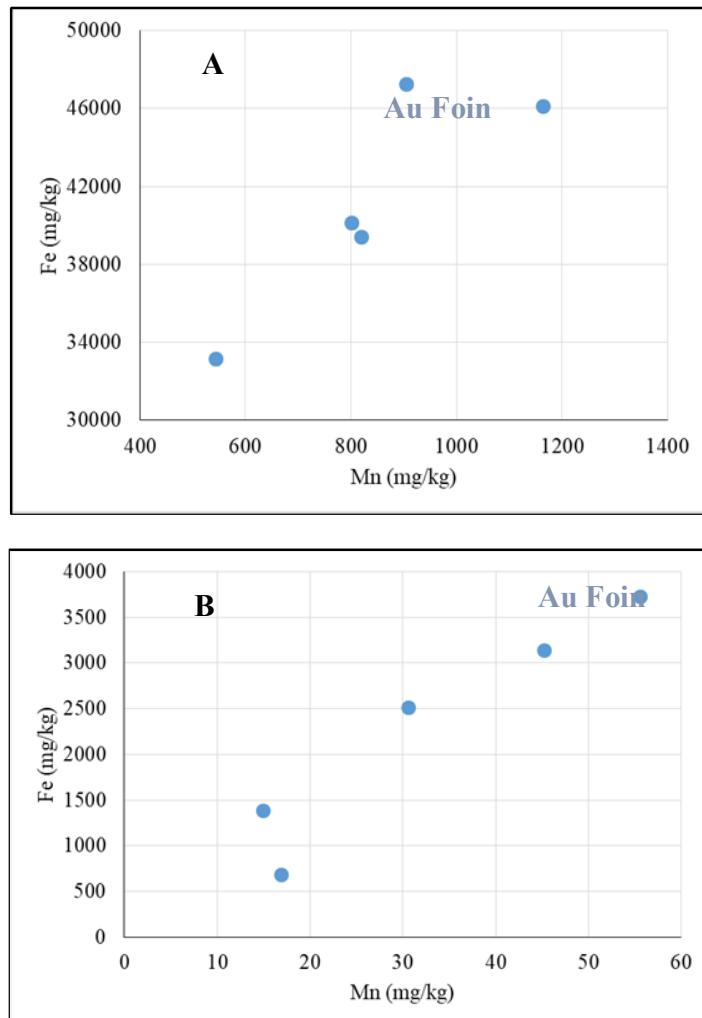


Figure 4-63 : Relation entre la concentration en manganèse et celle du fer dans les argiles de quatre rivières et du site Vieux Poste (A) et le sédiment de surface des échantillons des cinq rivières (B)  
Les concentrations sont exprimées en mg/kg de poids sec.

## 4.6 Constats et recommandations de la Partie II

(Auteur : Richard St-Louis, PhD.)

L'analyse de l'eau, de la matière particulaire, des sédiments de surface et des argiles des quatre affluents de la baie de Sept-Îles, et de la rivière Moisie, a permis de faire un premier état de la contribution des rivières Hall, des Rapides, aux Foins et du Poste à l'apport en métaux à la baie de Sept-Îles, en particulier l'arsenic. Plusieurs paramètres physico-chimiques et éléments sont plus concentrés dans les eaux des rivières aux Foins et du Poste. Les processus d'érosion chimique et

physique en cours sur leur bassin versant y seraient plus importants. La covariance positive entre le bore et le sodium indiquerait une pression urbaine importante sur la rivière du Poste.

L'absence de corrélation entre l'arsenic et le manganèse, ou le fer, dans les sédiments et argiles des rivières suggère que les corrélations observées dans les sédiments marins s'établissent par l'action des processus biogéochimiques qui se produisent dans le sédiment de la baie. La corrélation entre les concentrations de l'arsenic dissous et le fer dissous dans les eaux des rivières (avec les valeurs les plus élevées pour la rivière du Poste) est une situation qui s'apparente à celle du fjord du Saguenay, où la coagulation des colloïdes de fer, lors de la rencontre des eaux douces avec les eaux salées, favorise le transport de l'arsenic vers le milieu benthique (Saulnier et Mucci, 2000). Ce processus explique peut-être la présence de deux des trois zones où la concentration en arsenic est plus élevée, soit au centre de la baie et au nord-est.

Sur la base des concentrations en métaux et métalloïdes extractibles du sédiment de surface et des argiles des rivières qui se jettent dans la baie, et de deux traceurs géochimiques, les teneurs sont suffisantes pour alimenter les sédiments marins de surface. Pour plus de précision, une étude complémentaire serait recommandée afin d'établir des bilans de transport à partir d'un échantillonnage de la matière particulière de l'eau des rivières (et des eaux marines de la baie) avec une technique intégrant des composantes temporelle et spatiale.



Crédit photo : Kim Aubut-Demers

## 4.7 Références

- Amorosi A. (2012). Chromium and nickel as indicators of source-to-sink sediment transfer in a Holocene alluvial and coastal system (Po Plain Italy). *Sedimentary Geology*, 280: 260-269.
- Bout-Roumazeilles, V., Cortijo, E., Labeyrie, L., Debrabant, P., 1999. Clay mineral evidence of nepheloid layer contribution to the Heinrich layers in the Northwest Atlantic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoceanography* 146, 211-228.
- Bull. Cent. Rech. Pau, SNPA, 3, 147-153.
- Chamley, H. (1989), *Clay Sedimentology*, Springer Verlag, Berlin.
- Chen H.-F. et al., 2013. The Ti/Al molar ratio as a new proxy for tracing sediment transportation processes and its application in aeolian events and sea level change in East Asia. *J of Asian Earth Sciences*, 73: 31-38.
- Clark, J.A., Farrell, W.E., Peltier, W.R., 1978. Global changes in postglacial sea level: A numerical calculation. *Quaternary Research* 9, 265-287. doi:10.1016/0033-5894(78)90033-9
- De Mora S. et al., 2010. Distribution of petroleum hydrocarbons and organochlorinated contaminants in marine biota and coastal sediments from the ROPME Sea Area during 2005. *Mar Poll Bullet*, 60: 2323-2349.
- Dionne, J.-C., 1977. La mer de Goldthwait au Québec. *Géographie physique et Quaternaire* 31, 61. doi:10.7202/1000055ar
- Environnement Canada et 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. 39 pages.
- Esquevin, J. (1969), Influence de la composition chimique des illites surcristallinité, *Bull. Cent. Rech. Pau, SNPA*, 3, 147-153.
- Gobeil C. (1996). L'arsenic dans les sédiments du fjord du Saguenay. *Profils Saguenay*, vol.2, No. 1.
- Institut nordique de recherche en environnement et en santé au travail (INREST) (2014). *Observatoire de veille environnementale de la baie de Sept-Îles – Phase I – 2013*. Disponible au: [http://www.inrest.ca/data/55-inrest/ressources/documents/sys\\_docs/rapport\\_phase-i\\_observatoire\\_baie-si.pdf](http://www.inrest.ca/data/55-inrest/ressources/documents/sys_docs/rapport_phase-i_observatoire_baie-si.pdf)
- Institut nordique de recherche en environnement et en santé au travail (INREST) (2015). *Observatoire de veille environnementale de la baie de Sept-Îles – Phase II – 2014*. Disponible au: [http://www.inrest.ca/data/55-inrest/ressources/documents/sys\\_docs/rapport\\_phase-ii\\_observatoire\\_baie-si.pdf](http://www.inrest.ca/data/55-inrest/ressources/documents/sys_docs/rapport_phase-ii_observatoire_baie-si.pdf)
- Josenhans, H., Lehman, S., 1999. Late glacial stratigraphy and history of the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences* 36, 1327-1345.
- Loring D.H. et Nota D.J.G., 1968. Occurrence and significance of iron, manganese and titanium in glacial marine sediments from the estuary of the St.Lawrence river. *J. Fish. Res. Board of Canada*, 25 (11): 2327-2347.
- Loring, D.H., Nota, D.J.G., 1973. Morphology and sediments of the Gulf of St. Lawrence. *Bull. Fish. Res. Bd. Can.* 182, 147 p.
- Montero-Serrano, J.C., Bout-Roumazeilles, V., Tribouillard, N., Sionneau, T., Riboulleau, A., Bory, A., Flower, B., 2009. Sedimentary evidence of deglacial megafloods in the northern Gulf of Mexico (Pigmy Basin). *Quaternary Science Reviews* 28, 3333-3347.
- Mucci A. (1998). Le comportement biogéochimique du phosphore et de l'arsenic dans le fjord du Saguenay. *Profils Saguenay*, vol.3, No 2.
- Neal C. et al. (2010). Decreasing boron concentrations in UK rivers: Insights into reductions in detergent formulations since the 1990s and within-catchment storage issues. *Science of the Total Environment*, 408: 1374-1385.
- Petschick, R., 2000. MacDiff 4.2 Manual. MacDiff [Online].
- Sakan S. et al., 2015. Evaluation of sediment contamination with heavy metals: the importance of determining appropriate background content and suitable element for normalization. *Environ Geochem Health*, 37: 97-113.
- Saulnier I. et Gagnon C., 2006. Background levels of metals in St. Lawrence River sediments: implications for sediment quality criteria and environmental management. *Integrated Environmental Assessment and Management*, Vol 2, 2: 126-141.
- Sulu-Gambari F. et al., 2017. Molybdenum dynamics in sediments of a seasonally-hypoxic coastal marine basin. *Chemical Geology*, 466: 627-640.
- Saulnier I. et A. Mucci (2000). Trace metal remobilization following the resuspension of estuarine sediments: Saguenay Fjord, Canada. *Applied Geochemistry*, 15: 191-200.
- Tobiszewski M. et Namiesnik J., 2012. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources. *Environmental Pollution*, 162: 110-119.
- Tremblay G.H. et C. Gobeil (1990). Dissolved arsenic in the St Lawrence Estuary and the Saguenay Fjord, Canada. *Marine Pollution Bulletin*, 21: 465-469.

## Annexes 4

### Annexes 4A : cartes

Auteure :

Laurence Paquette, laboratoire de Philippe Archambault, ISMER

Collaborateurs :

Richard St-Louis, professeur à l'UQAR

Geneviève Faille, coordonnatrice à l'OGSL

Elliot Dreujou, étudiant au doctorat à UQAR et à l'Université Laval

Philippe Archambault, professeur à l'Université Laval

Julie Carrière, directrice de projet et directrice de l'INREST

### Avis au lecteur

Cette annexe présente une série de cartes en lien avec les résultats des échantillonnages de sédiments effectués dans la baie en 2016.

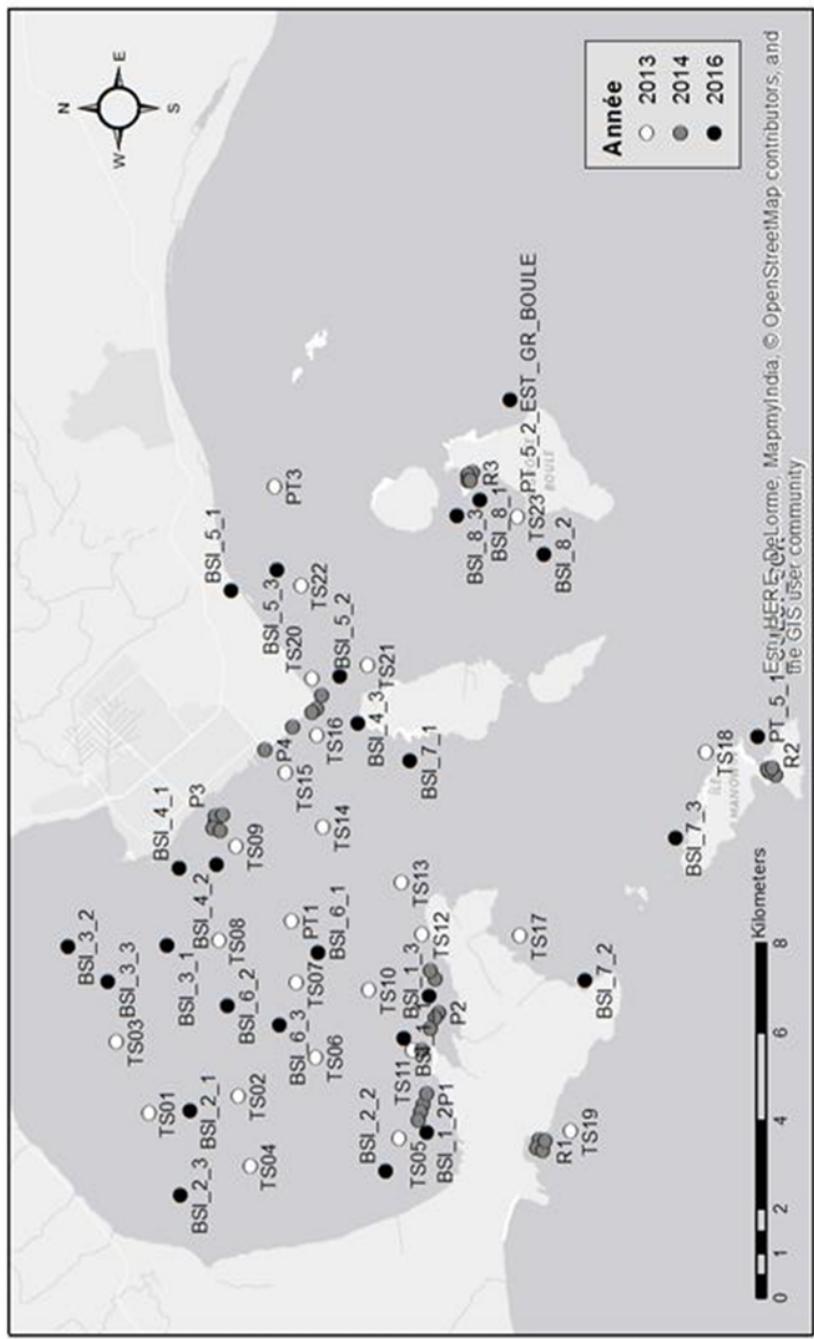
Pour chacun des métaux normés (plus le Fer) et des HAP normés, une carte des concentrations réelles rencontrées aux stations a été réalisée ainsi qu'une représentation de la diffusion de l'élément considéré, prédite par deux méthodes différentes :

- La méthode d'interpolation de Diffusion de Kernels, qui permet de représenter de façon simplifiée, la diffusion de l'élément en tenant compte de la présence des côtes. Cet estimé permet de visualiser le patron général de diffusion du contaminant.
- La méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique, qui permet de produire une surface de prédictions (uniquement à l'intérieur de la baie) mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie, un nombre supérieur de données serait nécessaire dans ces secteurs.

Par ailleurs, des cartes affichant les concentrations d'effets rares (CER), les concentrations seuils produisant un effet (CSE) et les concentrations d'effets occasionnels (CEO) pour les différents métaux et HAP normés ont également été produites.

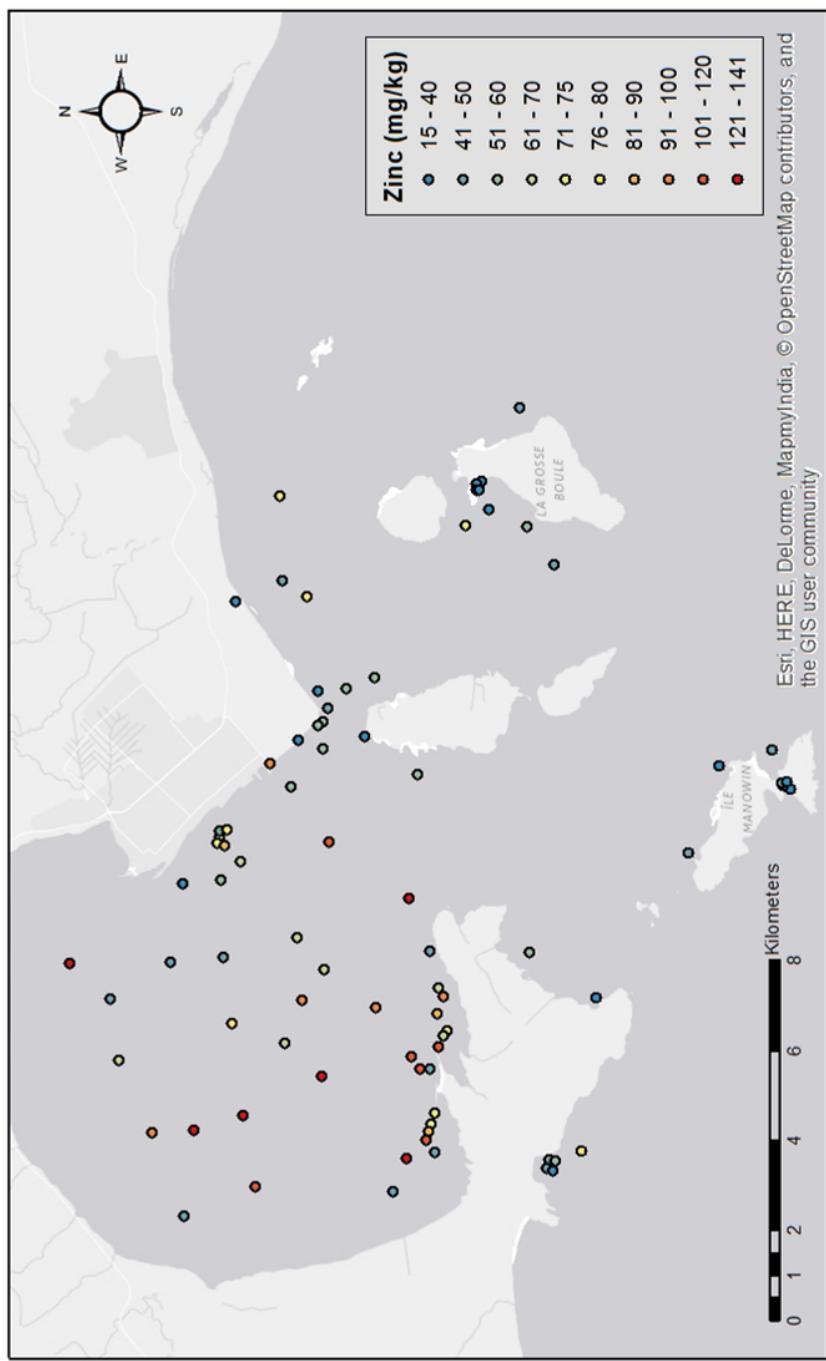
|   |     |
|---|-----|
| <i>Annexe A4-1 : Carte générale des points d'échantillonnage.....</i>   | 319 |
| <i>Annexe A4-2 : Zinc.....</i>  | 320 |
| <i>Annexe A4-3 : Cuivre .....</i>   | 323 |
| <i>Annexe A4-4 : Chrome.....</i>  | 326 |
| <i>Annexe A4-5 : Cadmium.....</i>   | 329 |
| <i>Annexe A4-6 : Nickel.....</i>  | 332 |
| <i>Annexe A4-7 : Fer.....</i>   | 335 |
| <i>Annexe A4-8 : Arsenic.....</i>   | 338 |
| <i>Annexe A4-9 : Plomb.....</i>   | 341 |
| <i>Annexe A4-10 : Mercure .....</i>   | 344 |
| <i>Annexe A4-11 : Concentration d'effets rares (CER) des métaux normalisés.....</i>   | 347 |
| <i>Annexe A4-12 : Concentration seuil produisant un effet (CSE) des métaux normalisés.....</i>                                    | 348 |
| <i>Annexe A4-13 : Concentration d'effets occasionnels (CEO) des métaux normalisés.....</i>  | 349 |
| <i>Annexe A4-14 : Fluorène.....</i>   | 350 |
| <i>Annexe A4-15 : Acénaphthène.....</i>   | 352 |
| <i>Annexe A4-16 : Anthracène .....</i>  | 355 |
| <i>Annexe A4-17 : Dibenzo anthracène.....</i>   | 358 |
| <i>Annexe A4-18 : Fluoranthène .....</i>  | 361 |
| <i>Annexe A4-19 : Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) totaux.....</i>   | 364 |
| <i>Annexe A4-20 : Concentration d'effets rares (CER) des seuils normalisés de concentration en hydrocarbures.....</i>             | 367 |
| <i>Annexe A4-21 : Concentration seuil produisant un effet (CSE) des seuils normalisés de concentration en hydrocarbures .....</i> | 368 |
| <i>Annexe A4-22 : Concentration d'effets occasionnels (CEO) des seuils normalisés de concentration en hydrocarbures .....</i>     | 369 |
| <i>Annexe A4-23 : Seuil de contamination modérée en HAP totaux.....</i>   | 370 |
| <i>Annexe A4-24 : Classes de sédiments .....</i>  | 371 |
| <i>Annexe A4-25 : Matière organique .....</i>   | 372 |

*Annexe A5-1 : Carte générale des points d'échantillonnage*



*Figure A4-1 : Identification des stations et sites (P1, P2, P3, P4, R1, R2 et R3) échantillonnées en 2013 (blanc), 2014 (gris) et 2016 (noir) à Sept-Îles, Québec*

À noter que 5 stations (A, B, C, D, E) ont été échantillonnées aux sites P1, P2, P3, P4, R1, R2 et R3 en 2014. Seul l'identifiant des sites est indiqué sur la carte dans un souci de clarté visuelle.



*Figure A4-2 : Concentrations en zinc (mg/kg) mesurées aux stations et représentées par classes de concentration*

La figure A4-2 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations réelles en zinc mesurées aux stations.

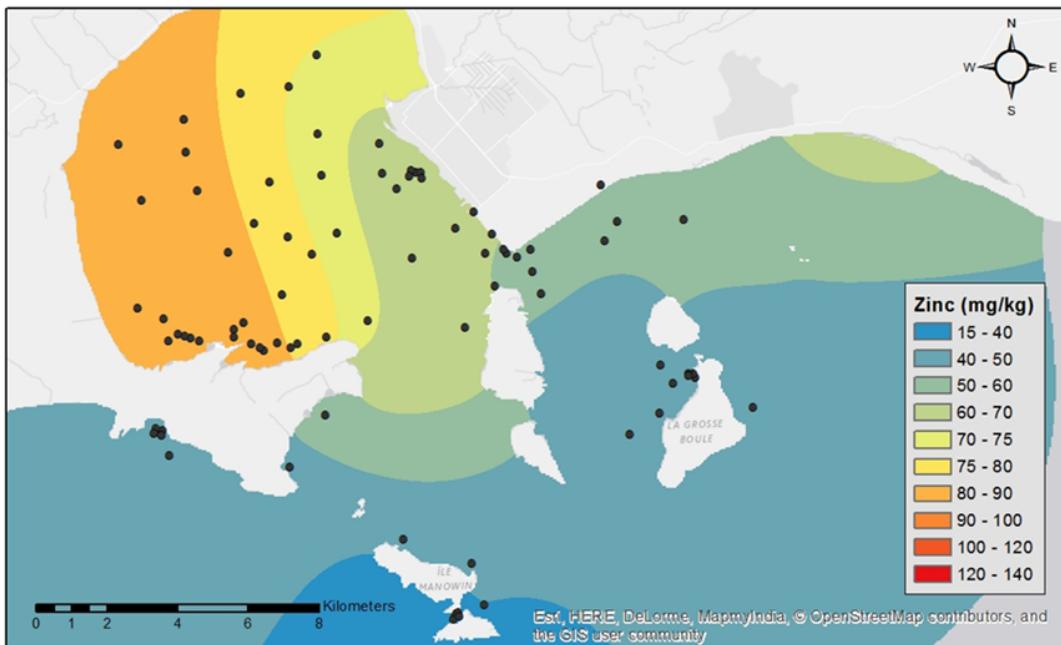


Figure A4-3 : Représentation du patron de diffusion du zinc (classes en mg/kg) obtenue par la méthode d'interpolation de Diffusion de Kernels avec pour barrière la côte et les îles

La figure A4-3 est une prédiction simplifiée de la diffusion des particules de zinc dans un médium homogène et qui tient compte de la présence des côtes qui forment des barrières à contourner. L'estimé permet de visualiser le patron général de diffusion du contaminant. La méthode utilisée est déterministe et ne tient donc pas compte de la relation statistique entre les points mesurés. Les points représentés sur la carte ont été utilisés pour l'interpolation.

Le krigage bayésien empirique est une méthode d'interpolation géostatistique permettant non seulement de produire une surface de prédictions (figure A4-4), mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions (figure A4-5). La méthode utilisée offre une précision accrue des erreurs standard de prévision par rapport aux autres méthodes de krigage. Puisqu'elle ne tient pas compte des barrières, seules les données à l'intérieur de la baie de Sept-Îles ont été interpolées. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie un nombre supérieur de données serait de mise dans ces secteurs.

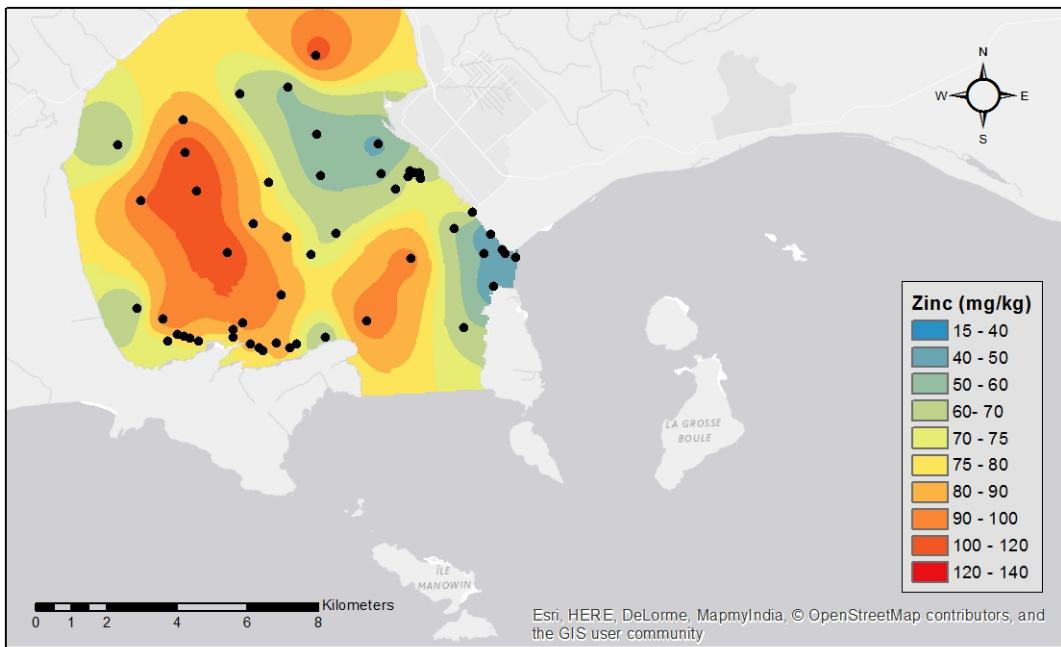


Figure A4-4 : Classes de concentration en zinc (mg/kg) prédictes dans la baie de Sept-Îles par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

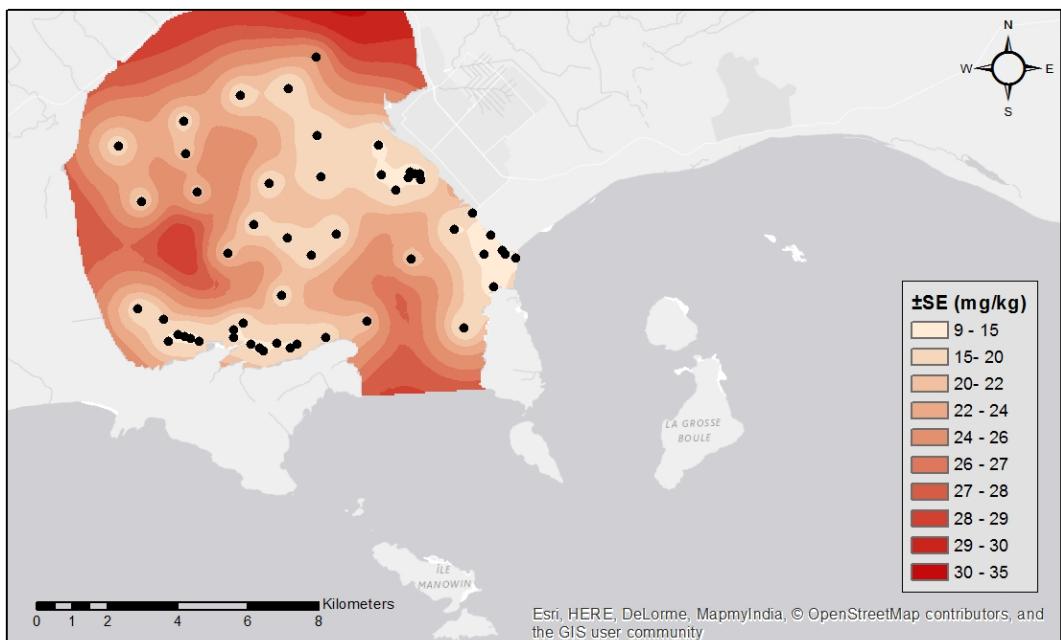
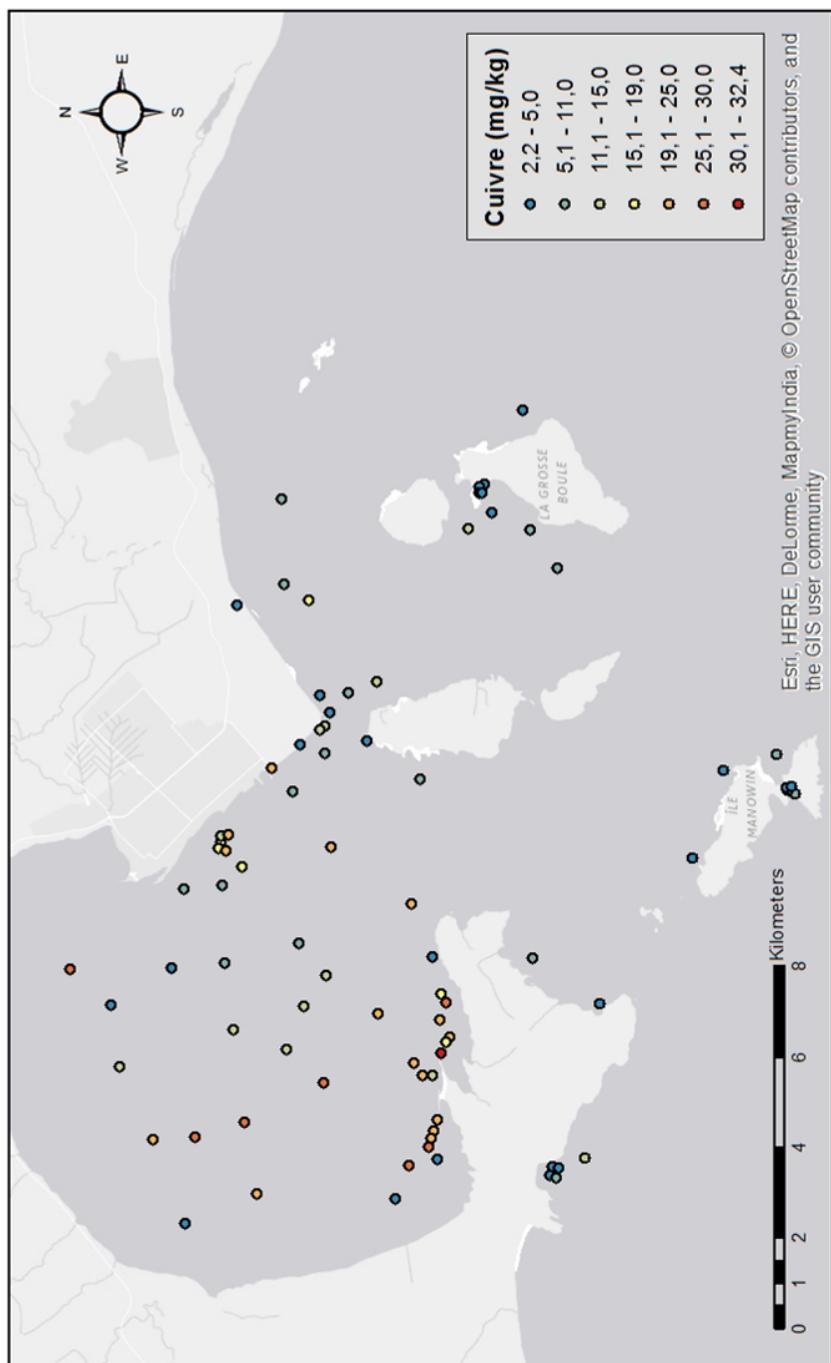
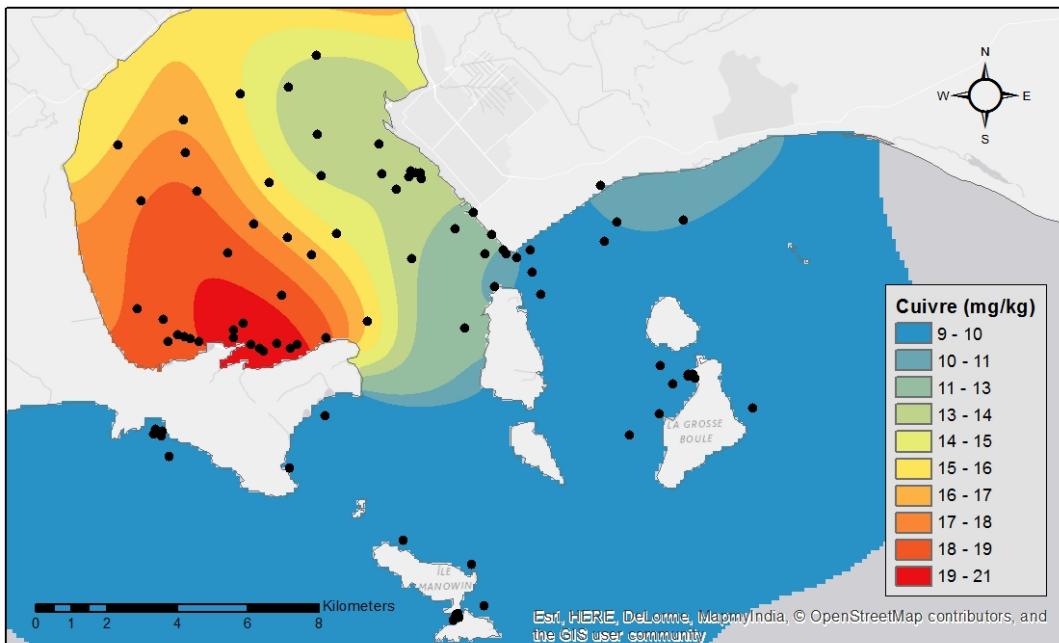


Tableau A4-5 : Classes d'erreurs standard associées aux prévisions des concentrations en zinc (mg/kg) obtenues par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

*Annexe A5-3 : Cuivre*


*Figure A4-6 : Concentrations en cuivre (mg/kg) mesurées aux stations et représentées par classes de concentration*

La figure A4-6 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations en cuivre réelles mesurées aux stations.



*Figure A4-7 : Représentation du patron de diffusion du cuivre (classes en mg/kg) obtenue par la méthode d'interpolation de Diffusion de Kernels avec pour barrière la côte et les îles*

La figure A4-7 est une prédiction simplifiée de la diffusion des particules de cuivre dans un médium homogène et qui tient compte de la présence des côtes qui forment des barrières à contourner. L'estimé permet de visualiser le patron général de diffusion du contaminant. La méthode utilisée est déterministe et ne tient donc pas compte de la relation statistique entre les points mesurés. Les points représentés sur la carte ont été utilisés pour l'interpolation.

Le krigage bayésien empirique est une méthode d'interpolation géostatistique permettant non seulement de produire une surface de prédictions (figure A4-8), mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions (figure A4-9). La méthode utilisée offre une précision accrue des erreurs standard de prévision par rapport aux autres méthodes de krigage. Puisqu'elle ne tient pas compte des barrières, seules les données à l'intérieur de la baie de Sept-Îles ont été interpolées. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie un nombre supérieur de données serait de mise dans ces secteurs.

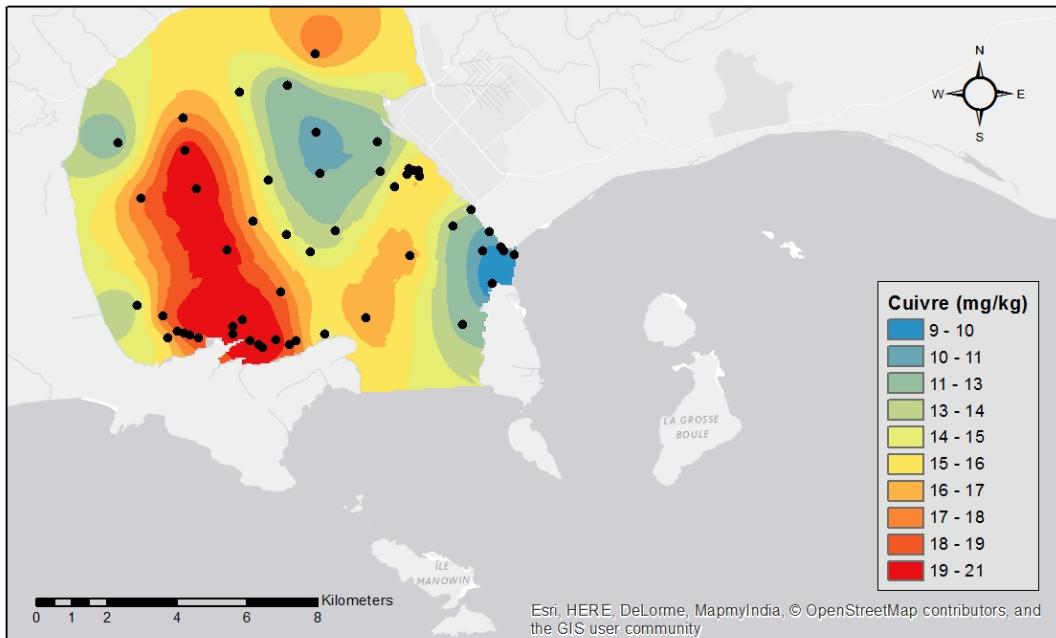


Figure A4-8 : Classes de concentration en cuivre (mg/kg) prédictes dans la baie de Sept-Îles par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

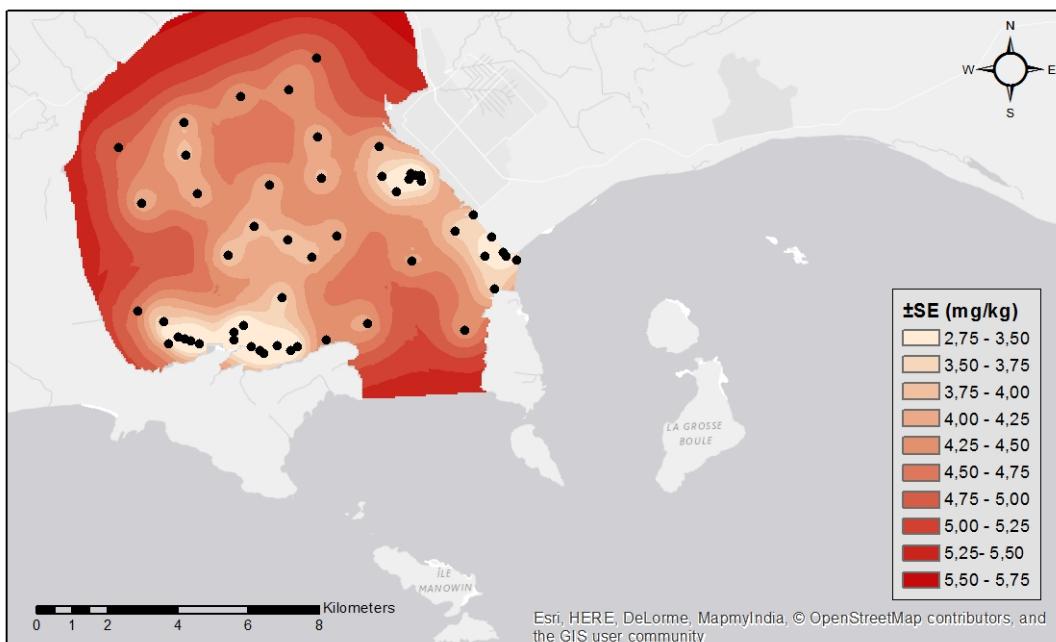
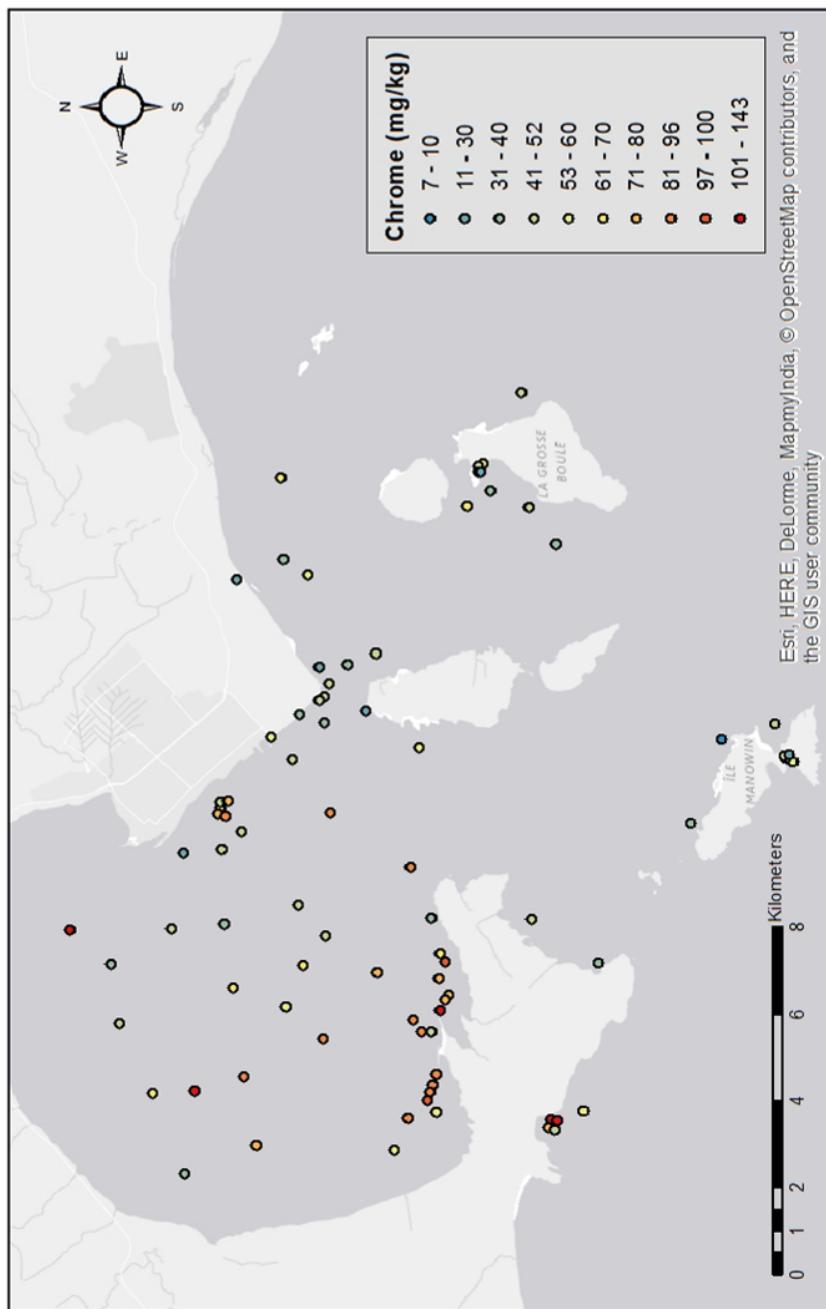


Figure A4-9 : Classes d'erreurs standard associées aux prévisions des concentrations en cuivre (mg/kg) obtenues par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique



*Figure A4-10 : Concentrations en chrome (mg/kg) mesurées aux stations et représentées par classes de concentration*

La figure A4-10 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations en chrome réelles mesurées aux stations.

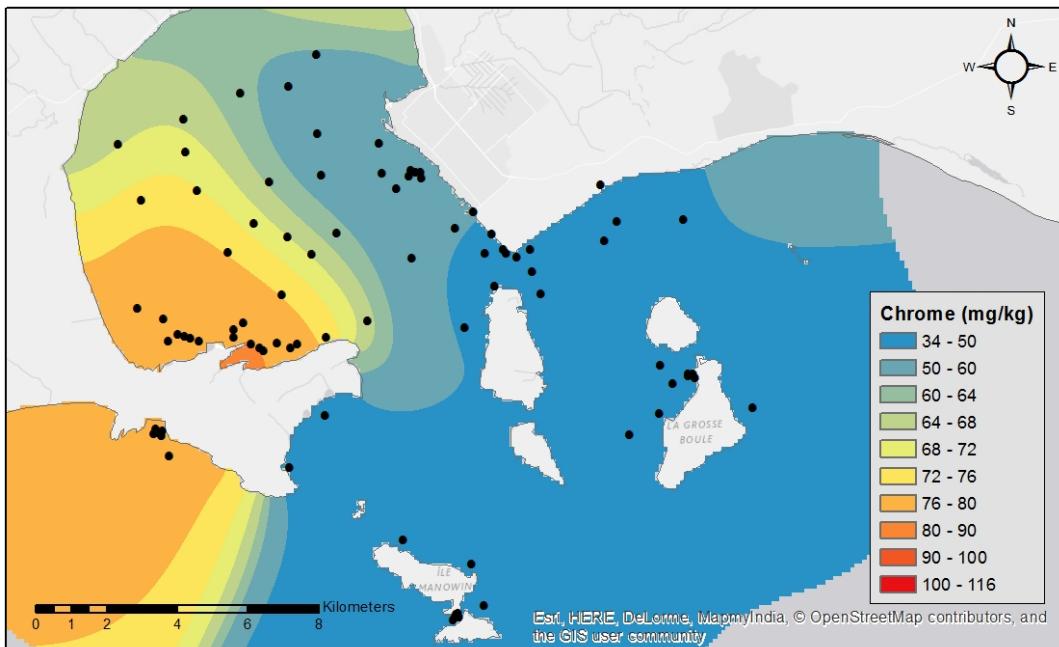


Figure A4-11 : Représentation du patron de diffusion du chrome (classes en mg/kg) obtenue par la méthode d'interpolation de Diffusion de Kernels avec pour barrière la côte et les îles

La figure A4-11 est une prédiction simplifiée de la diffusion des particules de chrome dans un médium homogène et qui tient compte de la présence des côtes qui forment des barrières à contourner. L'estimé permet de visualiser le patron général de diffusion du contaminant. La méthode utilisée est déterministe et ne tient donc pas compte de la relation statistique entre les points mesurés. Les points représentés sur la carte ont été utilisés pour l'interpolation.

Le krigage bayésien empirique est une méthode d'interpolation géostatistique permettant non seulement de produire une surface de prédictions (figure A4-12), mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions (figure A4-13). La méthode utilisée offre une précision accrue des erreurs standard de prévision par rapport aux autres méthodes de krigage. Puisqu'elle ne tient pas compte des barrières, seules les données à l'intérieur de la baie de Sept-Îles ont été interpolées. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie un nombre supérieur de données serait de mise dans ces secteurs.

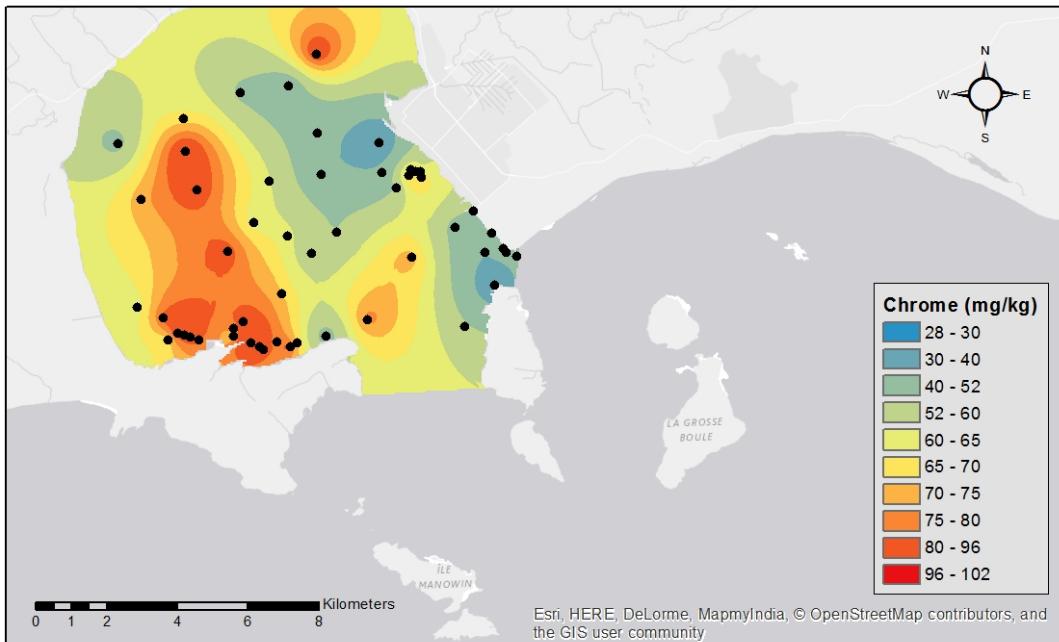


Figure A4-12 : Classes de concentration en chrome (mg/kg) prédites dans la baie de Sept-Îles par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

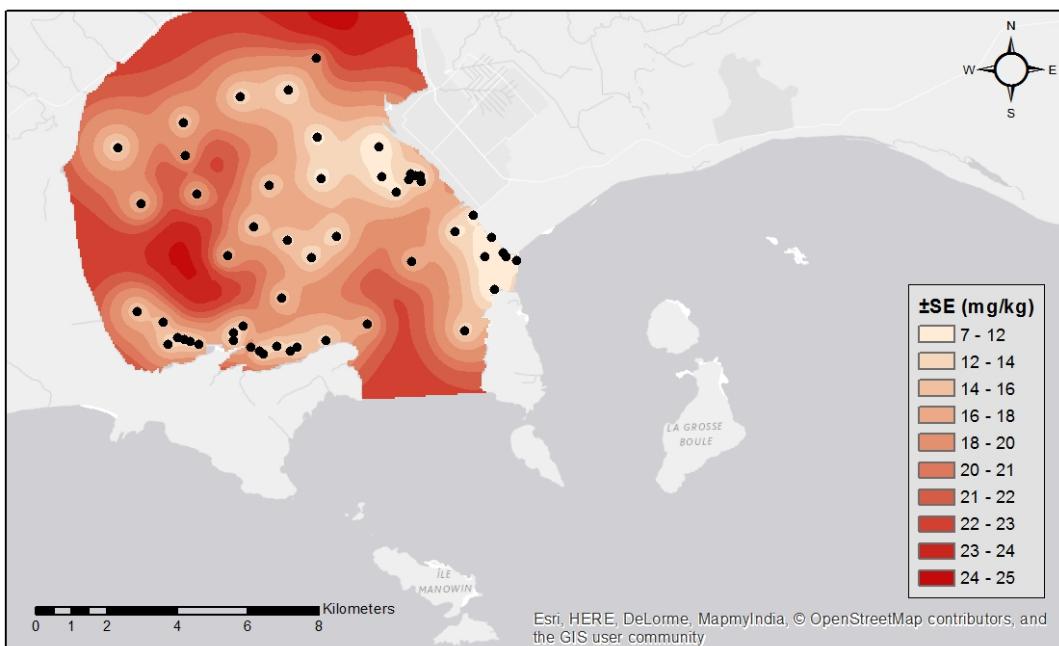
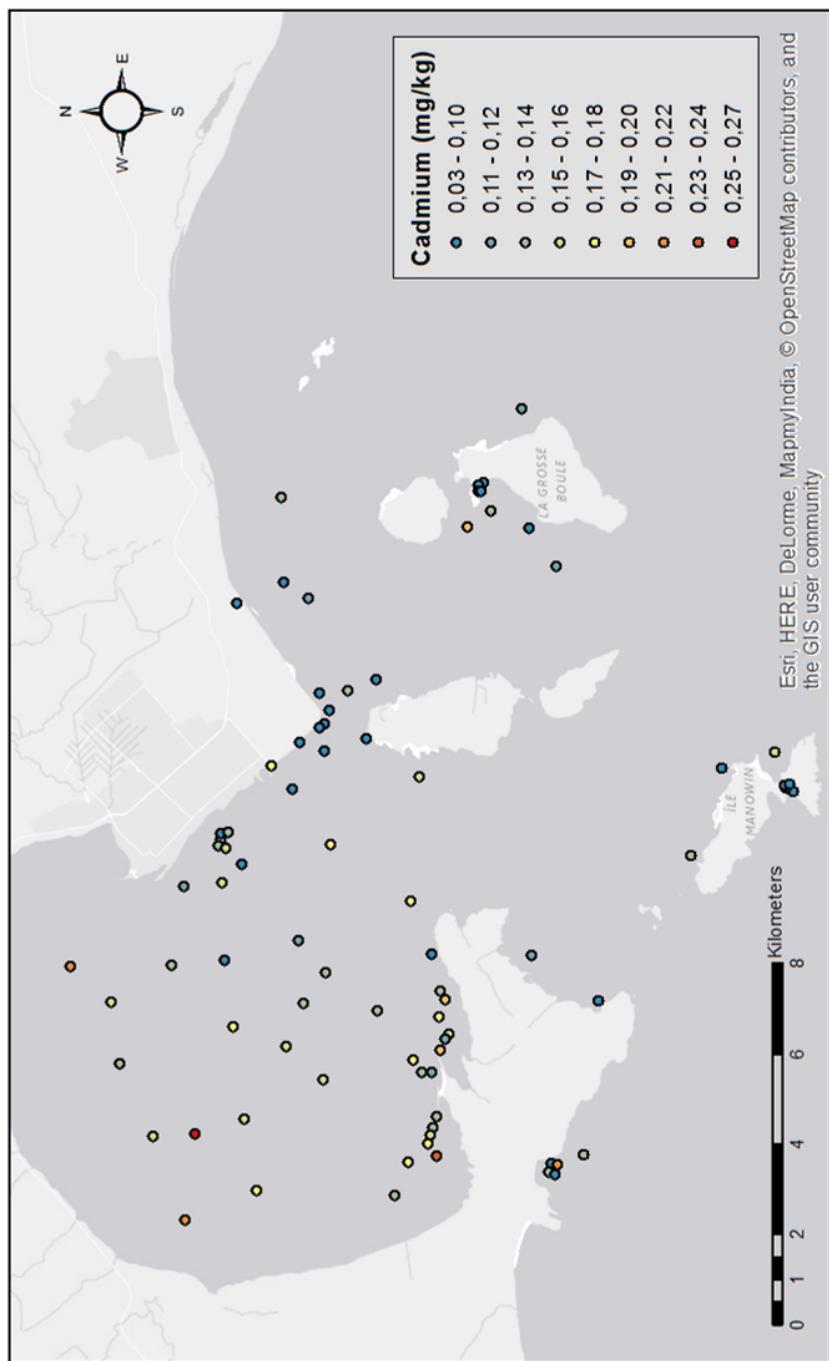


Figure A4-13 : Classes d'erreurs standard associées aux prévisions des concentrations en chrome (mg/kg) obtenues par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique



*Figure A4-14 : Concentrations en cadmium (mg/kg) mesurées aux stations et représentées par classes de concentration*

La figure A4-14 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations en cadmium réelles mesurées aux stations.

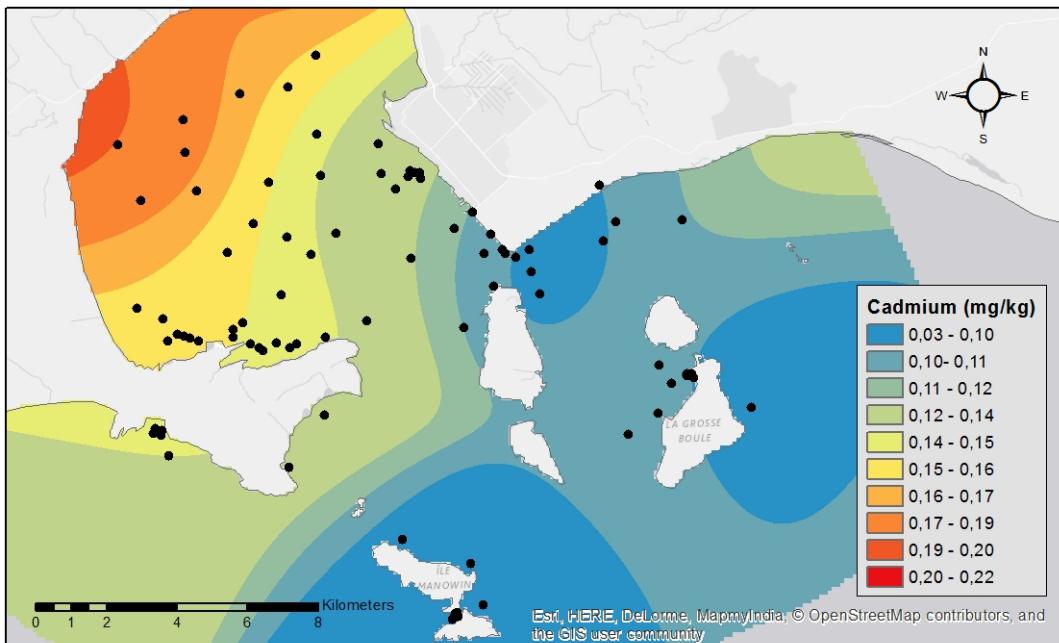


Figure A4-15 : Représentation du patron de diffusion du cadmium (classes en mg/kg) obtenue par la méthode d'interpolation de Diffusion de Kernels avec pour barrière la côte et les îles

La figure A4-15 est une prédiction simplifiée de la diffusion des particules de cadmium dans un médium homogène et qui tient compte de la présence des côtes qui forment des barrières à contourner. L'estimé permet de visualiser le patron général de diffusion du contaminant. La méthode utilisée est déterministe et ne tient donc pas compte de la relation statistique entre les points mesurés. Les points représentés sur la carte ont été utilisés pour l'interpolation.

Le krigage bayésien empirique est une méthode d'interpolation géostatistique permettant non seulement de produire une surface de prédictions (figure A4-16), mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions (figure A4-17). La méthode utilisée offre une précision accrue des erreurs standard de prévision par rapport aux autres méthodes de krigage. Puisqu'elle ne tient pas compte des barrières, seules les données à l'intérieur de la baie de Sept-Îles ont été interpolées. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie un nombre supérieur de données serait de mise dans ces secteurs.

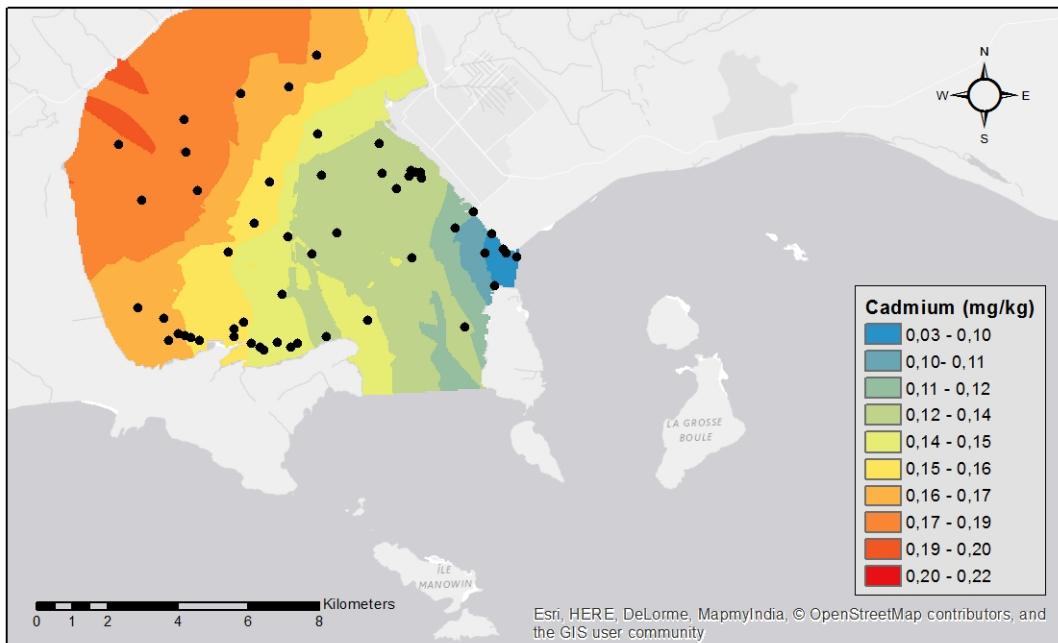


Figure A4-16 : Classes de concentration en cadmium (mg/kg) prédictes dans la baie de Sept-Îles par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

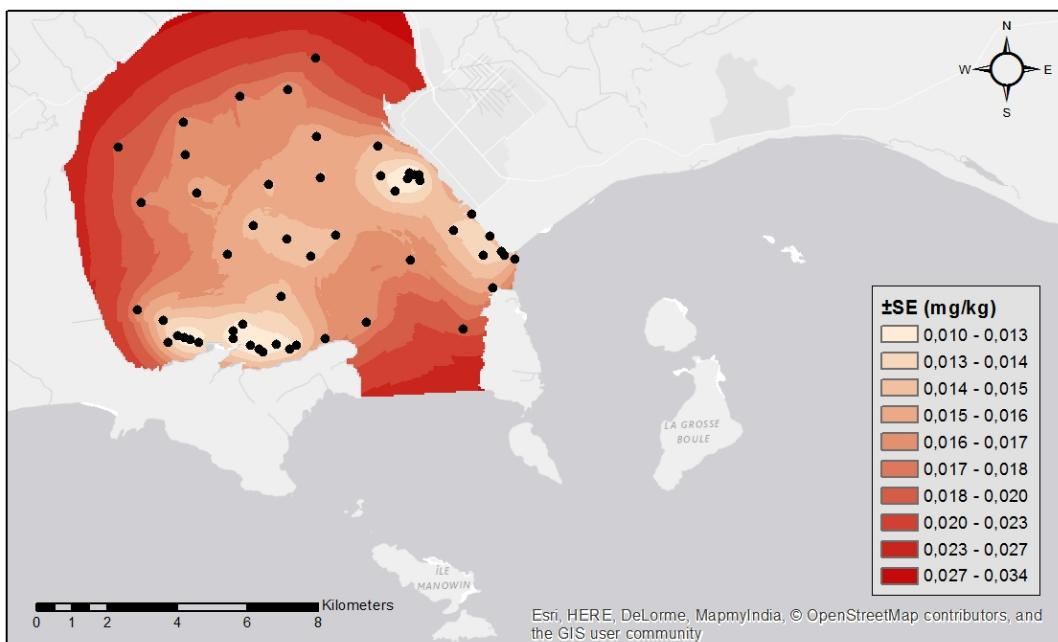
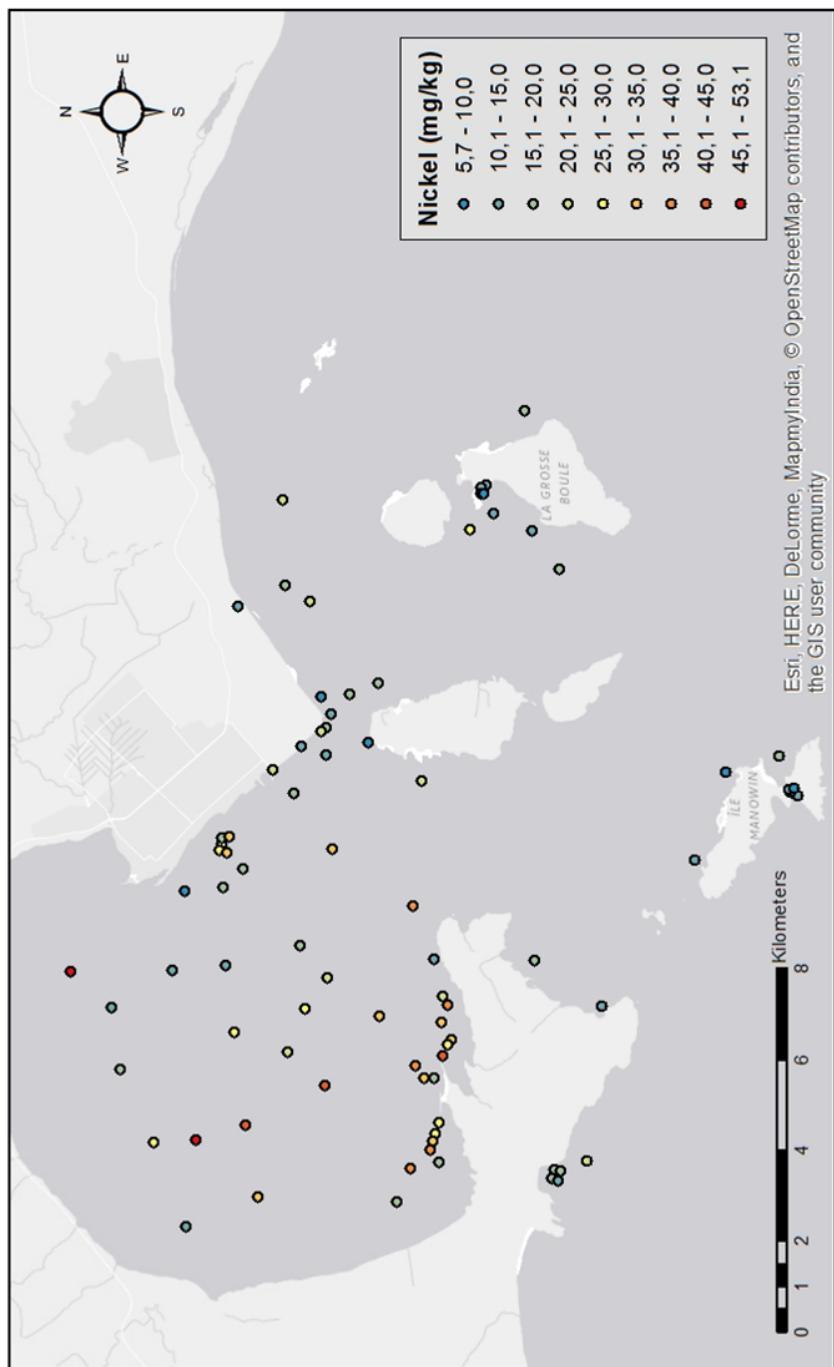


Figure A4-17 : Classes d'erreurs standard associées aux prévisions des concentrations en cadmium (mg/kg) obtenues par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique



*Figure A4-18 : Concentrations en nickel (mg/kg) mesurées aux stations et représentées par classes de concentration*

La figure A4-18 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations en nickel réelles mesurées aux stations.

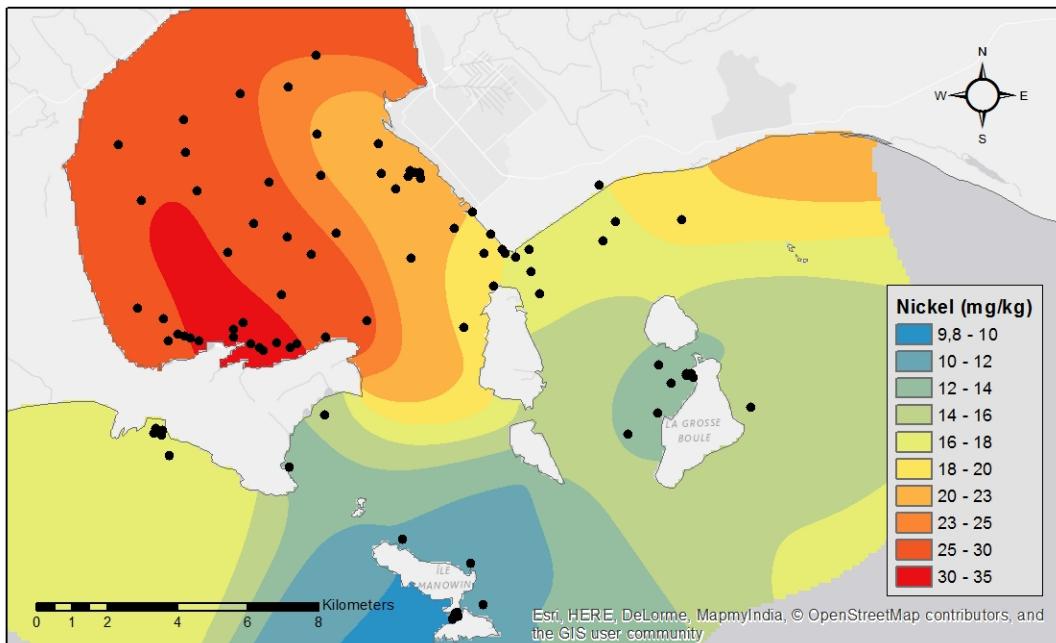


Figure A4-19 : Représentation du patron de diffusion du nickel (classes en mg/kg) obtenue par la méthode d'interpolation de Diffusion de Kernels avec pour barrière la côte et les îles

La figure A4-19 est une prédiction simplifiée de la diffusion des particules de nickel dans un médium homogène et qui tient compte de la présence des côtes qui forment des barrières à contourner. L'estimé permet de visualiser le patron général de diffusion du contaminant. La méthode utilisée est déterministe et ne tient donc pas compte de la relation statistique entre les points mesurés. Les points représentés sur la carte ont été utilisés pour l'interpolation.

Le krigage bayésien empirique est une méthode d'interpolation géostatistique permettant non seulement de produire une surface de prédictions (figure A4-20), mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions (figure A4-21). La méthode utilisée offre une précision accrue des erreurs standard de prévision par rapport aux autres méthodes de krigage. Puisqu'elle ne tient pas compte des barrières, seules les données à l'intérieur de la baie de Sept-Îles ont été interpolées. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie un nombre supérieur de données serait de mise dans ces secteurs.

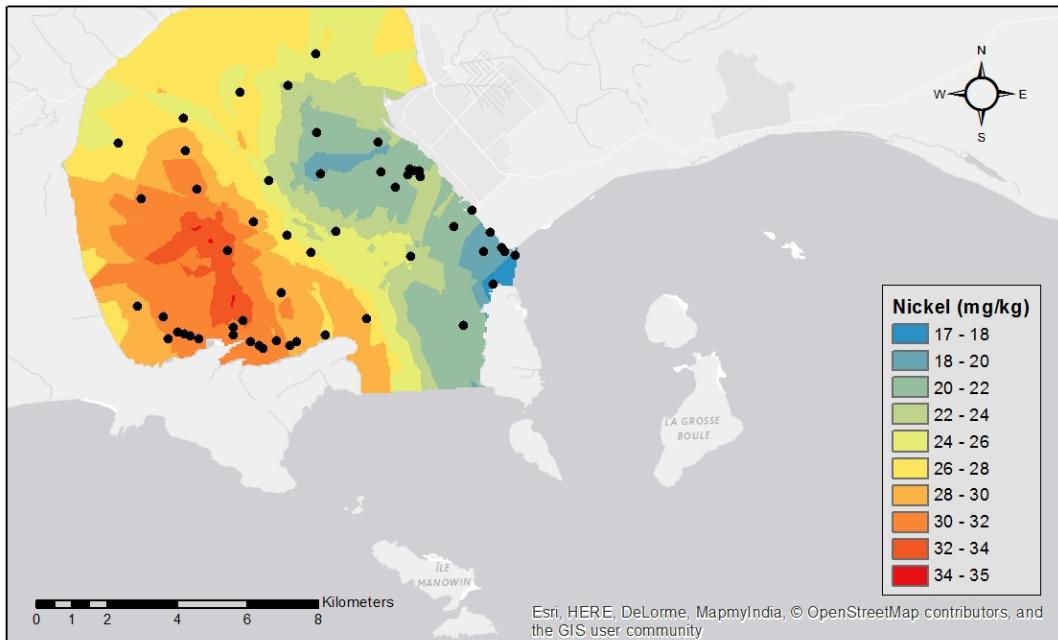


Figure A4-20 : Classes de concentration en nickel (mg/kg) prédictes dans la baie de Sept-Îles par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

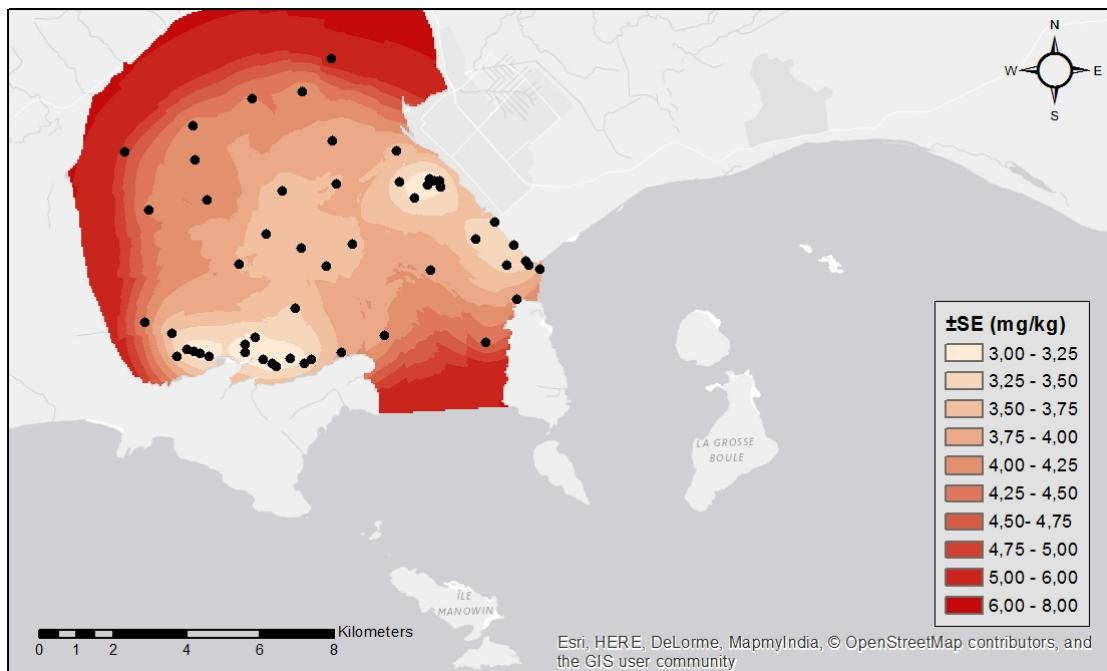
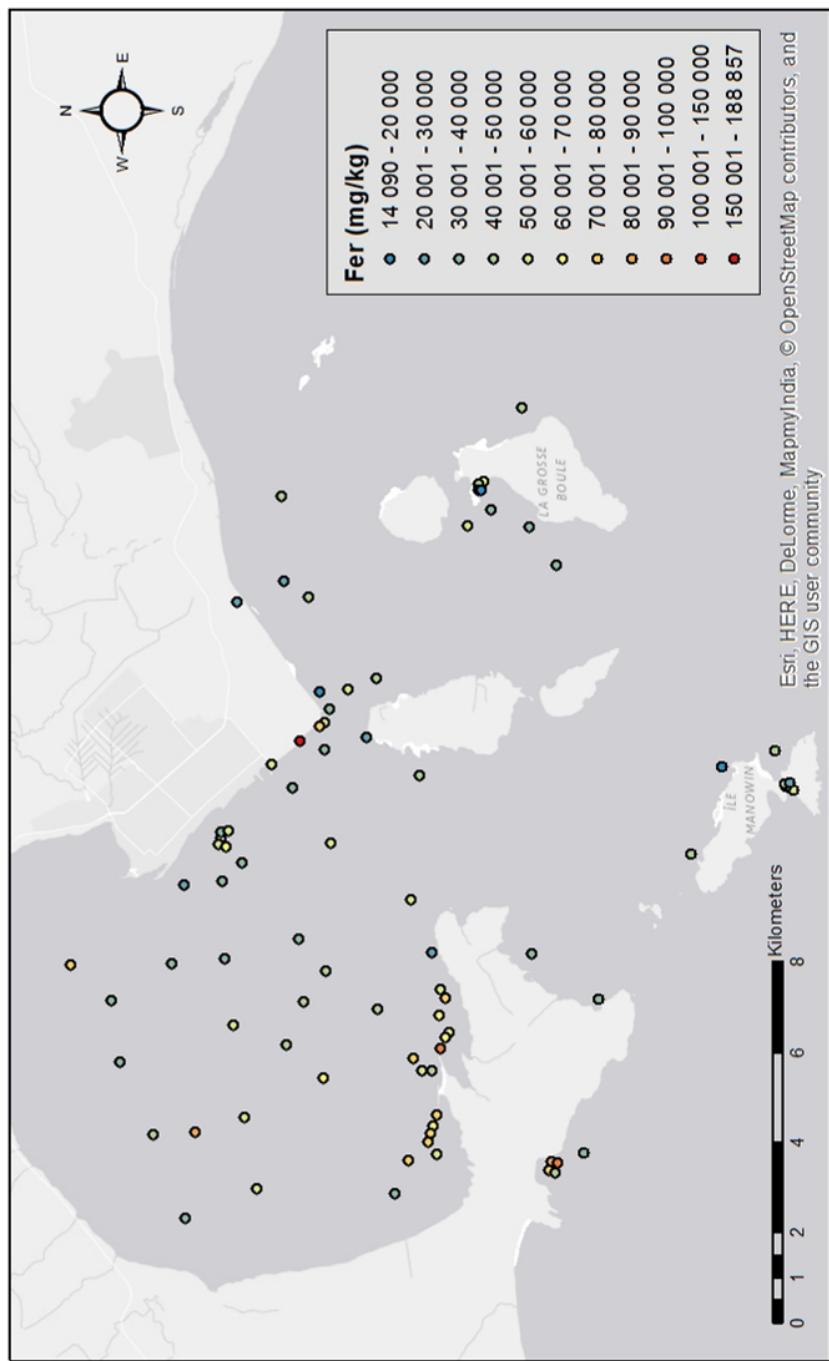
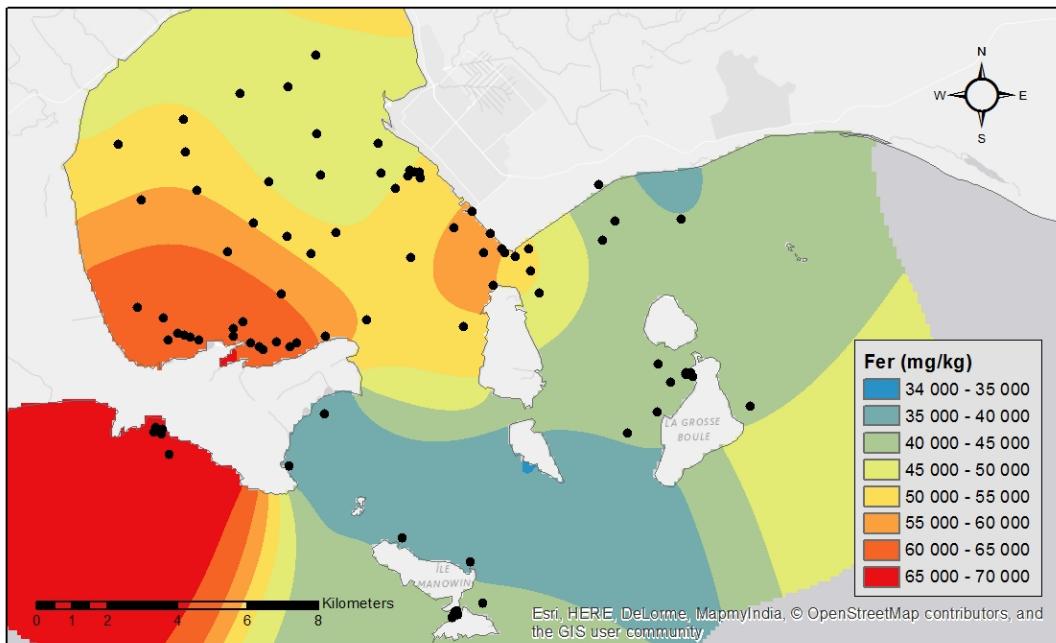


Figure A4-21 : Classes d'erreurs standard associées aux prévisions des concentrations en nickel (mg/kg) obtenues par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique



*Figure A4-22 : Concentrations en fer (mg/kg) mesurées aux stations et représentées par classes de concentration*

La figure A4-22 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations en fer réelles mesurées aux stations.



*Figure A4-23 : Représentation du patron de diffusion du fer (classes en mg/kg) obtenue par la méthode d'interpolation de Diffusion de Kernels avec pour barrière la côte et les îles*

La figure A4-23 est une prédiction simplifiée de la diffusion des particules de fer dans un médium homogène et qui tient compte de la présence des côtes qui forment des barrières à contourner. L'estimé permet de visualiser le patron général de diffusion du contaminant. La méthode utilisée est déterministe et ne tient donc pas compte de la relation statistique entre les points mesurés. Les points représentés sur la carte ont été utilisés pour l'interpolation.

Le krigage bayésien empirique est une méthode d'interpolation géostatistique permettant non seulement de produire une surface de prédictions (figure A4-24), mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions (figure A4-25). La méthode utilisée offre une précision accrue des erreurs standard de prévision par rapport aux autres méthodes de krigage. Puisqu'elle ne tient pas compte des barrières, seules les données à l'intérieur de la baie de Sept-Îles ont été interpolées. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie un nombre supérieur de données serait de mise dans ces secteurs.

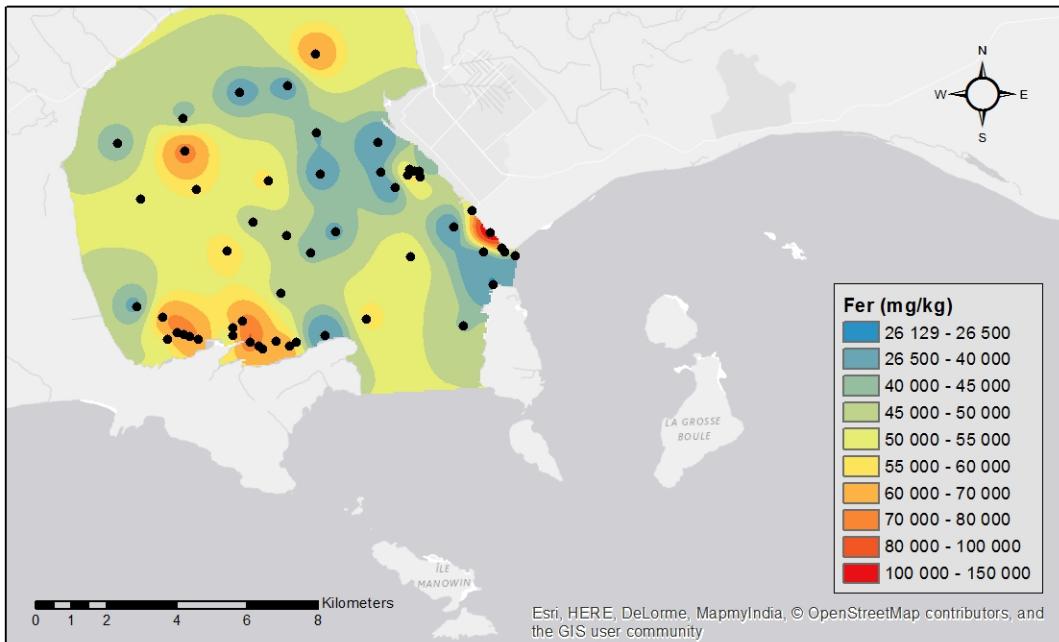


Figure A4-24 : Classes de concentration en fer (mg/kg) prédites dans la baie de Sept-Îles par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

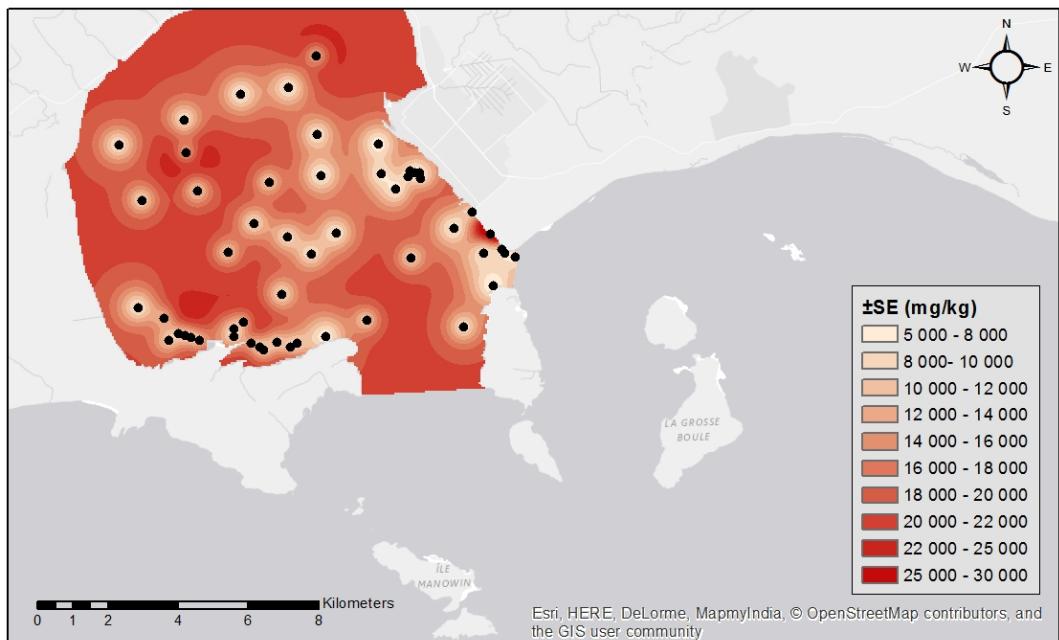
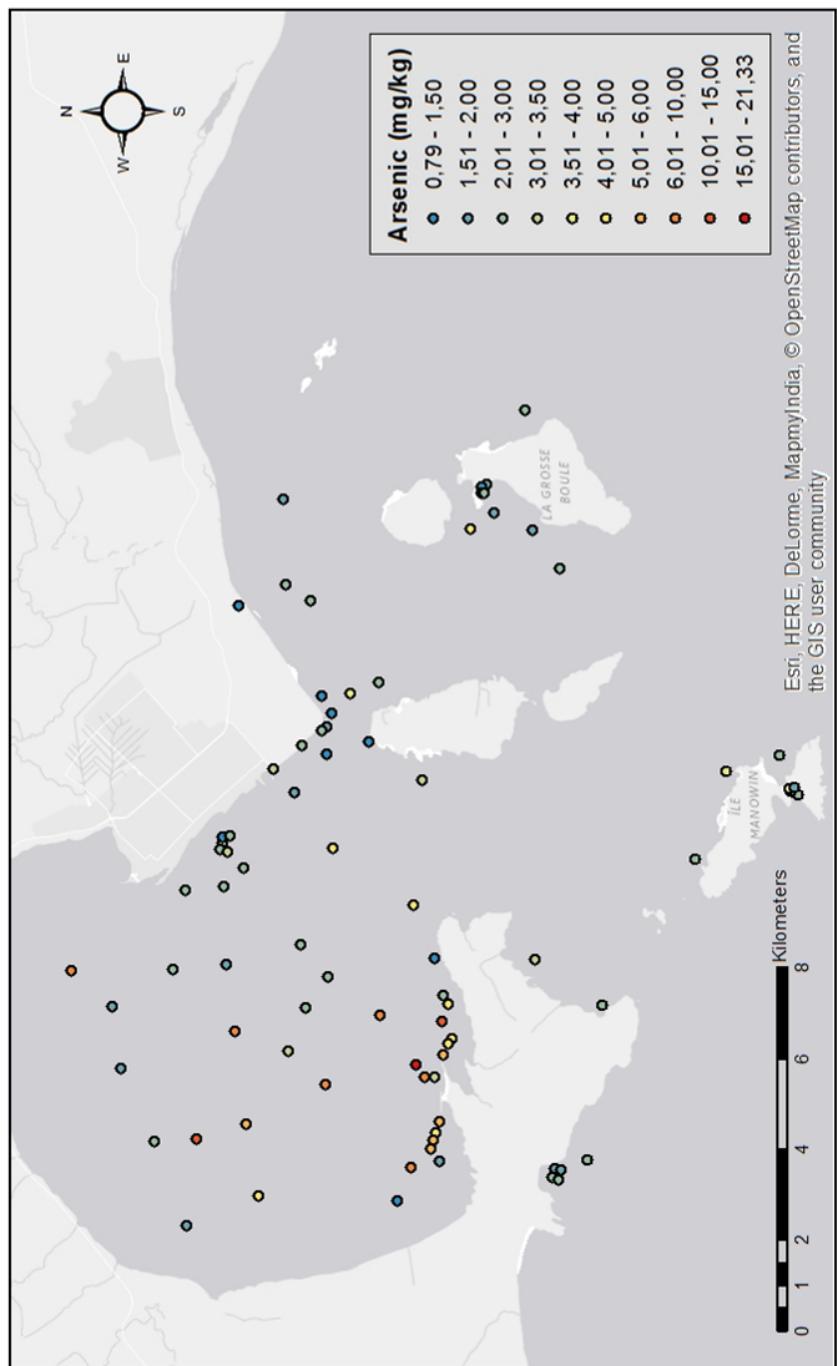
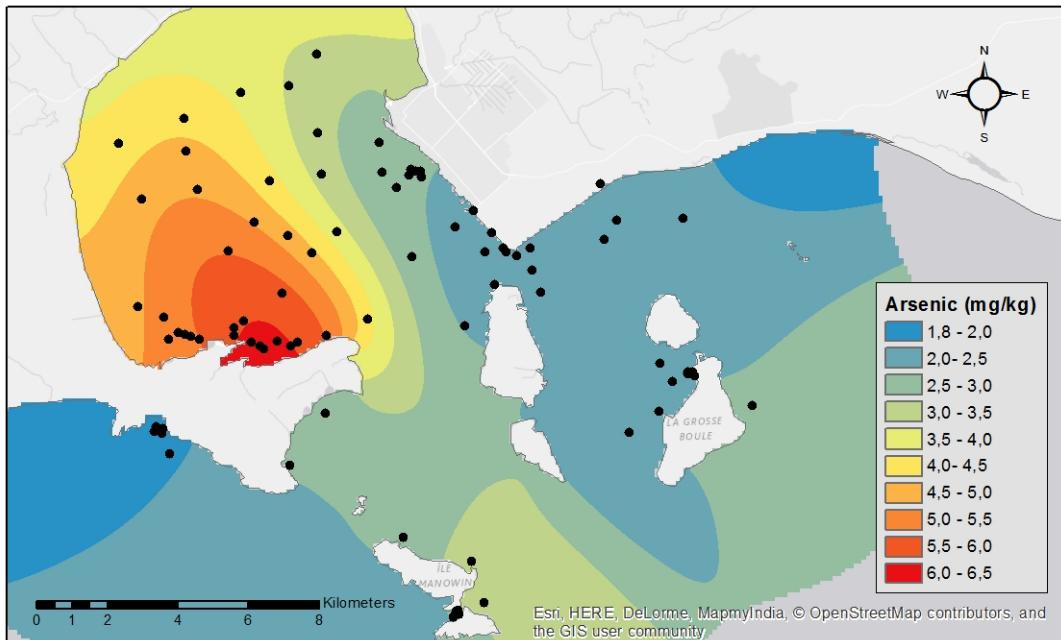


Figure A4-25 : Classes d'erreurs standard associées aux prévisions des concentrations en fer (mg/kg) obtenues par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique



*Figure A4-26 : Concentrations en arsenic (mg/kg) mesurées aux stations et représentées par classes de concentration*

La figure A4-26 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations en arsenic réelles mesurées aux stations.



*Figure A4-27 : Représentation du patron de diffusion de l'arsenic (classes en mg/kg) obtenue par la méthode d'interpolation de Diffusion de Kernels avec pour barrière la côte et les îles*

La figure A4-27 est une prédiction simplifiée de la diffusion des particules d'arsenic dans un médium homogène et qui tient compte de la présence des côtes qui forment des barrières à contourner. L'estimé permet de visualiser le patron général de diffusion du contaminant. La méthode utilisée est déterministe et ne tient donc pas compte de la relation statistique entre les points mesurés. Les points représentés sur la carte ont été utilisés pour l'interpolation.

Le krigage bayésien empirique est une méthode d'interpolation géostatistique permettant non seulement de produire une surface de prédictions (figure A4-28), mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions (figure A4-29). La méthode utilisée offre une précision accrue des erreurs standard de prévision par rapport aux autres méthodes de krigage. Puisqu'elle ne tient pas compte des barrières, seules les données à l'intérieur de la baie de Sept-Îles ont été interpolées. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie un nombre supérieur de données serait de mise dans ces secteurs.

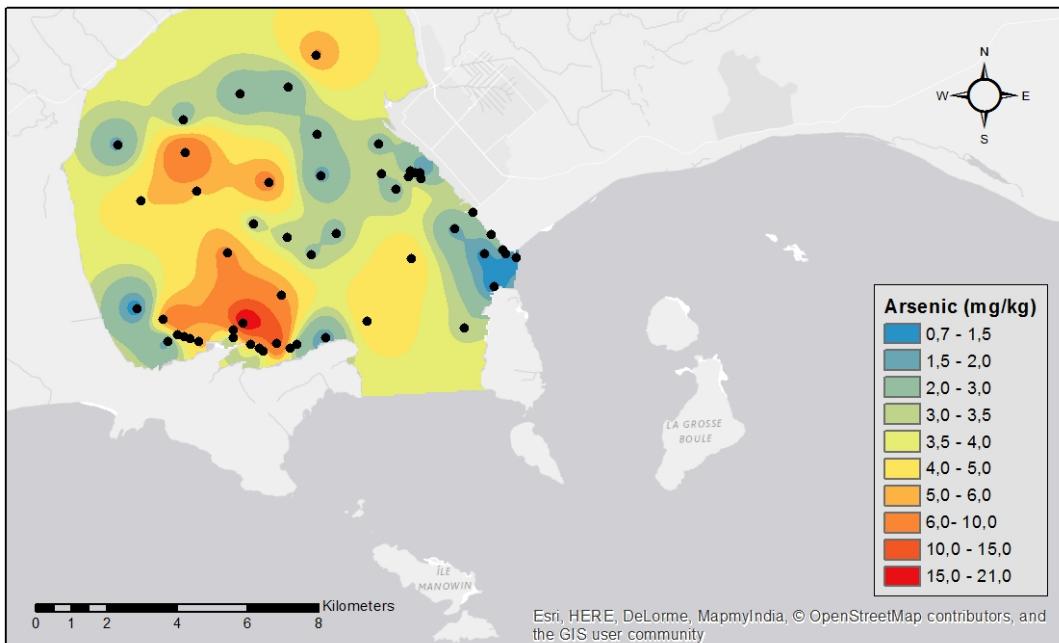


Figure A4-28 : Classes de concentration en arsenic (mg/kg) prédites dans la baie de Sept-Îles par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

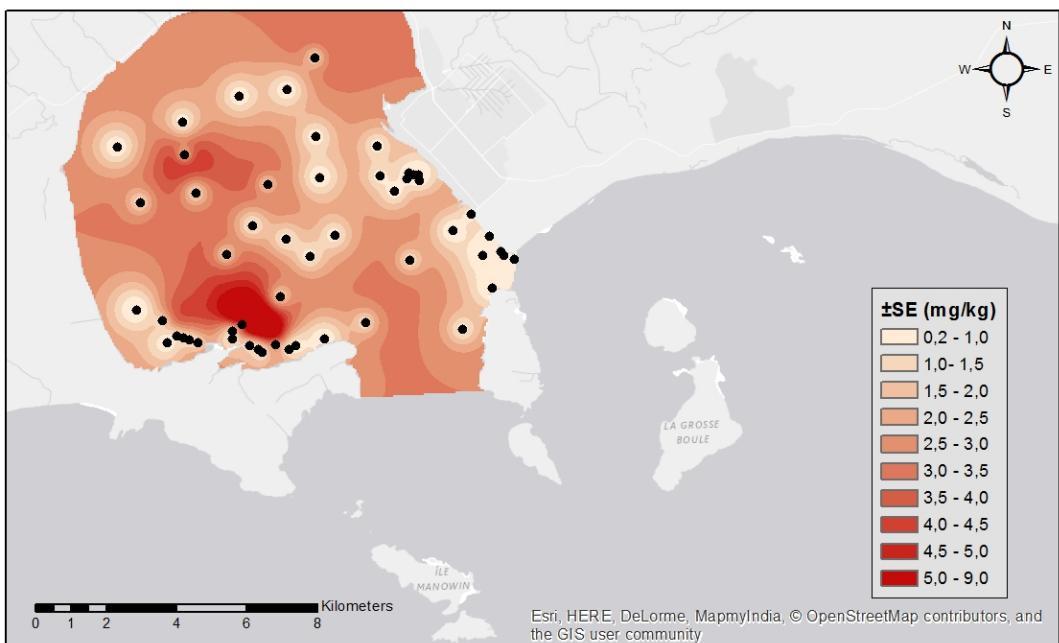
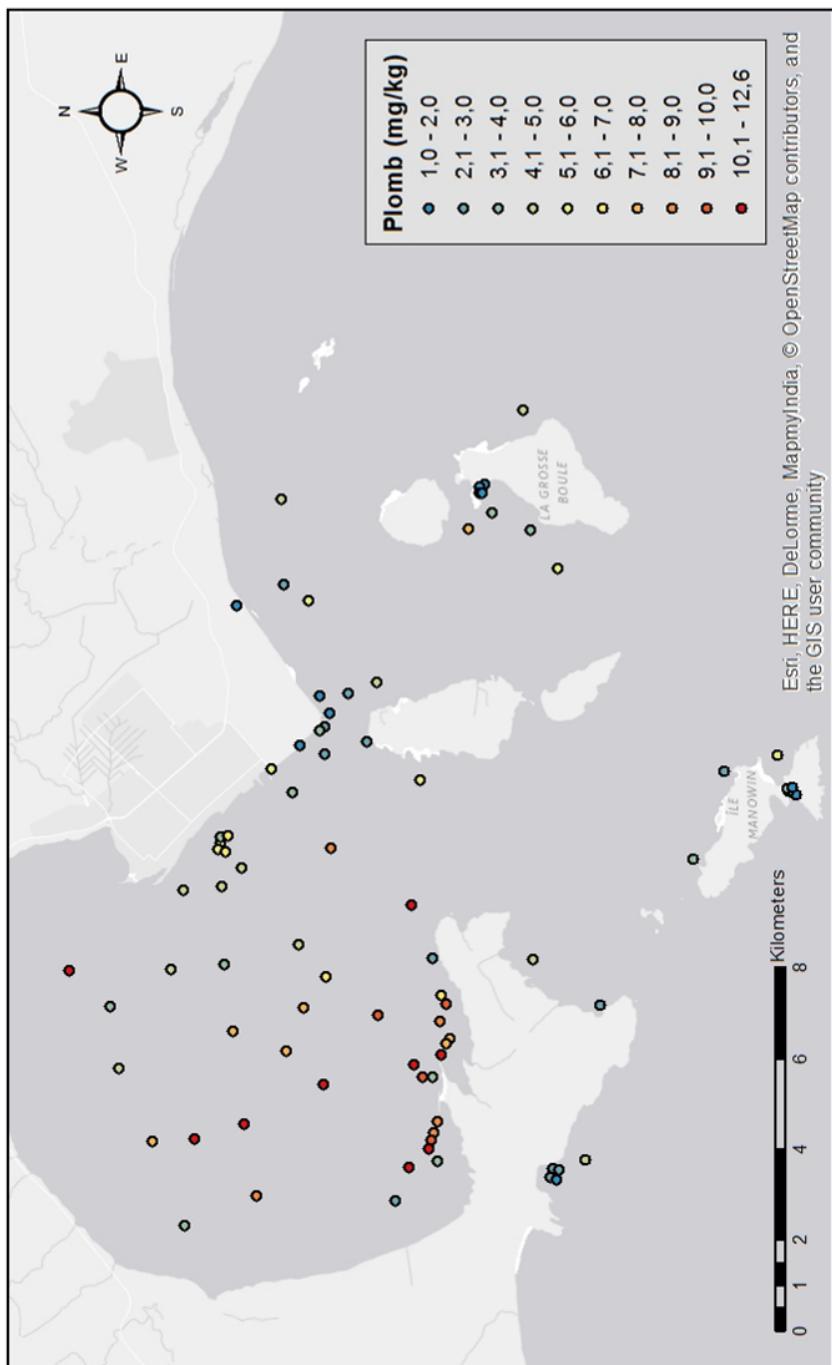
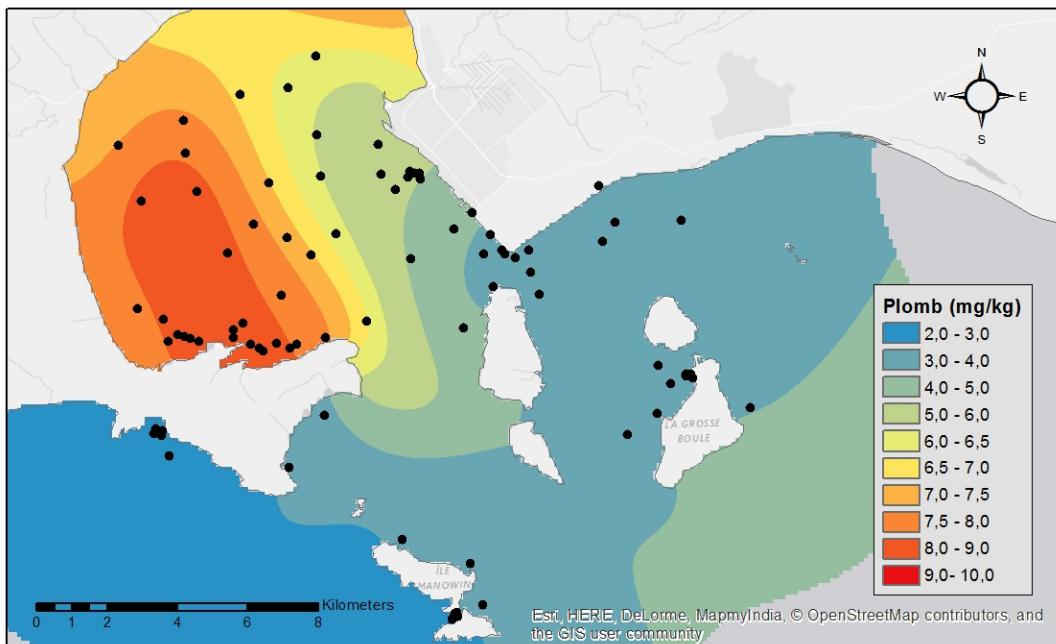


Figure A4-29 : Classes d'erreurs standard associées aux prévisions des concentrations en arsenic (mg/kg) obtenues par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique



*Figure A4-30 : Concentrations en plomb (mg/kg) mesurées aux stations et représentées par classes de concentration*

La figure A4-30 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations en plomb réelles mesurées aux stations.



*Figure A4-31 : Représentation du patron de diffusion du plomb (classes en mg/kg) obtenue par la méthode d'interpolation de Diffusion de Kernels avec pour barrière la côte et les îles*

La figure A4-31 est une prédiction simplifiée de la diffusion des particules de plomb dans un médium homogène et qui tient compte de la présence des côtes qui forment des barrières à contourner. L'estimé permet de visualiser le patron général de diffusion du contaminant. La méthode utilisée est déterministe et ne tient donc pas compte de la relation statistique entre les points mesurés. Les points représentés sur la carte ont été utilisés pour l'interpolation.

Le krigage bayésien empirique est une méthode d'interpolation géostatistique permettant non seulement de produire une surface de prédictions (figure A4-32), mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions (figure A4-33). La méthode utilisée offre une précision accrue des erreurs standard de prévision par rapport aux autres méthodes de krigage. Puisqu'elle ne tient pas compte des barrières, seules les données à l'intérieur de la baie de Sept-Îles ont été interpolées. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie un nombre supérieur de données serait de mise dans ces secteurs.

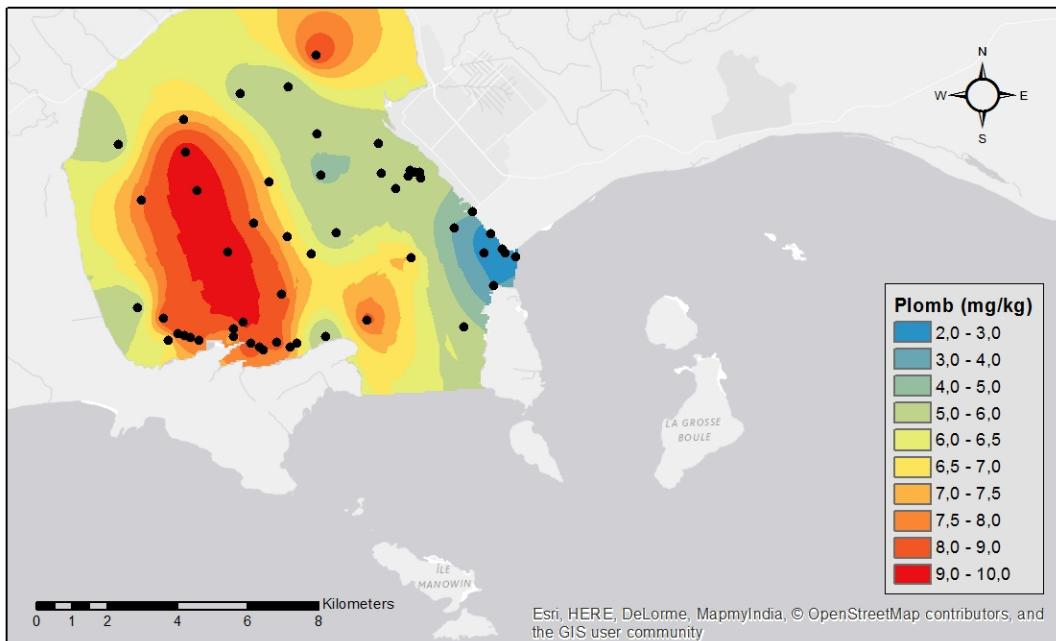


Figure A4-32 : Classes de concentration en plomb (mg/kg) prédictes dans la baie de Sept-Îles par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

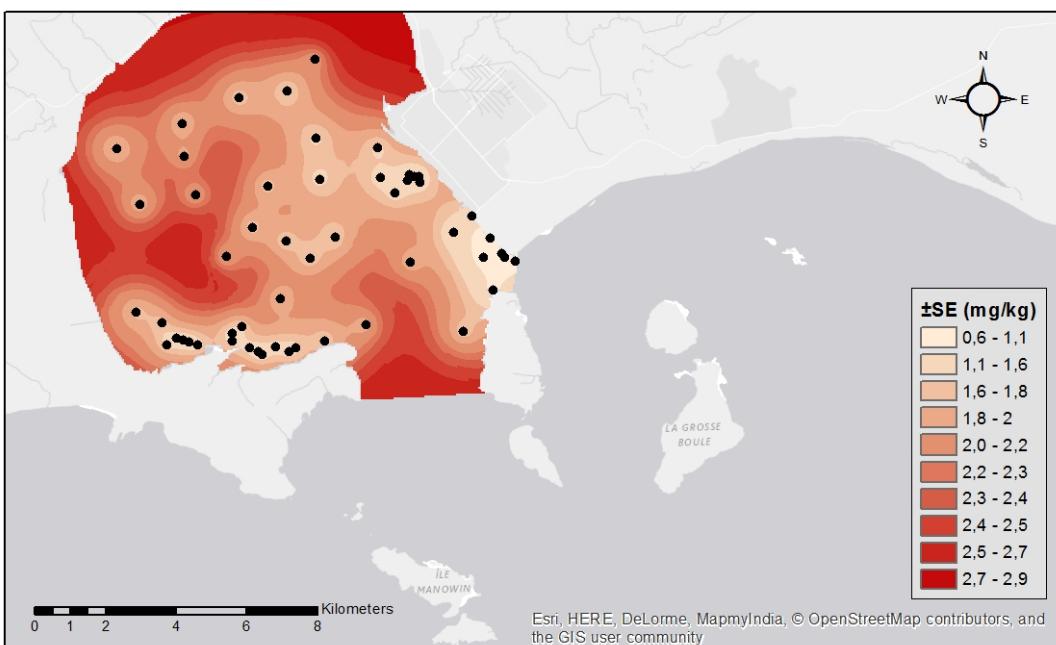
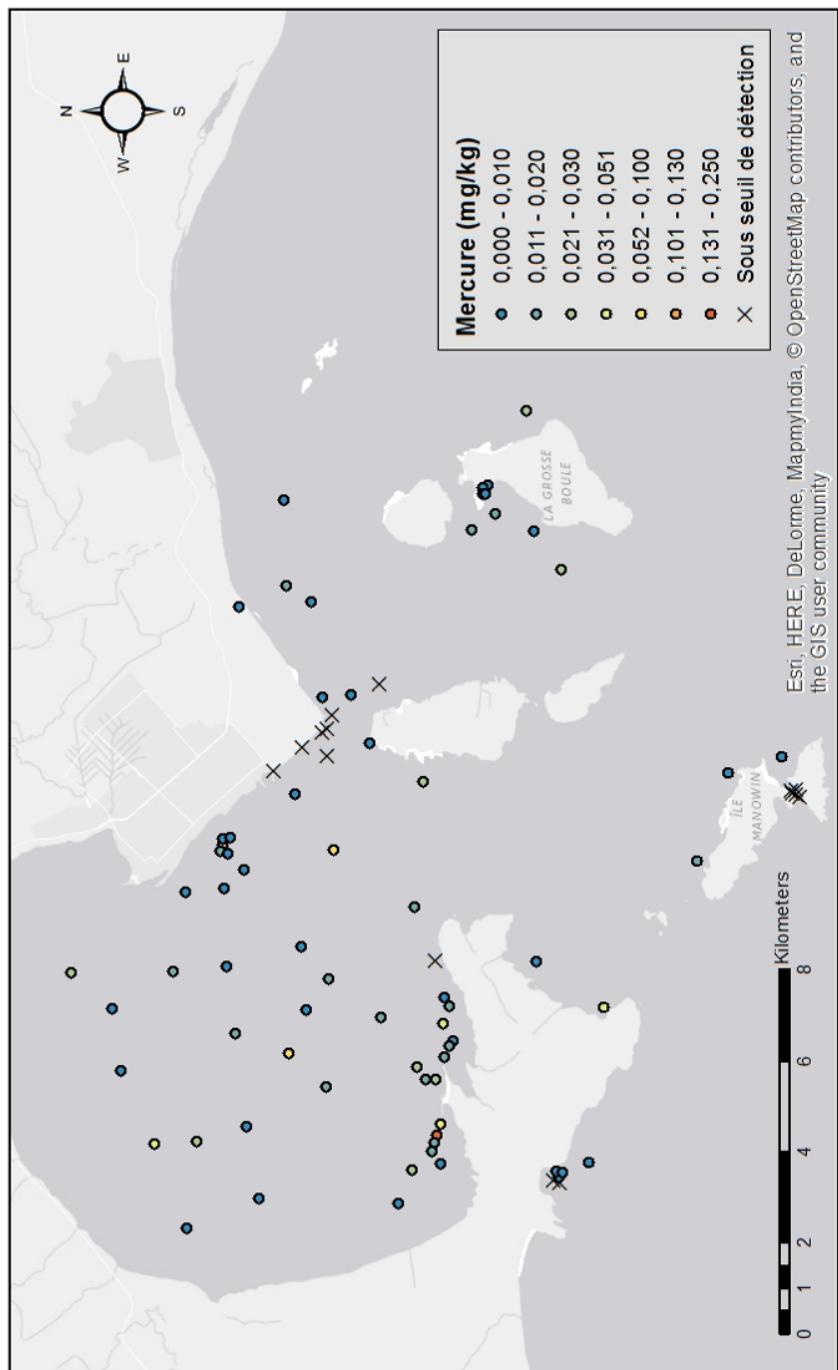
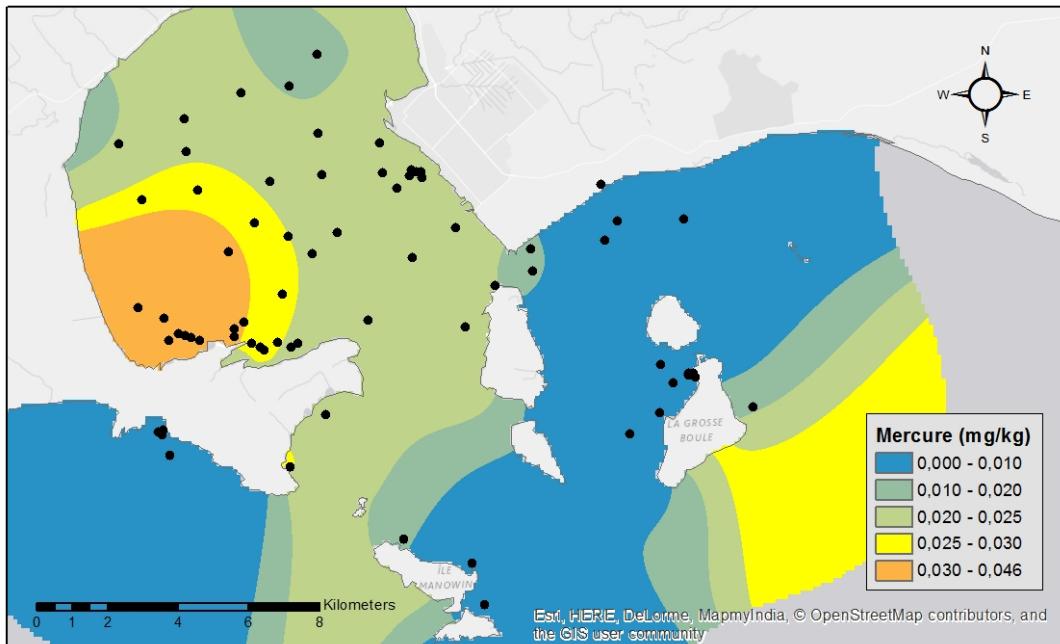


Figure A4-33 : Classes d'erreurs standard associées aux prévisions des concentrations en plomb (mg/kg) obtenues par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique



*Figure A4-34 : Concentrations en mercure (mg/kg) mesurées aux stations et représentées par classes de concentration*

La figure A4-34 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations en mercure réelles mesurées aux stations.



*Figure A4-35 : Représentation du patron de diffusion du mercure (classes en mg/kg) obtenue par la méthode d'interpolation de Diffusion de Kernels avec pour barrière la côte et les îles*

La figure A4-35 est une prédiction simplifiée de la diffusion des particules de mercure dans un médium homogène et qui tient compte de la présence des côtes qui forment des barrières à contourner. L'estimé permet de visualiser le patron général de diffusion du contaminant. La méthode utilisée est déterministe et ne tient donc pas compte de la relation statistique entre les points mesurés. Les points représentés sur la carte ont été utilisés pour l'interpolation.

Le krigage bayésien empirique est une méthode d'interpolation géostatistique permettant non seulement de produire une surface de prédictions (figure A4-36), mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions (figure A4-37). La méthode utilisée offre une précision accrue des erreurs standard de prévision par rapport aux autres méthodes de krigage. Puisqu'elle ne tient pas compte des barrières, seules les données à l'intérieur de la baie de Sept-Îles ont été interpolées. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie un nombre supérieur de données serait de mise dans ces secteurs.

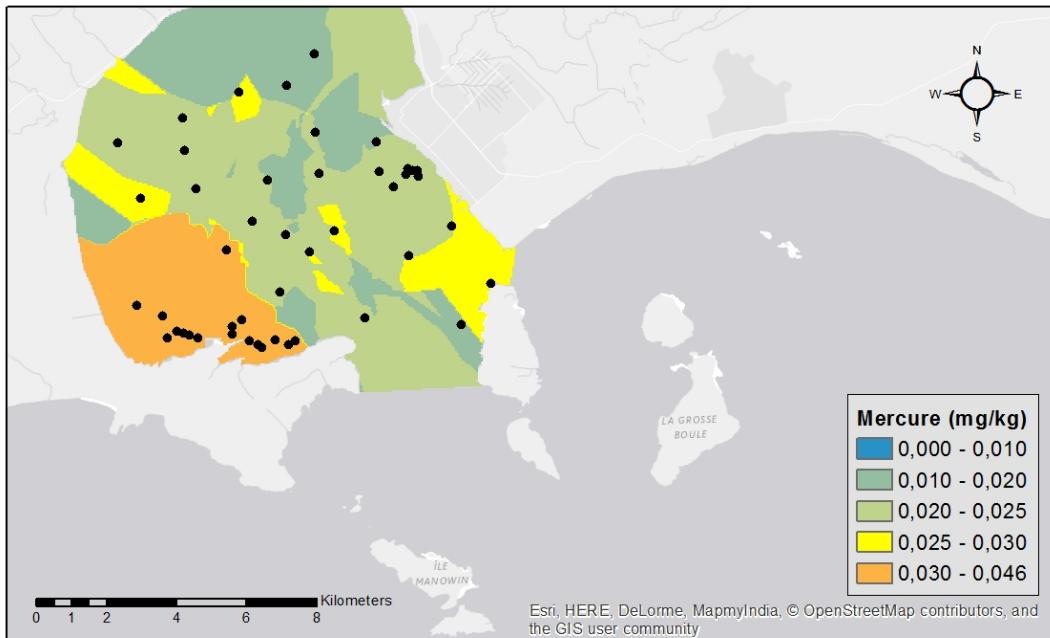


Figure A4-36 : Classes de concentration en mercure (mg/kg) prédites dans la baie de Sept-Îles par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

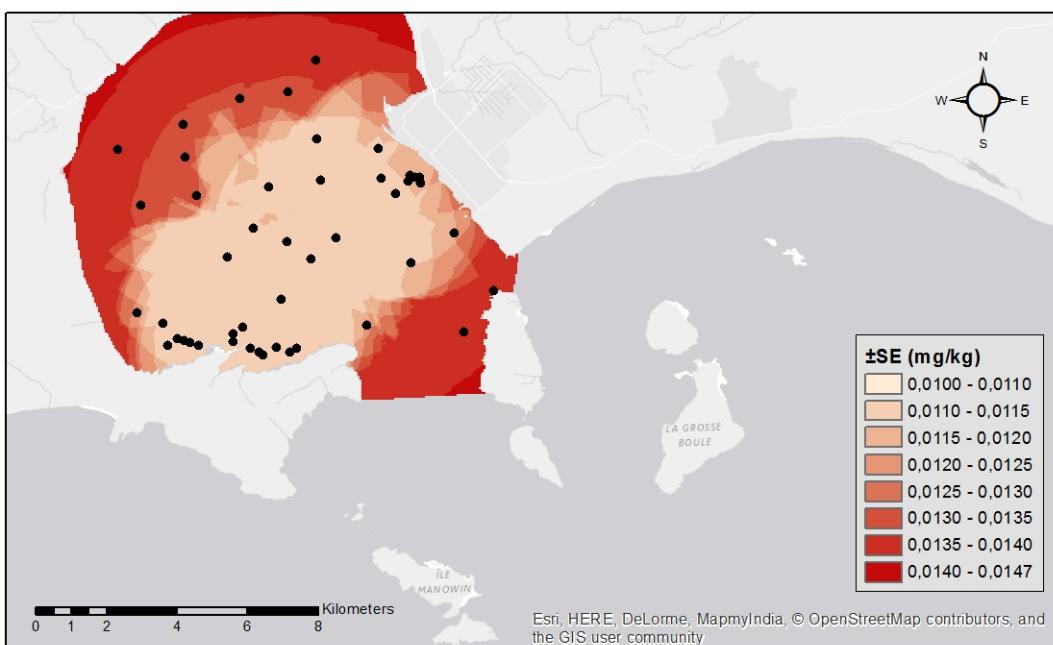
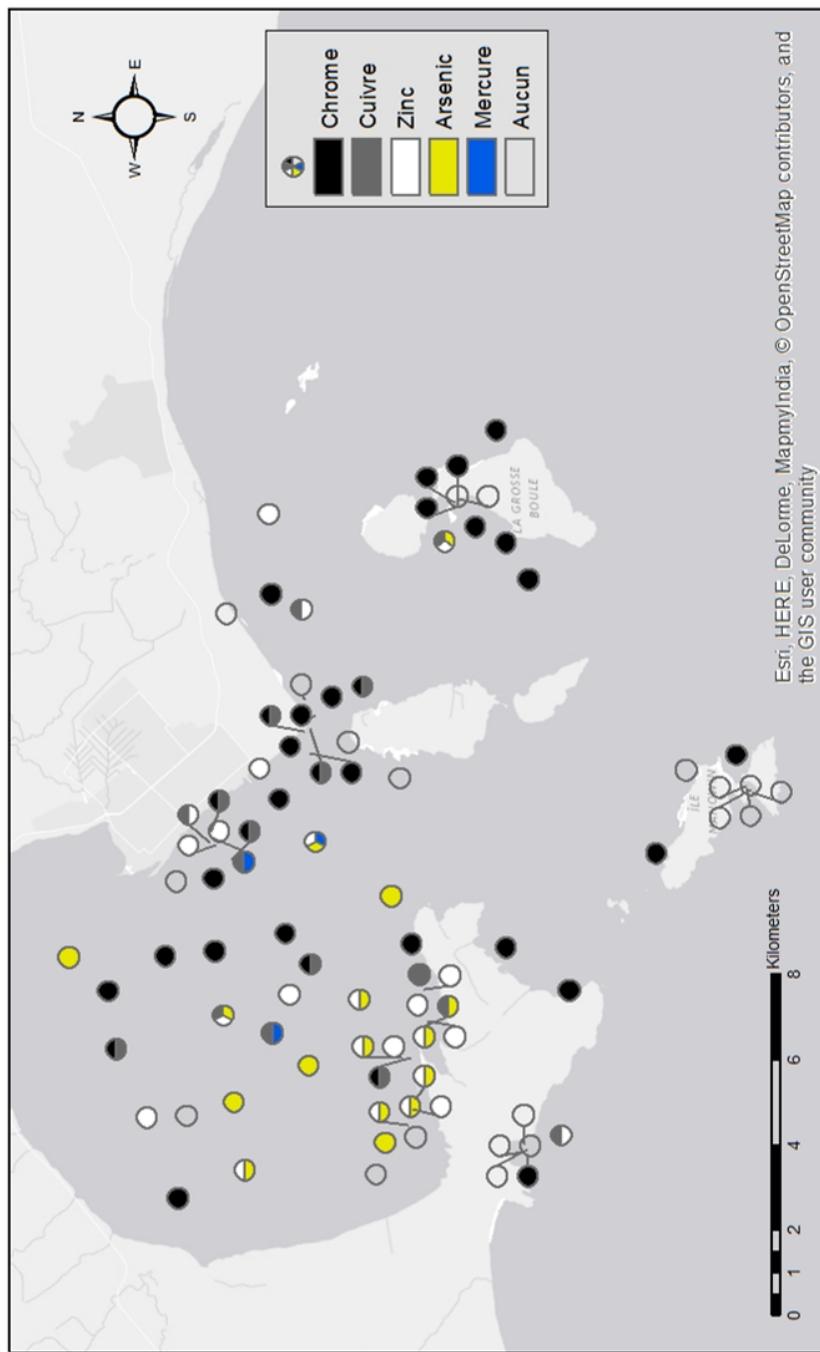


Figure A4-37 : Classes d'erreurs standard associées aux prévisions des concentrations en mercure (mg/kg) obtenues par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

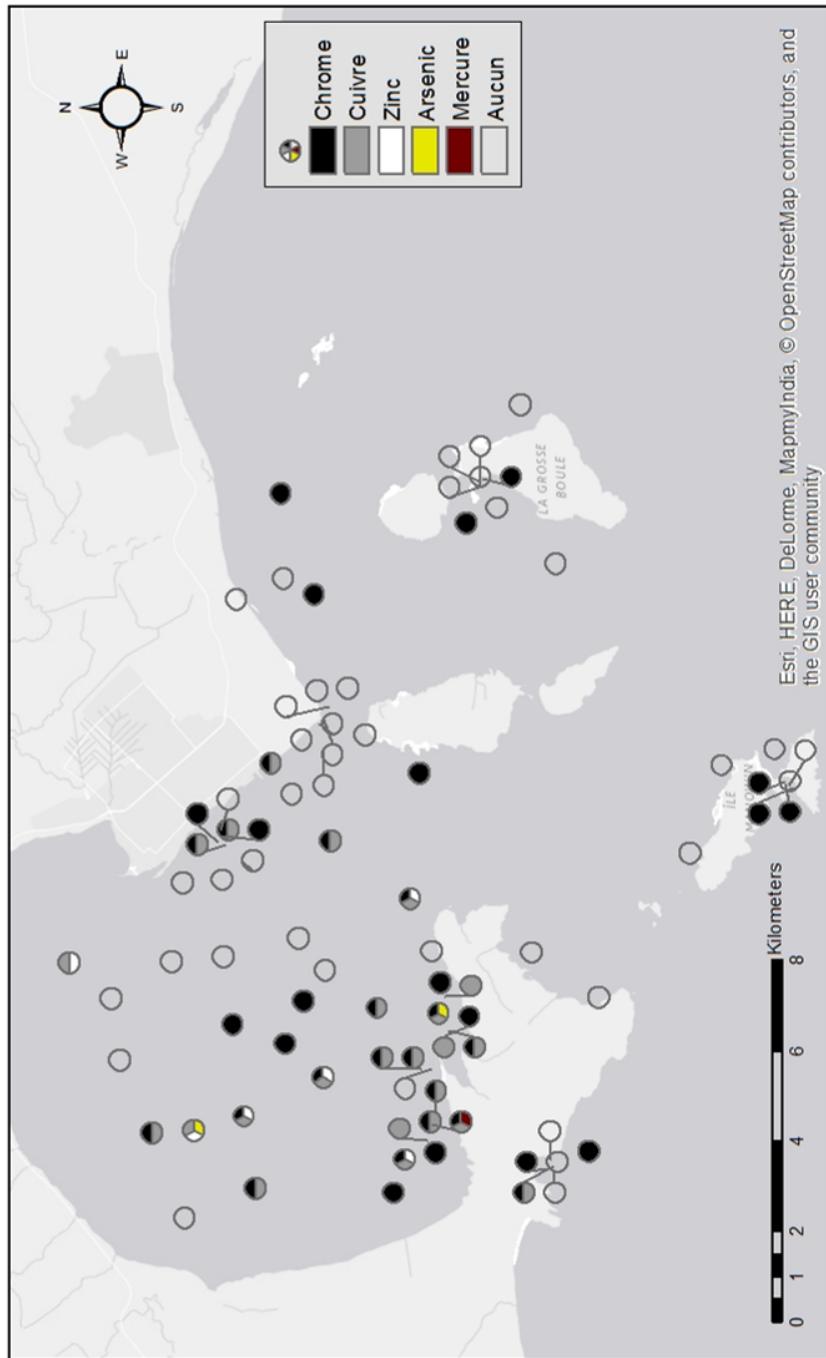
*Annexe A5-11 : Concentration d'effets rares (CER) des métaux normalisés*



*Figure A4-38 : Métaux dont la concentration mesurée est au seuil normalisé d'effets rares (MDDELCC)*

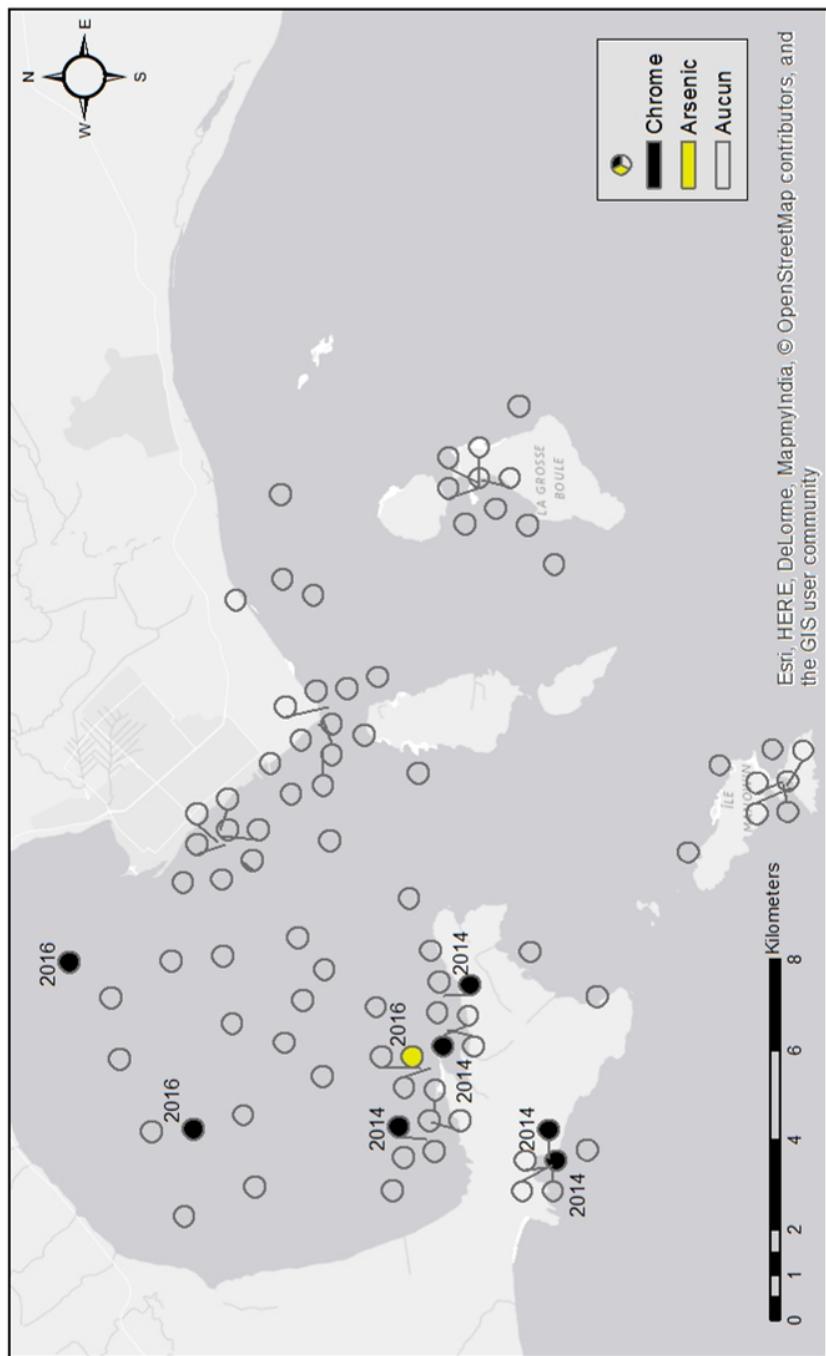
Lorsque plus d'un métal est au seuil de concentration d'effets rares à une station, les métaux sont représentés par les parts divisées dans un même point.

*Annexe A5-12 : Concentration seuil produisant un effet (CSE) des métaux normalisés*

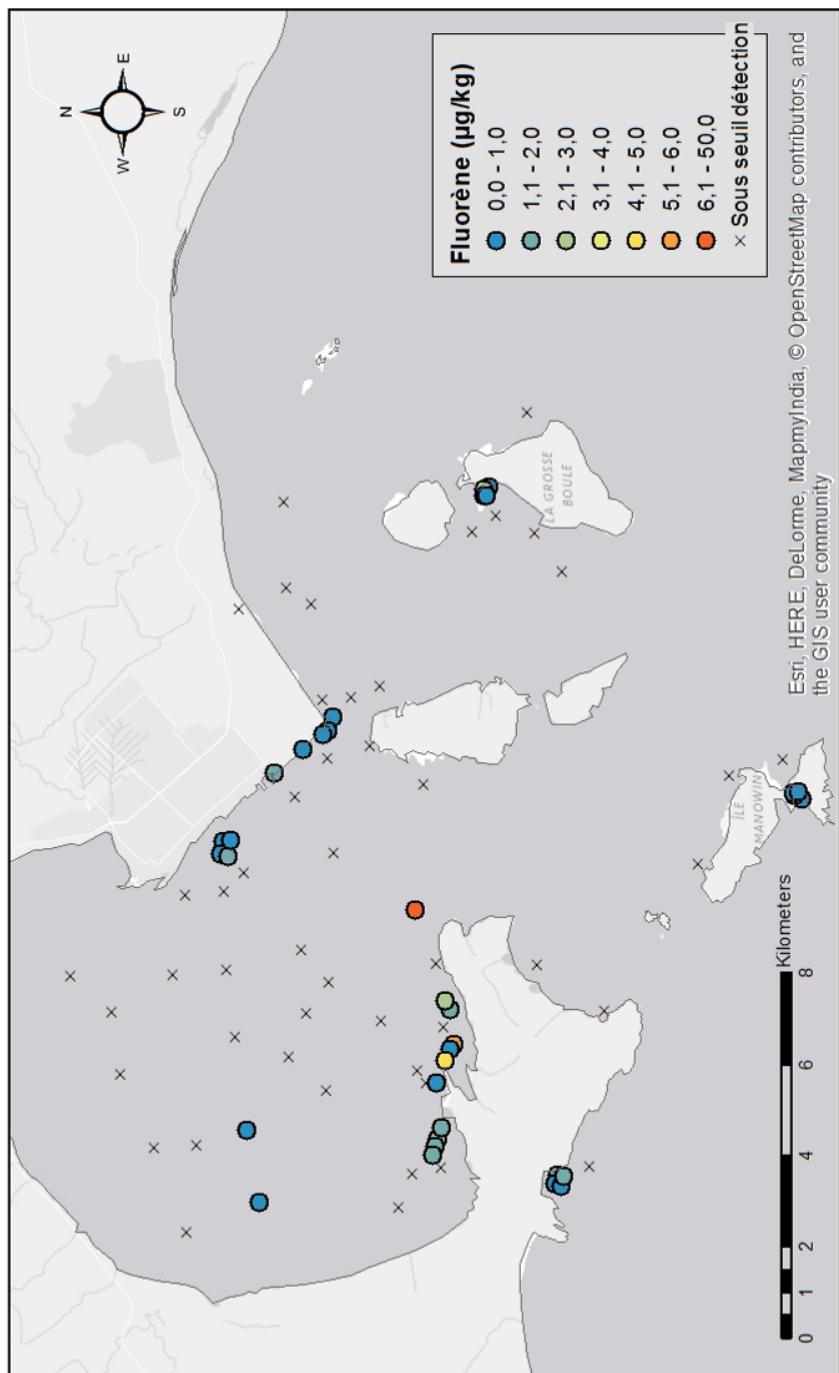


*Figure A4-39 : Métaux dont la concentration mesurée est au seuil normalisé produisant un effet (MDDELCC)*

*Annexe A5-13 : Concentration d'effets occasionnels (CEO) des métaux normalisés*



*Figure A4-40 : Métaux dont la concentration mesurée est au seuil normalisé d'effets occasionnels (MDDELCC)*



*Figure A4-41 : Concentrations en fluorène (µg/kg) mesurées aux stations et représentées par classes de concentration*

La figure A4-41 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations en fluorène réelles mesurées aux stations.

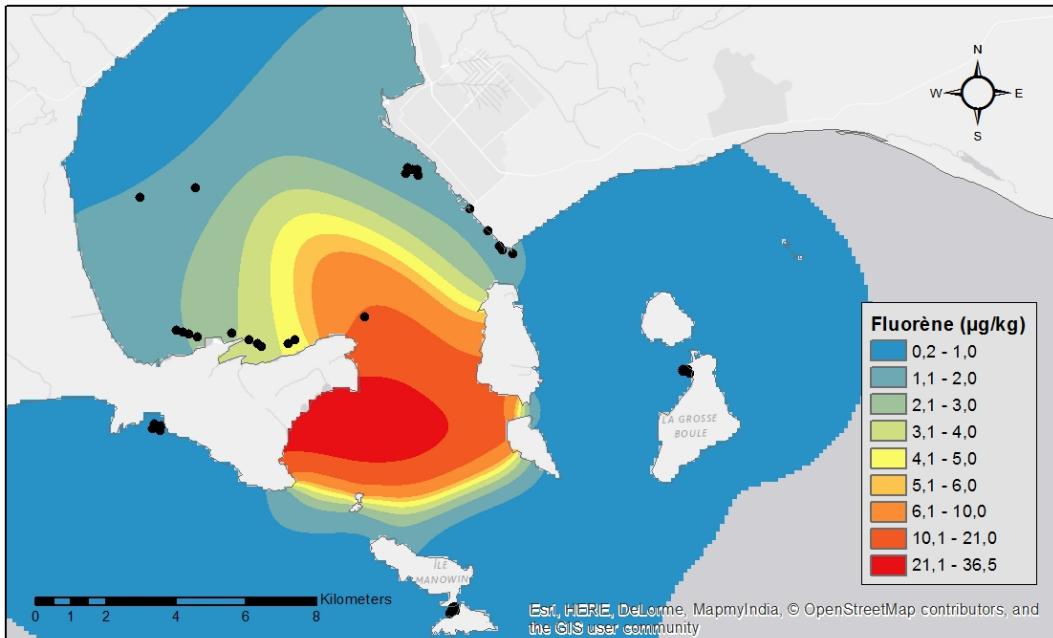
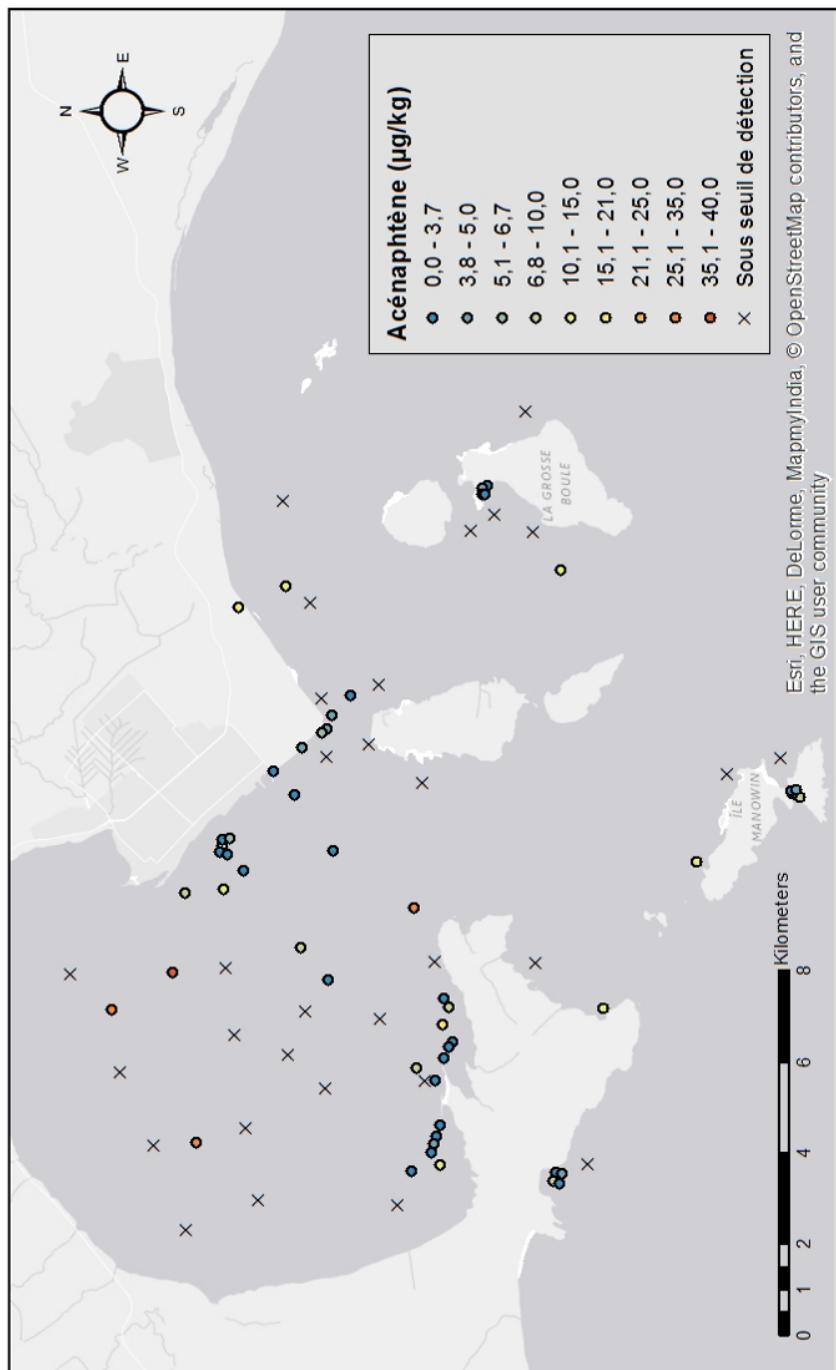


Figure A4-42 : Représentation du patron de diffusion du fluorène (classes en  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) obtenue par la méthode d'interpolation de Diffusion de Kernels avec pour barrière la côte et les îles

La figure A4-42 est une prédiction simplifiée de la diffusion des particules de fluorène dans un médium homogène et qui tient compte de la présence des côtes qui forment des barrières à contourner. L'estimé permet de visualiser le patron général de diffusion du contaminant. La méthode utilisée est déterministe et ne tient donc pas compte de la relation statistique entre les points mesurés. Les points représentés sur la carte ont été utilisés pour l'interpolation.

Le nombre insuffisant de données au-dessus du seuil de détection à l'intérieur de la baie de Sept-Îles n'a pas permis l'utilisation de la méthode d'interpolation géostatistique par krigage bayésien empirique.



*Figure A4-43 : Concentrations en acénaphthène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) mesurées aux stations et représentées par classes de concentration*

La figure A4-43 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations en acénaphthène réelles mesurées aux stations.

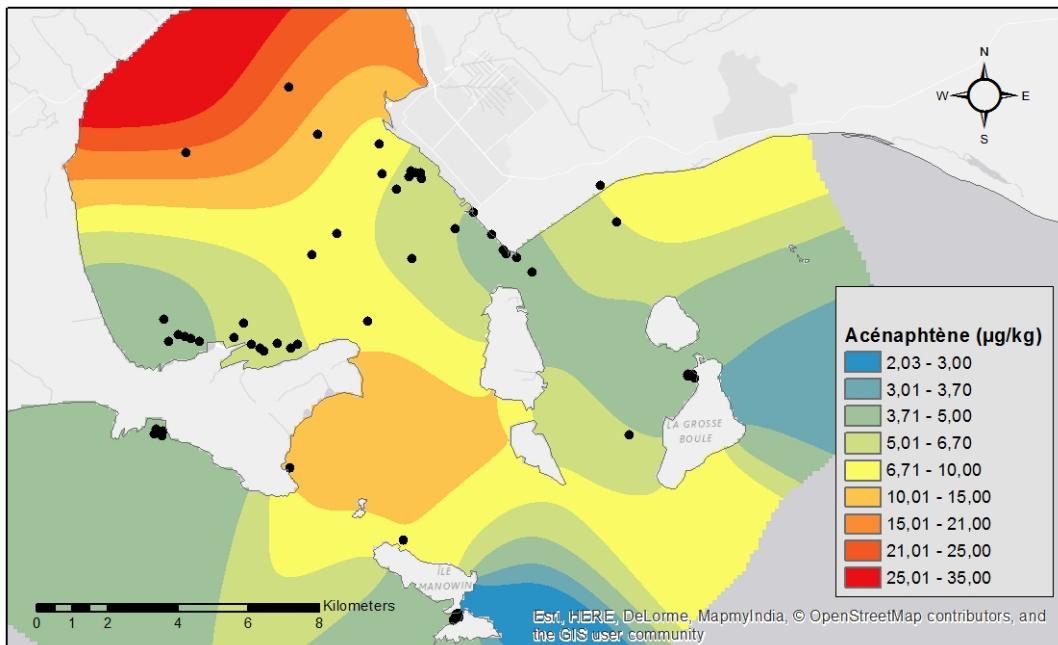


Figure A4.44 : Représentation du patron de diffusion de l'acénaphtène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) obtenue par la méthode d'interpolation de Diffusion de Kernels avec pour barrière la côte et les îles

La figure A4-44 est une prédiction simplifiée de la diffusion des particules d'acénaphtène dans un médium homogène et qui tient compte de la présence des côtes qui forment des barrières à contourner. L'estimé permet de visualiser le patron général de diffusion du contaminant. La méthode utilisée est déterministe et ne tient donc pas compte de la relation statistique entre les points mesurés. Les points représentés sur la carte ont été utilisés pour l'interpolation.

Le krigage bayésien empirique est une méthode d'interpolation géostatistique permettant non seulement de produire une surface de prédictions (figure A4-45), mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions (figure A4-46). La méthode utilisée offre une précision accrue des erreurs standard de prévision par rapport aux autres méthodes de krigage. Puisqu'elle ne tient pas compte des barrières, seules les données à l'intérieur de la baie de Sept-Îles ont été interpolées. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie un nombre supérieur de données serait de mise dans ces secteurs.

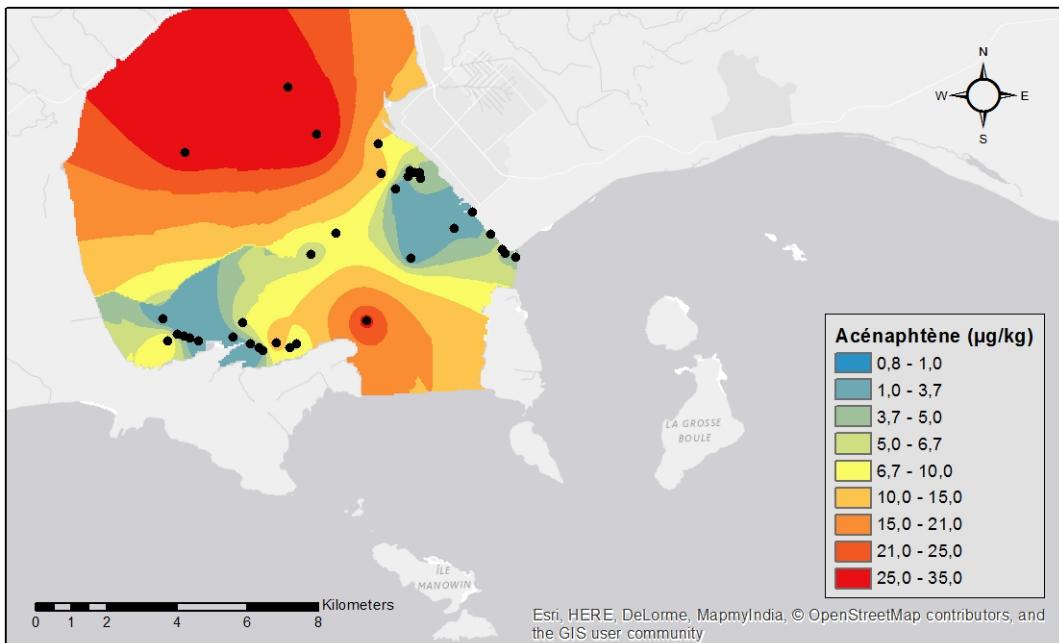


Figure A4-45 : Classes de concentration en acénaphtène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) prédictes dans la baie de Sept-Îles par la méthode d'interpolation du krigeage bayésien empirique

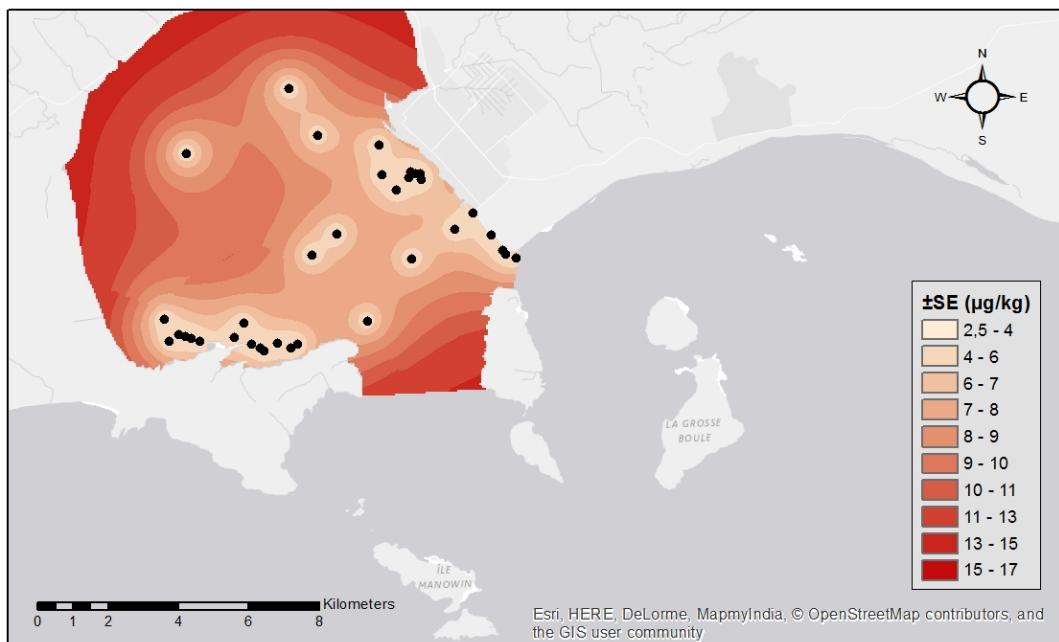
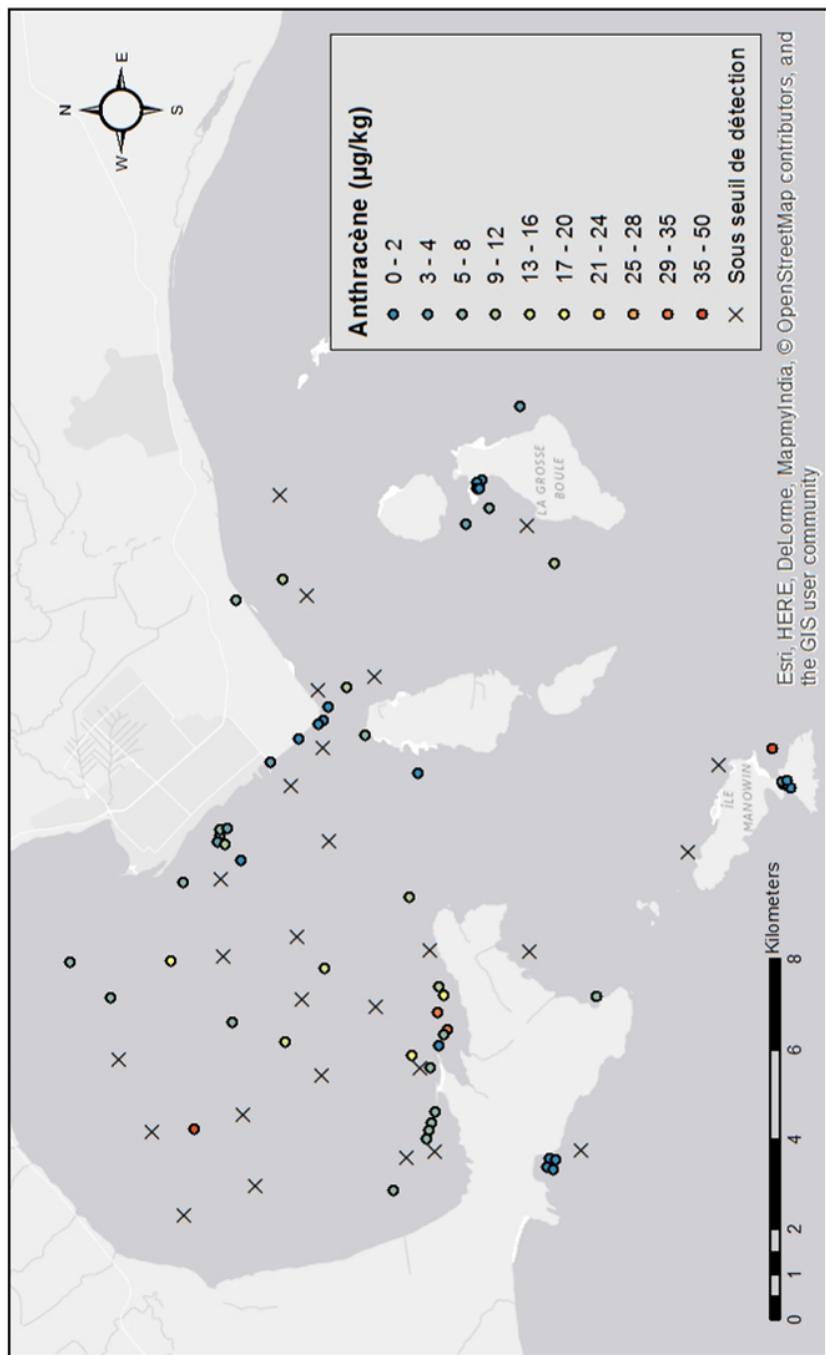


Figure A4-46 : Classes d'erreurs standard associées aux prévisions des concentrations en acénaphtène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) obtenues par la méthode d'interpolation du krigeage bayésien empirique



*Figure A4-47 : Concentrations en anthracène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) mesurées aux stations et représentées par classes de concentration*

La figure A4-47 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations en anthracène réelles mesurées aux stations.

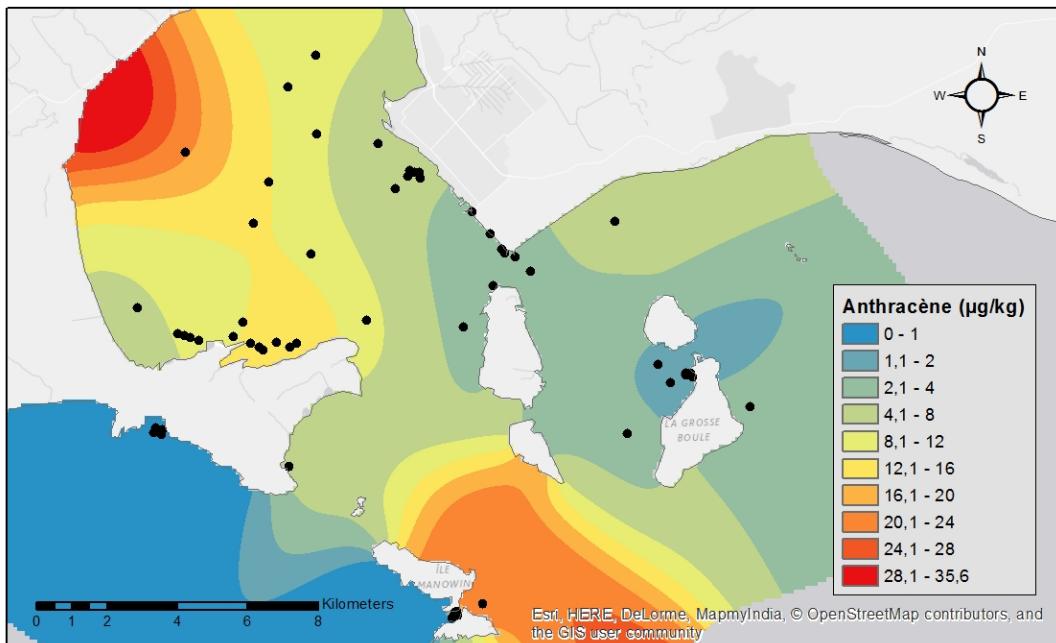


Figure A4-48 : Représentation du patron de diffusion de l'anthracène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) obtenue par la méthode d'interpolation de Diffusion de Kernels avec pour barrière la côte et les îles

La figure A4-48 est une prédiction simplifiée de la diffusion des particules d'anthracène dans un médium homogène et qui tient compte de la présence des côtes qui forment des barrières à contourner. L'estimé permet de visualiser le patron général de diffusion du contaminant. La méthode utilisée est déterministe et ne tient donc pas compte de la relation statistique entre les points mesurés. Les points représentés sur la carte ont été utilisés pour l'interpolation.

Le krigage bayésien empirique est une méthode d'interpolation géostatistique permettant non seulement de produire une surface de prédictions (figure A4-49), mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions (figure A4-50). La méthode utilisée offre une précision accrue des erreurs standard de prévision par rapport aux autres méthodes de krigage. Puisqu'elle ne tient pas compte des barrières, seules les données à l'intérieur de la baie de Sept-Îles ont été interpolées. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie un nombre supérieur de données serait de mise dans ces secteurs.

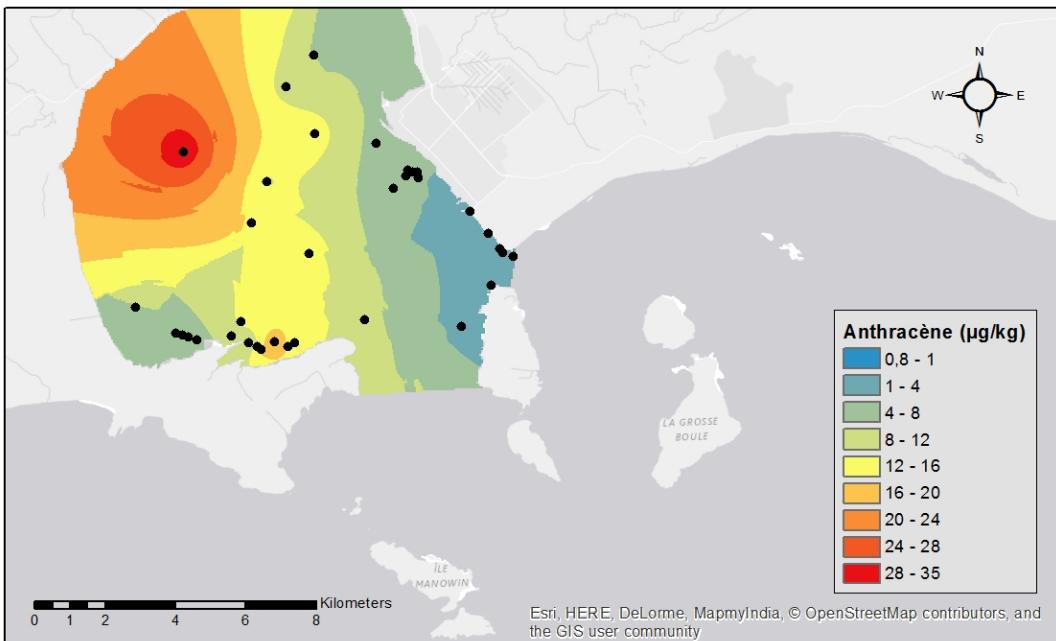


Figure A4-49 : Classes de concentration en anthracène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) prédictes dans la baie de Sept-Îles par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

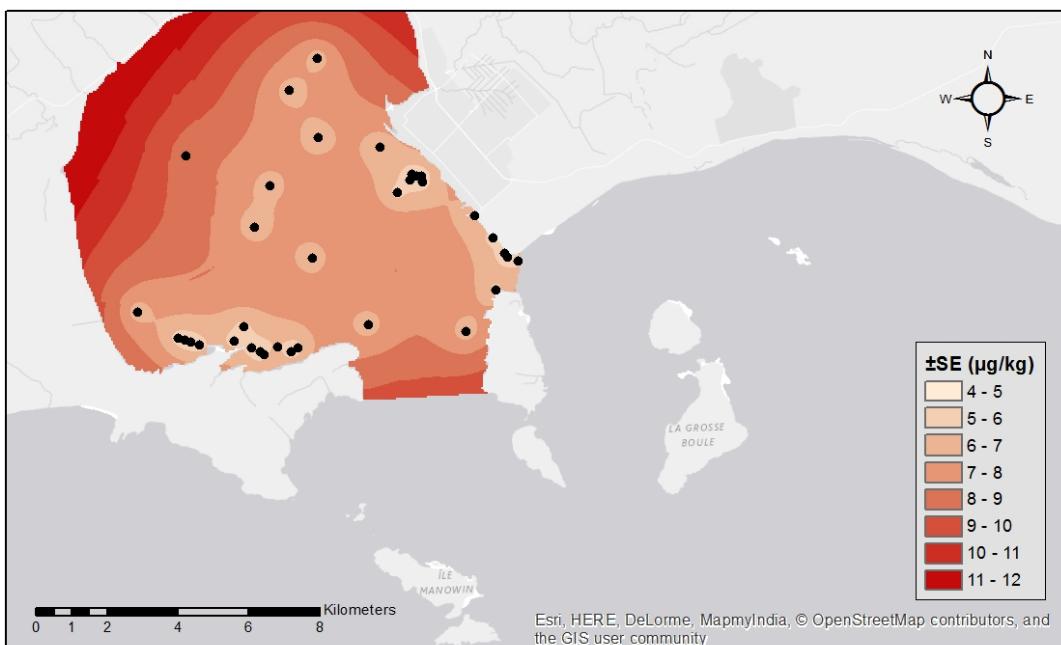
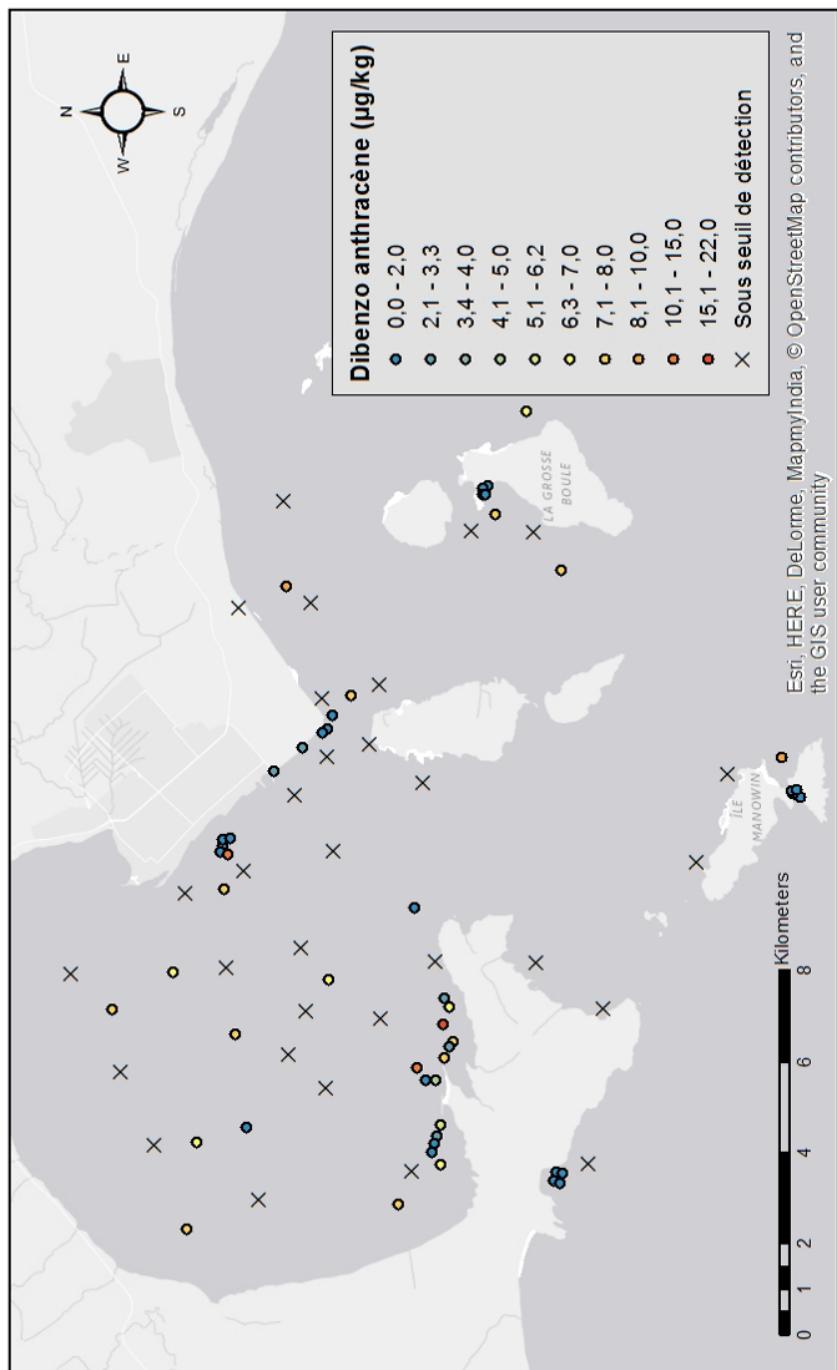


Figure A4-50 : Classes d'erreurs standard associées aux prévisions des concentrations en anthracène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) obtenues par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique



*Figure A4-51 : Concentrations en dibenzo anthracène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) mesurées aux stations et représentées par classes de concentration*

La figure A4-51 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations en dibenzo anthracène réelles mesurées aux stations.

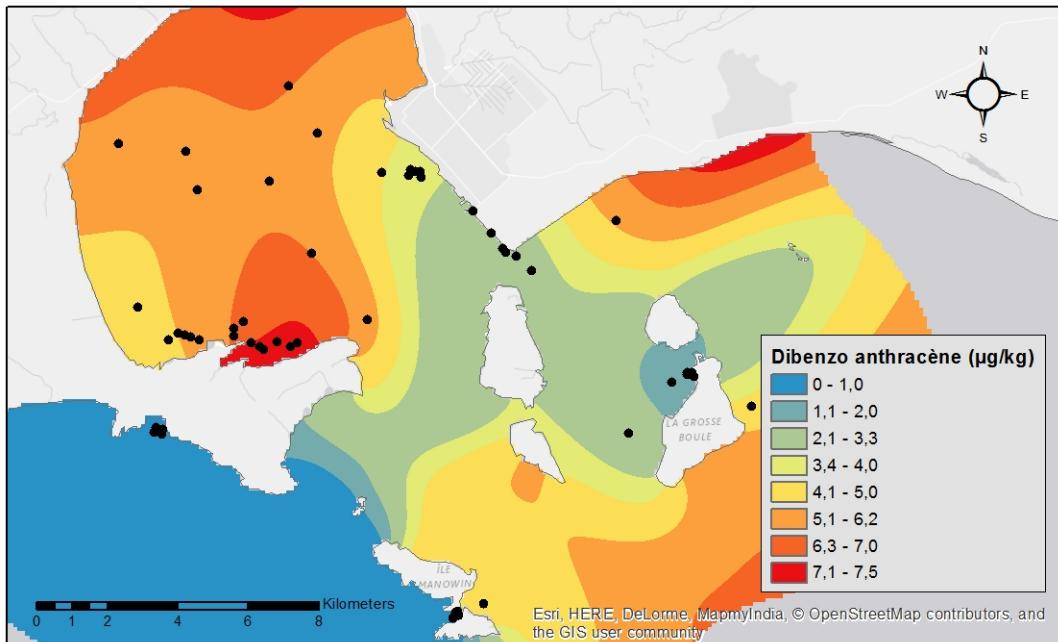


Figure A4-52 : Représentation du patron de diffusion du dibeno anthracène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) obtenue par la méthode d'interpolation de Diffusion de Kernels avec pour barrière la côte et les îles

La figure A4-52 est une prédiction simplifiée de la diffusion des particules de dibenzo anthracène dans un médium homogène et qui tient compte de la présence des côtes qui forment des barrières à contourner. L'estimé permet de visualiser le patron général de diffusion du contaminant. La méthode utilisée est déterministe et ne tient donc pas compte de la relation statistique entre les points mesurés. Les points représentés sur la carte ont été utilisés pour l'interpolation.

Le krigage bayésien empirique est une méthode d'interpolation géostatistique permettant non seulement de produire une surface de prédictions (figure A4-53), mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions (figure A4-54). La méthode utilisée offre une précision accrue des erreurs standard de prévision par rapport aux autres méthodes de krigage. Puisqu'elle ne tient pas compte des barrières, seules les données à l'intérieur de la baie de Sept-Îles ont été interpolées. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie un nombre supérieur de données serait de mise dans ces secteurs.

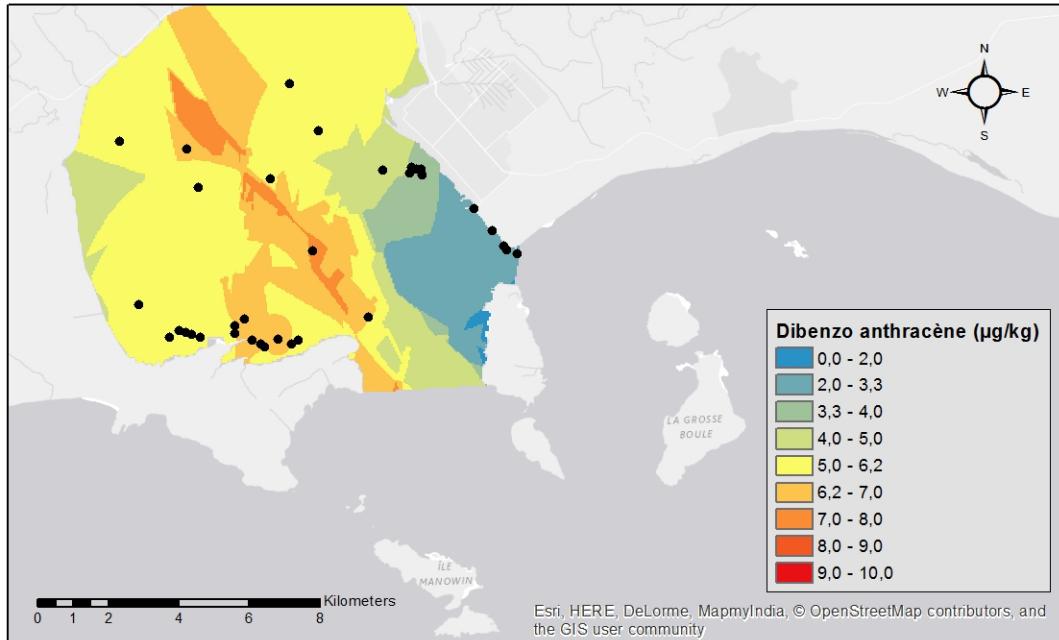


Figure A4-53 : Classes de concentration en dibenzo anthracène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) prédictes dans la baie de Sept-Îles par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

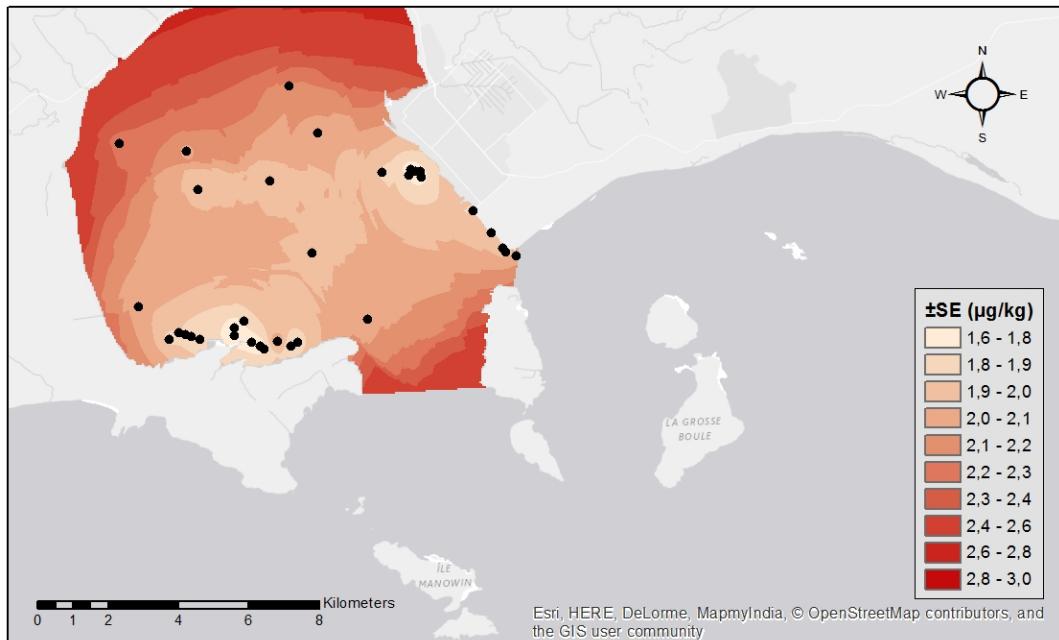
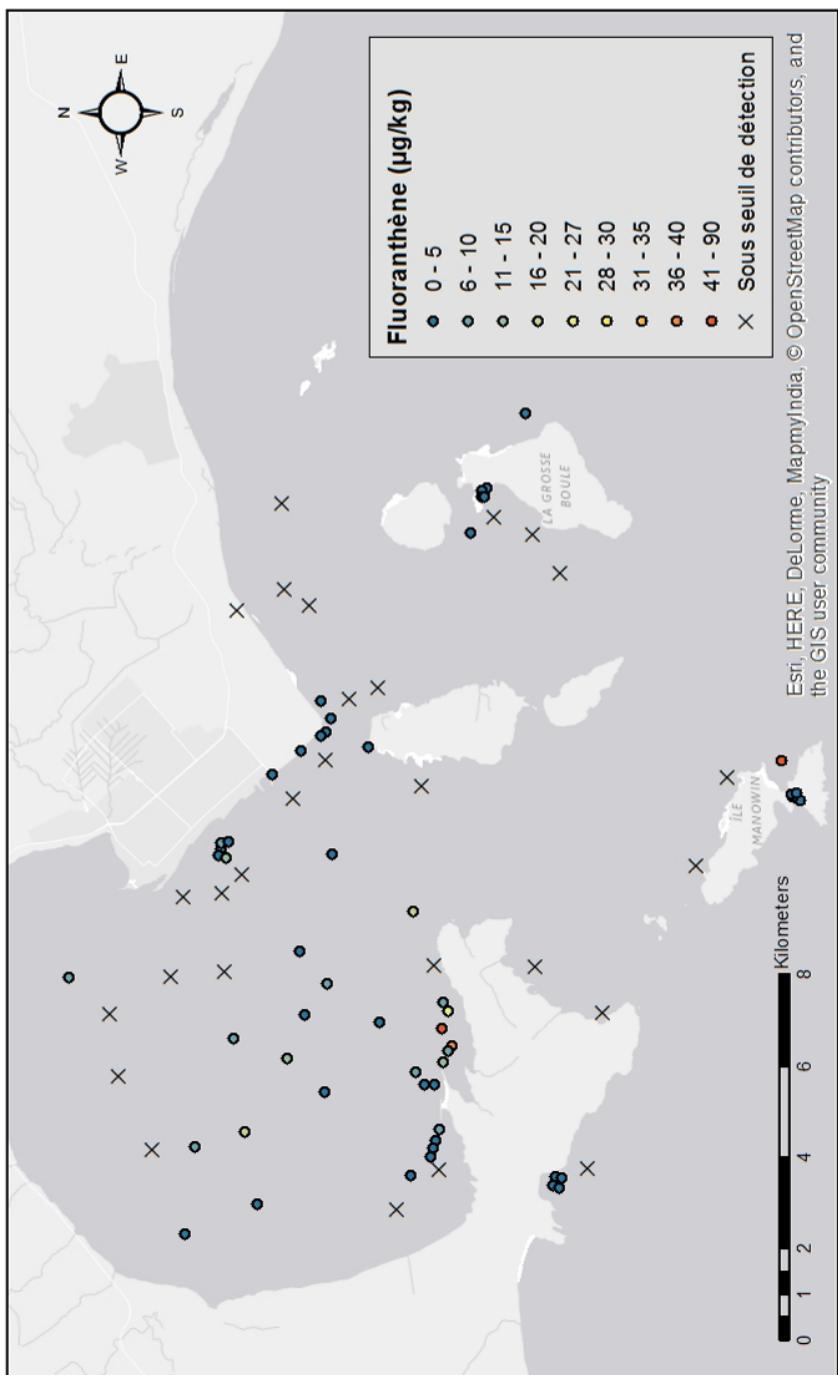


Figure A4-54 : Classes d'erreurs standard associées aux prévisions des concentrations en dibenzo anthracène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) obtenues par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique



*Figure A4-55 : Concentrations en fluoranthène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) mesurées aux stations et représentées par classes de concentration*

La figure A4-55 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations en fluoranthène réelles mesurées aux stations.

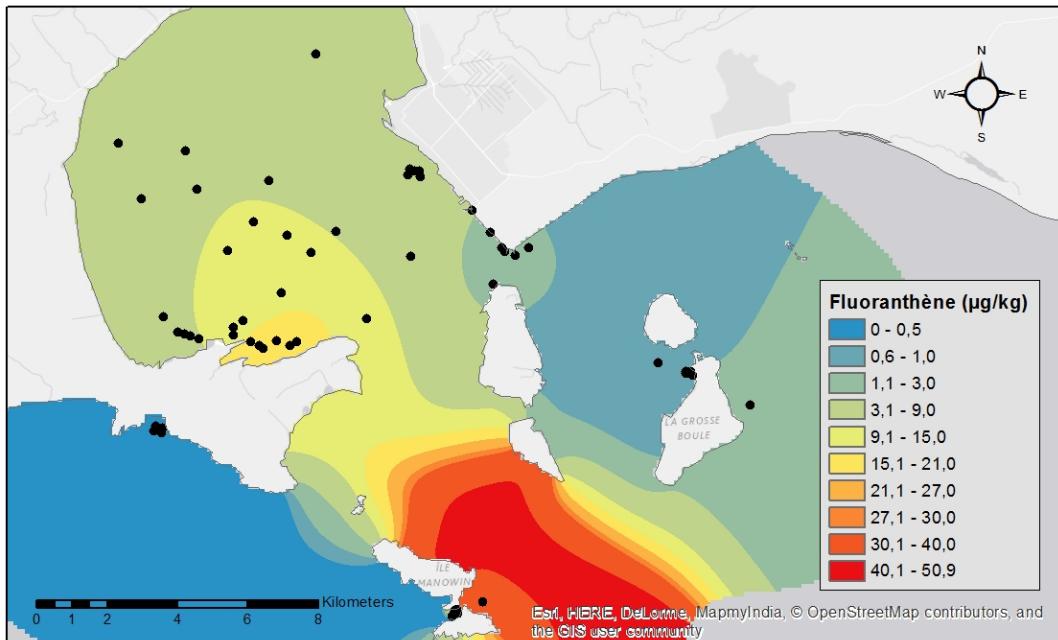


Figure A4-56 : Représentation du patron de diffusion du fluoranthène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) obtenue par la méthode d'interpolation de Diffusion de Kernels avec pour barrière la côte et les îles

La figure A4-56 est une prédiction simplifiée de la diffusion des particules de fluoranthène dans un médium homogène et qui tient compte de la présence des côtes qui forment des barrières à contourner. L'estimé permet de visualiser le patron général de diffusion du contaminant. La méthode utilisée est déterministe et ne tient donc pas compte de la relation statistique entre les points mesurés. Les points représentés sur la carte ont été utilisés pour l'interpolation.

Le krigage bayésien empirique est une méthode d'interpolation géostatistique permettant non seulement de produire une surface de prédictions (figure A4-57), mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions (figure A4-58). La méthode utilisée offre une précision accrue des erreurs standard de prévision par rapport aux autres méthodes de krigage. Puisqu'elle ne tient pas compte des barrières, seules les données à l'intérieur de la baie de Sept-Îles ont été interpolées. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie un nombre supérieur de données serait de mise dans ces secteurs.

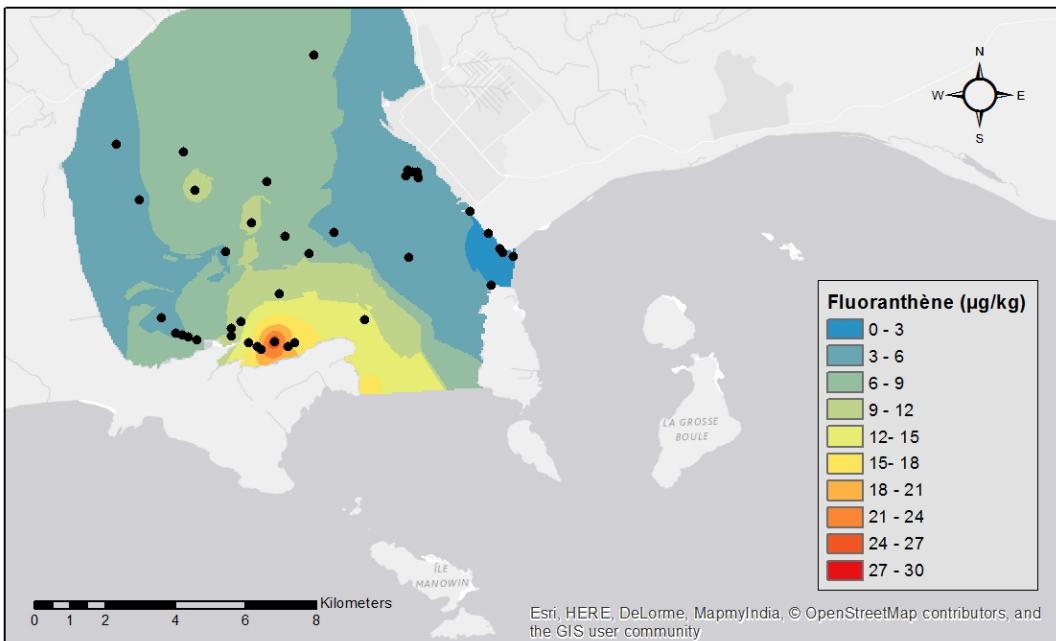


Figure A4-57 : Classes de concentration en fluoranthène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) prédictes dans la baie de Sept-Îles par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

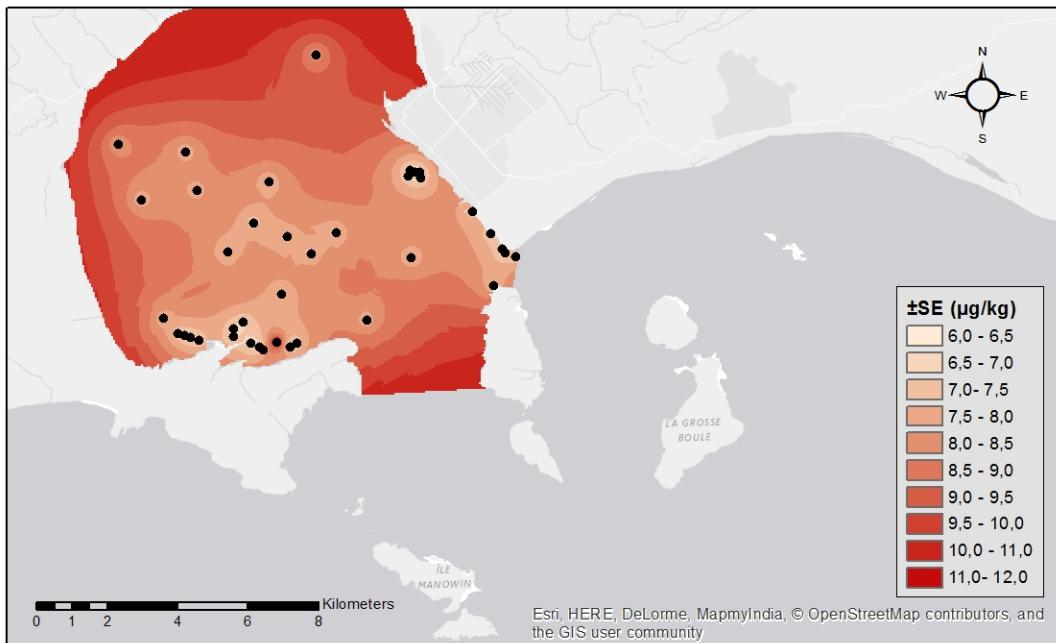
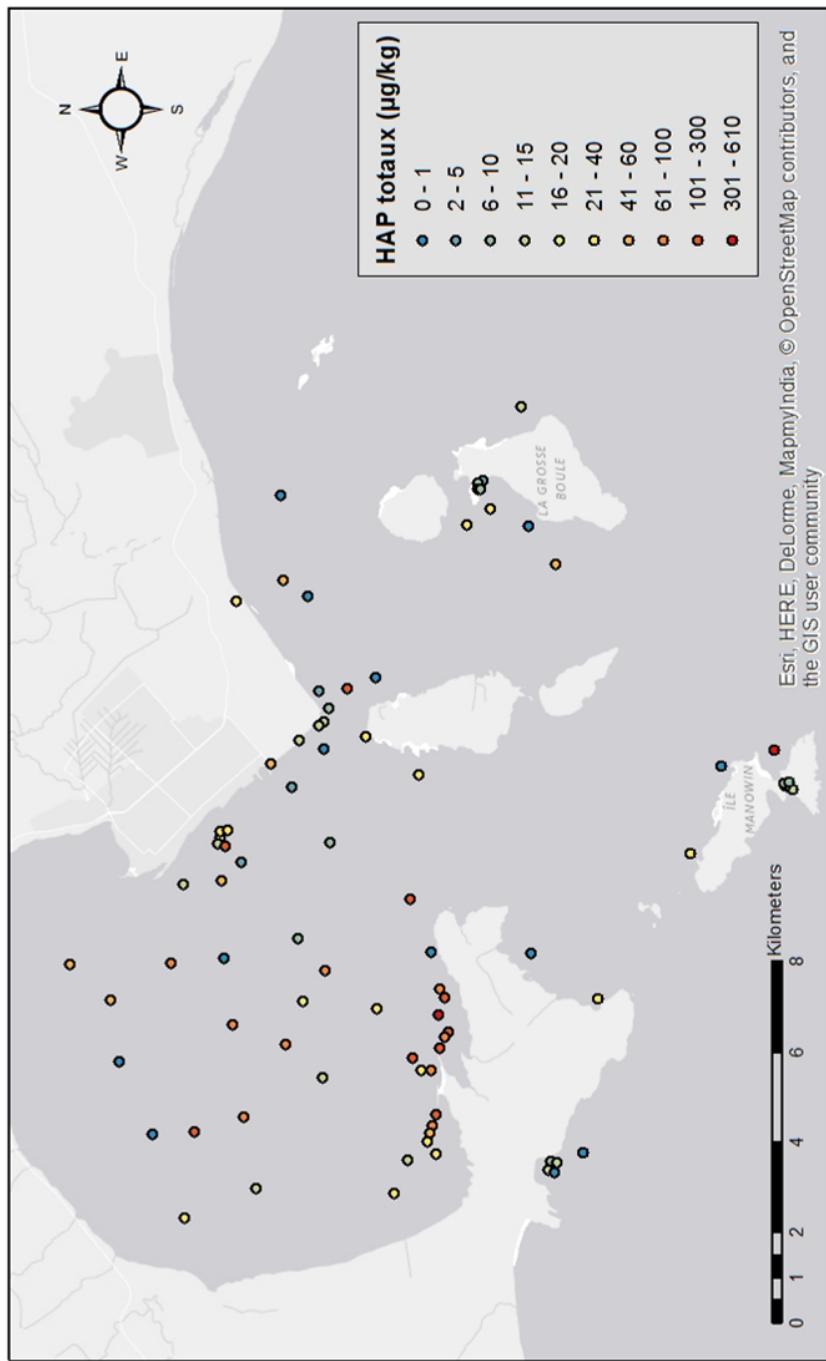


Figure A4-58 : Classes d'erreurs standard associées aux prévisions des concentrations en fluoranthène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) obtenues par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

*Annexe A5-19 : Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) totaux*



*Figure A4-59 : Concentrations en hydrocarbures aromatiques polycycliques totaux ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) aux stations et représentées par classes de concentration*

La figure A4-59 permet de visualiser les données empiriques, c'est à dire les concentrations en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) totaux réelles mesurées aux stations.

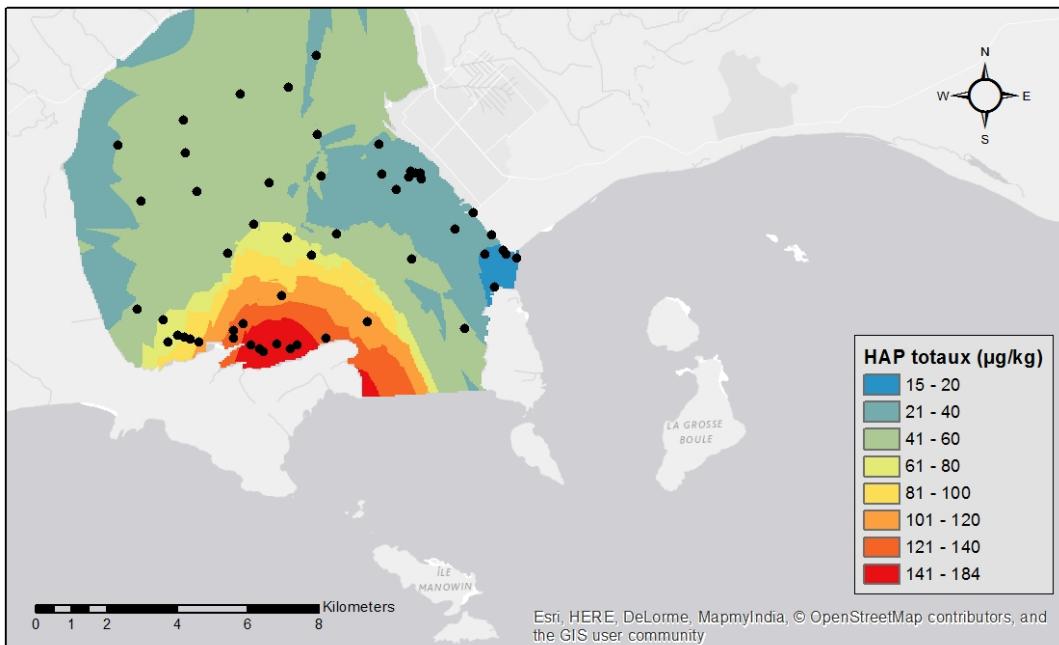


Figure A4-60 : Classes de concentration en HAP totaux ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) prédictes dans la baie de Sept-Îles par la méthode d'interpolation du krigeage bayésien empirique

Le krigeage bayésien empirique est une méthode d'interpolation géostatistique permettant non seulement de produire une surface de prédictions (figure A4-60), mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions (figure A4-61). La méthode utilisée offre une précision accrue des erreurs standard de prévision par rapport aux autres méthodes de krigeage. Puisqu'elle ne tient pas compte des barrières, seules les données à l'intérieur de la baie de Sept-Îles ont été interpolées. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie un nombre supérieur de données serait de mise dans ces secteurs.

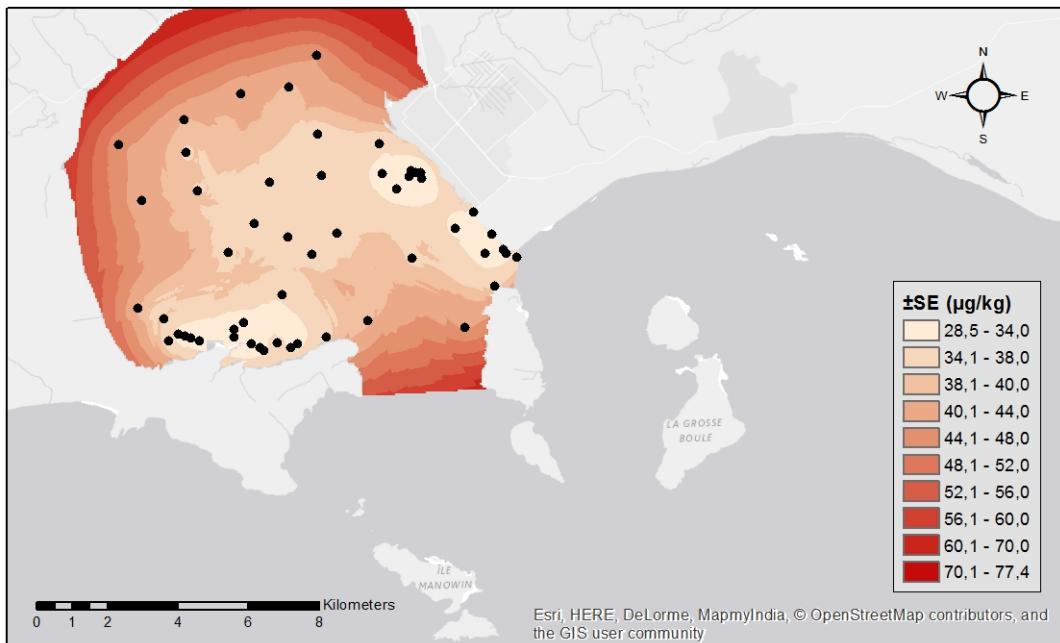


Figure A4-61 : Classes d'erreurs standard associées aux prévisions des concentrations en HAP totaux ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) obtenues par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

Annexe A5-20 : Concentration d'effets rares (CER) des seuils normalisés de concentration en hydrocarbures

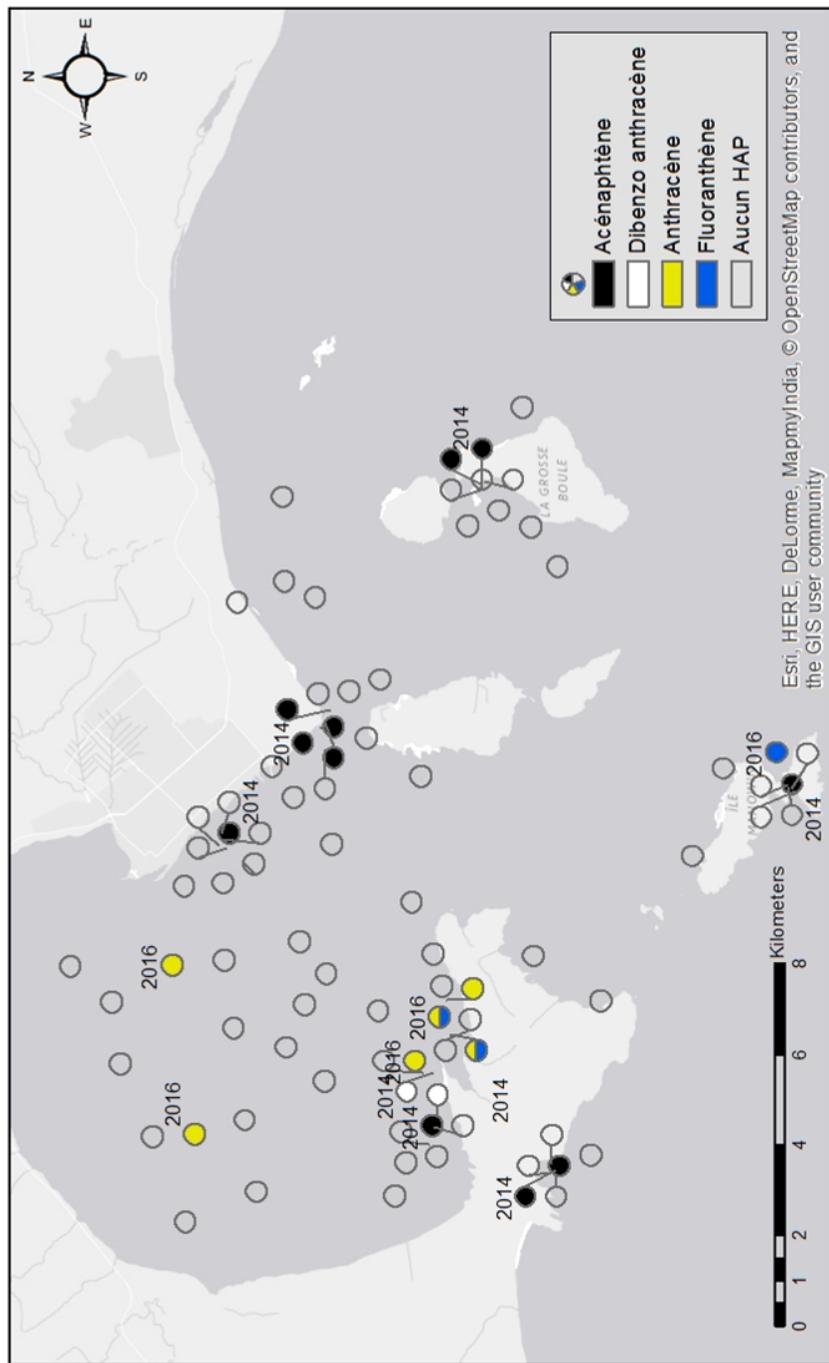
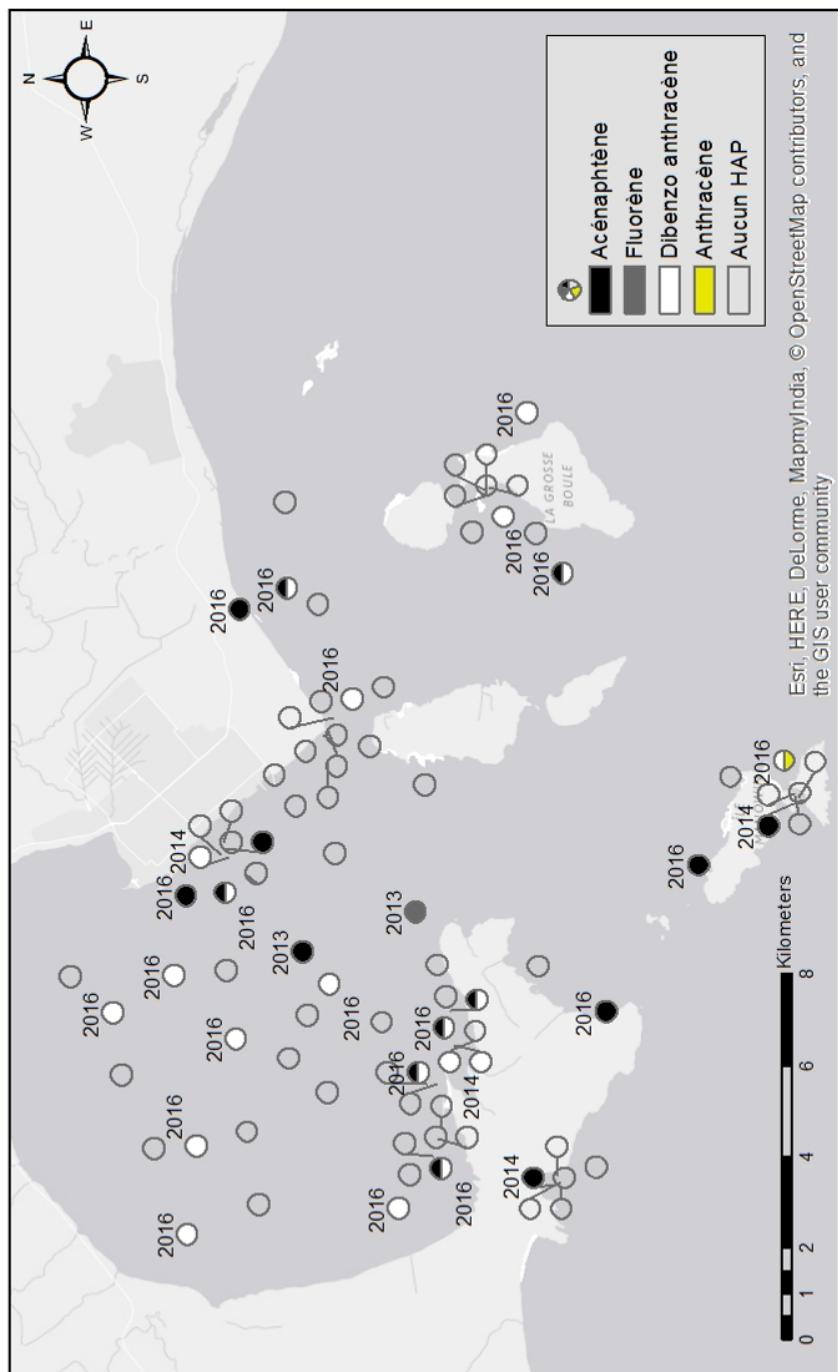


Figure A4-62 : Hydrocarbures aromatiques polycycliques dont la concentration mesurée est au seuil normalisé d'effets rares (MDDELCC)

Lorsque plus d'un métal est au seuil de concentration d'effets rares à une station, les métaux sont représentés par des parts divisées dans un même point.

*Annexe A5-21 : Concentration seuil produisant un effet (CSE) des seuils normalisés de concentration en hydrocarbures*



*Figure A4-63 : Hydrocarbures aromatiques polycycliques dont la concentration mesurée est au seuil normalisé produisant un effet (MDDELCC)*

## *Annexe A5-22 : Concentration d'effets occasionnels (CEO) des seuils normalisés de concentration en hydrocarbures*

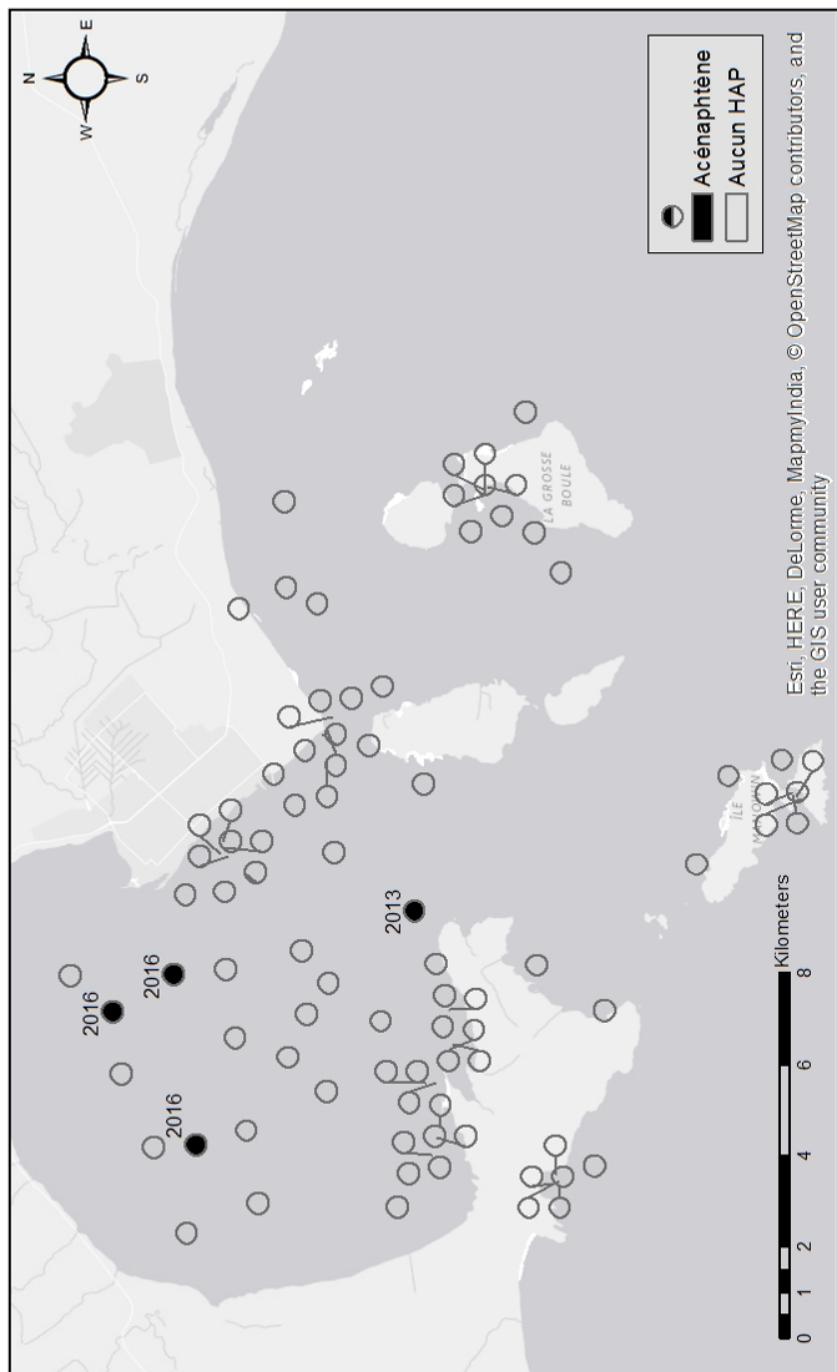


Figure A4-64 : Hydrocarbures aromatiques polycycliques dont la concentration mesurée est au seuil normalisé d'effets occasionnels (MDDELCC)

Annexe A5-23 : Seuil de contamination modérée en HAP totaux

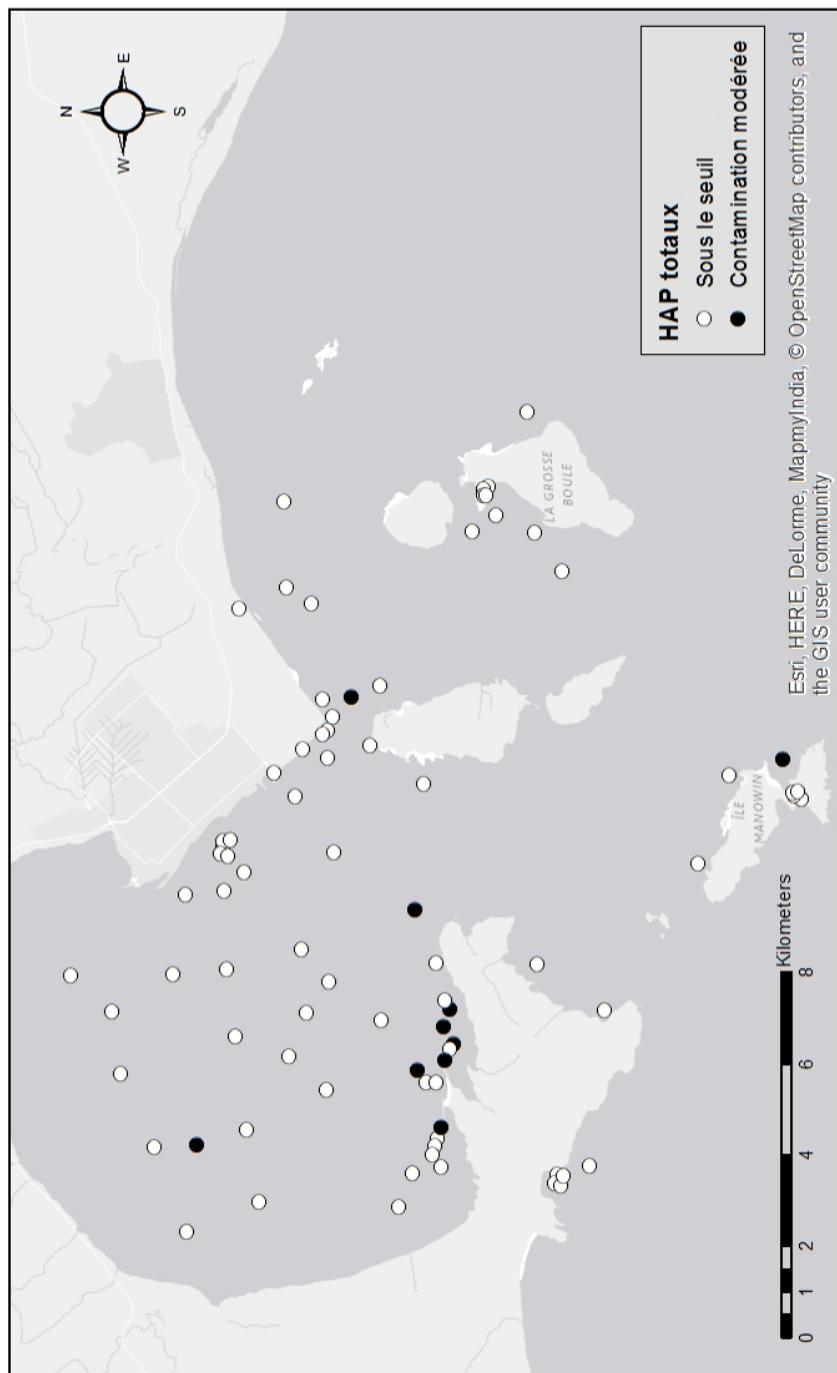


Figure A4-65 : Stations où la concentration en hydrocarbures aromatiques polycycliques totaux est sous le seuil de contamination et au-dessus du seuil pour une contamination modérée (Mora et al., 2010)

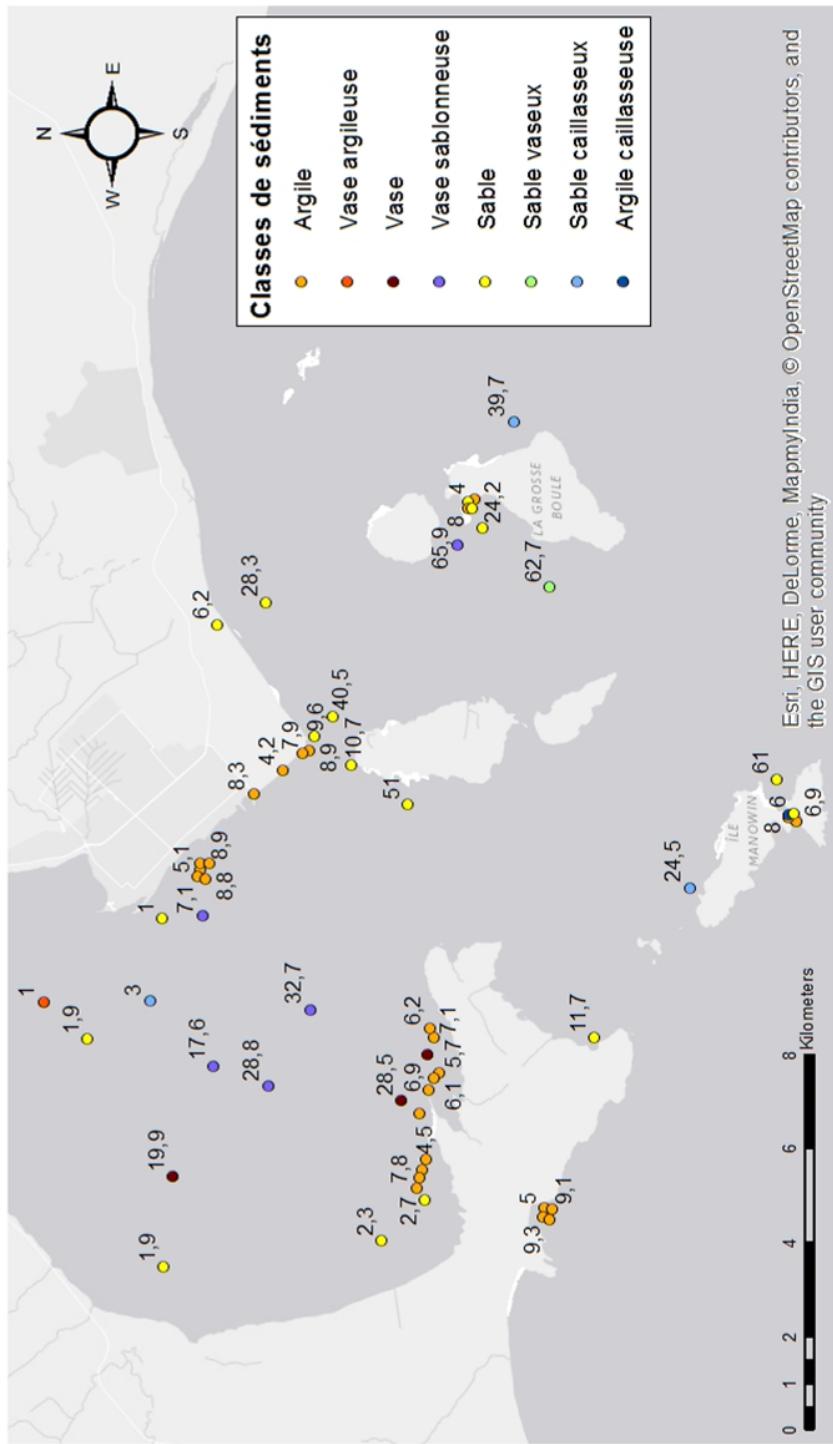


Figure A4-66 : Classe de sédiments retrouvés aux stations (Classification modifiée de Shepard 1954) avec la profondeur des stations en étiquette

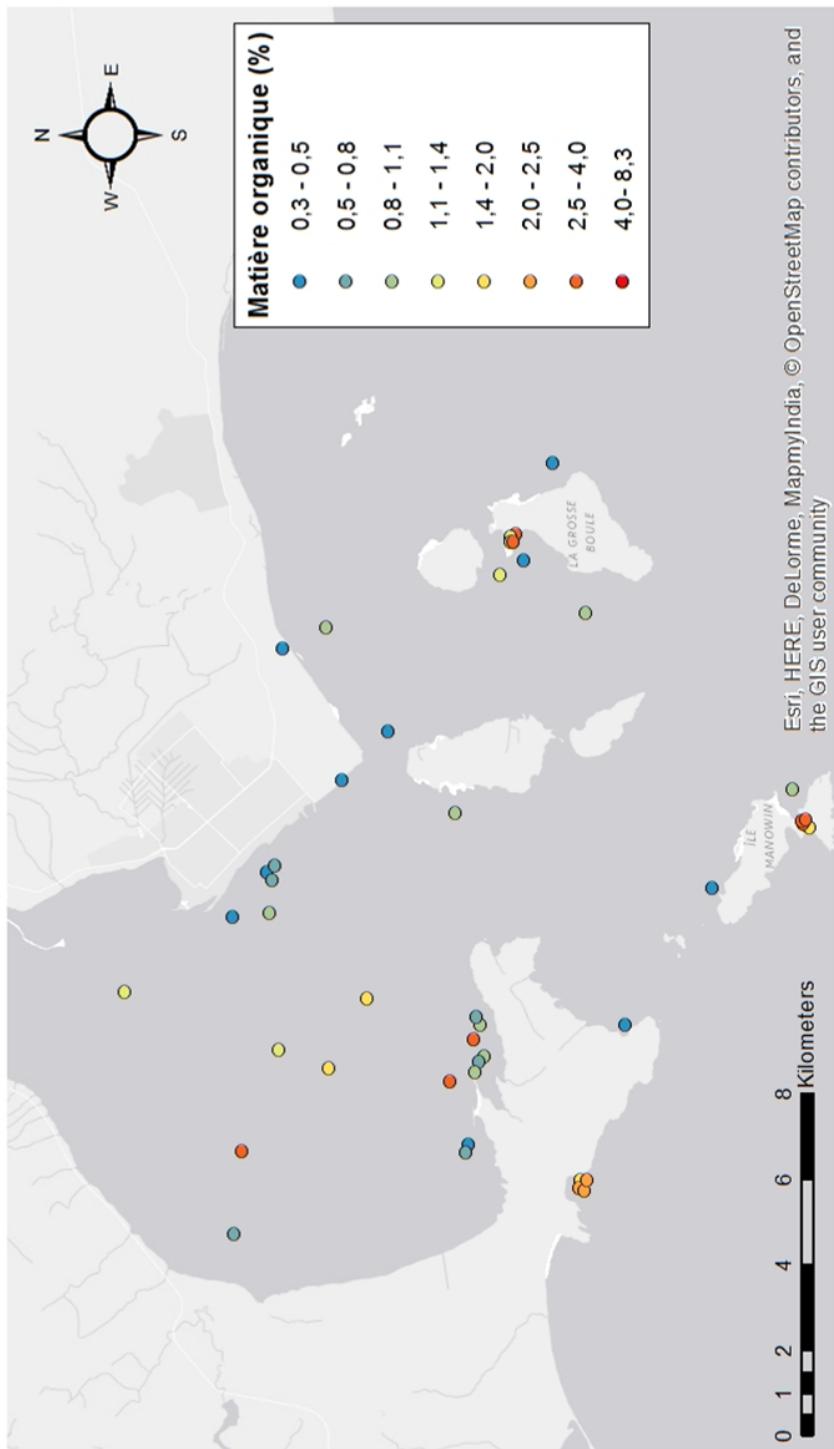
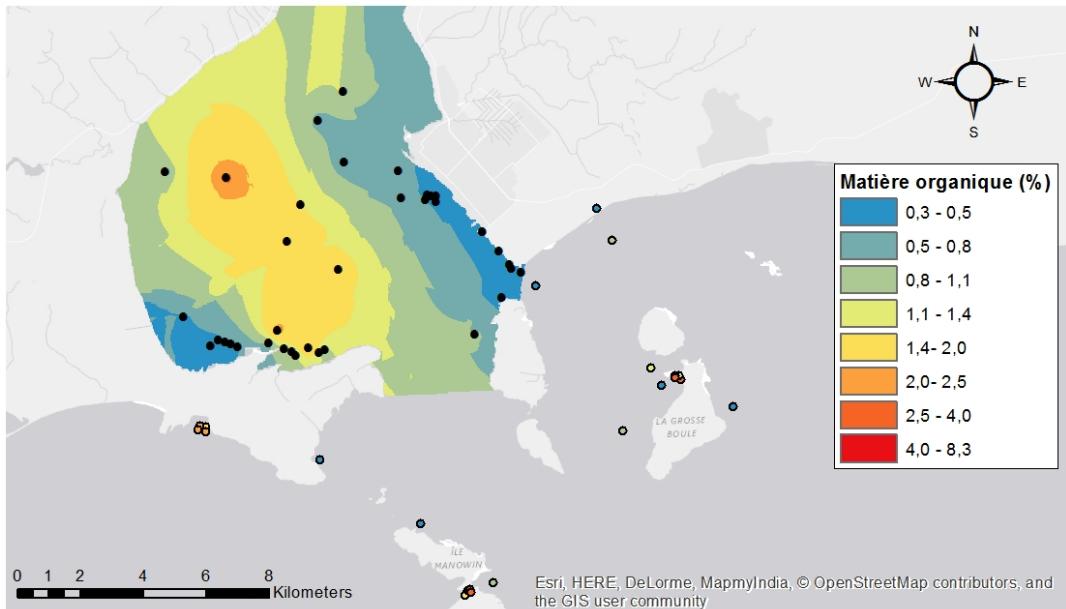


Figure A4-67 : Pourcentage de matière organique contenu dans les sédiments des stations échantillonnées, représenté par classes de pourcentages



*Figure A4-68 : Distribution dans la baie de Sept-Îles des classes de pourcentage en matière organique prédictes par la méthode d'interpolation du krigeage bayésien empirique*

Le krigeage bayésien empirique est une méthode d'interpolation géostatistique permettant non seulement de produire une surface de prédictions (figure A4-69), mais également une mesure de l'incertitude associée aux prédictions (figure A4-70). La méthode utilisée offre une précision accrue des erreurs standard de prévision par rapport aux autres méthodes de krigeage. Puisqu'elle ne tient pas compte des barrières, seules les données à l'intérieur de la baie de Sept-Îles ont été interpolées. Afin d'étendre l'interpolation dans les secteurs extérieurs à la baie un nombre supérieur de données serait de mise dans ces secteurs.

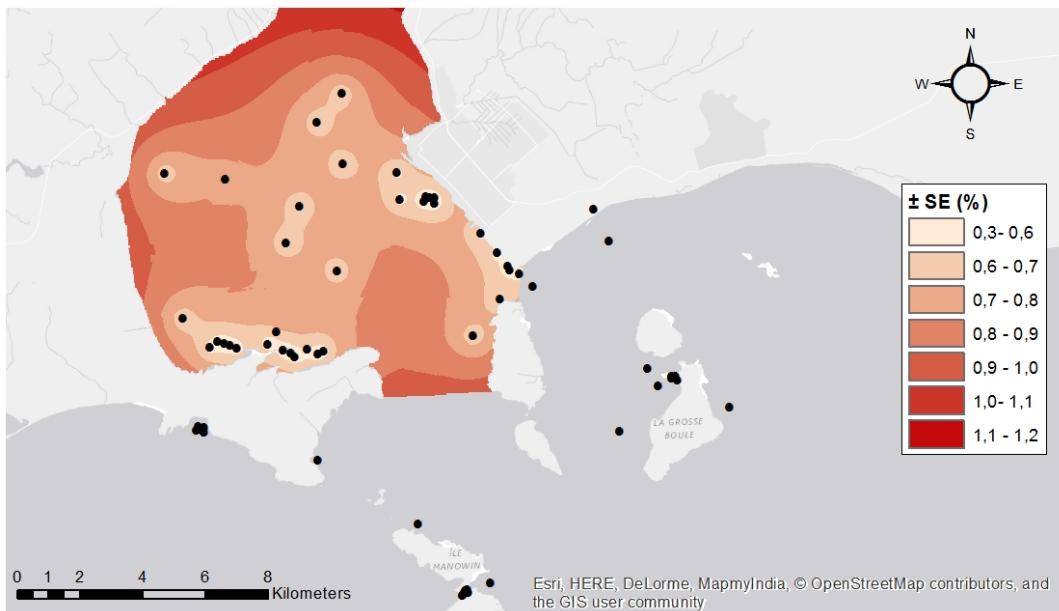


Figure A4-69 : Classes d'erreurs standard associées aux prévisions des concentrations en fluoranthène ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) obtenues par la méthode d'interpolation du krigage bayésien empirique

## Références

- (BAPE) BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT. 2013 Projet de restauration, au sud du quai, au port de Gaspé (Sandy Beach) par Transports Canada - Rapport d'enquête et d'audience publique. Rapport 298. 110p. ISBN 978-2-550-68693-4
- MDDELCC. Ministere du Developpement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2014-2015. [En ligne] Criteres de qualite des sediments au Quebec [http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/criteres\\_sediments](http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/criteres_sediments)
- Mora S. et al., 2010. Distribution of petroleum hydrocarbons and organochlorinated contaminants in marine biota and coastal sediments from the ROPME Sea Area during 2005.
- *Mar Poll Bullet*, 60: 2323-2349.
- Shepard FP, 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *SEPM Society for Sedimentary Geology*, 24(3): 151-158. <https://doi.org/10.1306/D4269774-2B26-11D7-8648000102C1865D>