

Compagnie minière IOC

CARACTÉRISATION DU  
CONCENTRÉ ET DES  
BOULETTES DE FER PRÈS DES  
INSTALLATIONS PORTUAIRES  
À SEPT-ÎLES

RAPPORT FINAL



Compagnie minière IOC

**CARACTÉRISATION DU  
CONCENTRÉ ET DES  
BOULETTES DE FER PRÈS DES  
INSTALLATIONS PORTUAIRES  
À SEPT-ÎLES**  
RAPPORT FINAL

Projet n° : 141-20631-00  
Date : DÉCEMBRE 2014



—  
**WSP Canada Inc.**  
5355, boul. des Gradins  
Québec (Québec) G2J 1C8

Téléphone : 418-623-2254  
Télécopieur : 418-623-1857  
[www.wspgroup.com](http://www.wspgroup.com)

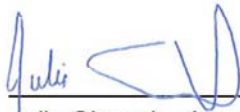




---

# SIGNATURES

Préparé par



Julie Simard, géomorphologue, Ph. D.  
Chargée de projet

Révisé par



Mario Heppell, biol.-amén., M. ATDR.  
Directeur de projet



---

## ÉQUIPE DE RÉALISATION

### **Compagnie minière IOC**

Chargée de projet IOC                      Anne-Marie Proulx

### **WSP Canada Inc. (WSP)**

Directeur de projet                          Mario Heppell, biol.-amén., M. ATDR.

Chargée de projet                          Julie Simard, géomorphologue, Ph. D.

Collaboratrice                              Catherine Tardy Laporte, chimiste, M. Sc.  
Mélanie Lévesque, océanographe, M. Sc.

Personnel de terrain                      Patrice Bégin, biologiste  
Christian Demers, Technicien  
Dominick Cuerrier, technicien  
Daniel Dussault, technicien  
Nicolas Ratté, technicien

Traitement de texte et édition          Linette Poulin

### **Scaphandrier et Associés (sous-traitant)**

Capitaine                                      Dany Scullion

### **Référence à citer :**

---

WSP. 2014. *Caractérisation du concentré et des boulettes de fer près des installations portuaires à Sept-Îles. Rapport final.* Rapport de WSP à la Compagnie minière IOC. 31 p. et annexes.





# TABLE DES MATIÈRES

ÉQUIPE DE RÉALISATION .....	I
TABLEAUX.....	V
FIGURES.....	VII
CARTES .....	VII
ANNEXES .....	VII
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>2. CONTEXTE DE L'ÉTUDE .....</b>	<b>3</b>
<b>3. MÉTHODES.....</b>	<b>7</b>
3.1 CARTOGRAPHIE DES CONCENTRATIONS DE FER AU MAGNÉTOMÈTRE.....	7
3.2 CAMÉRA BENTHIQUE.....	7
3.3 QUANTIFICATION DES VOLUMES DE BOULETTES DE FER .....	9
3.4 SPÉCIATION DU FER DANS LES SÉDIMENTS ET DANS L'EAU .....	9
3.5 CARACTÉRISATION DES COMMUNAUTÉS BENTHIQUES.....	12
<b>4. RÉSULTATS.....</b>	<b>13</b>
4.1 CARTOGRAPHIE DU FER CONTENU DANS LES SÉDIMENTS.....	13
4.1.1 CHAMP MAGNÉTIQUE AMBIANT .....	13
4.1.2 RECOUVREMENT DU FOND MARIN PAR LES BOULETTES DE FER .....	15
4.2 QUANTIFICATION DES BOULETTES DE FER .....	15
4.2.1 ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES .....	15
4.2.2 STRATIGRAPHIE ET COMPOSITION DES CAROTTES DE SÉDIMENTS.....	18
4.2.3 ESTIMATION DES VOLUMES DE BOULETTES DE FER PAR SECTEUR .....	21

# TABLE DES MATIÈRES (suite)

<b>4.3</b>	<b>SPÉCIATION DU FER .....</b>	<b>21</b>
4.3.1	SPÉCIATION DU FER SOUS FORME SOLIDE DANS LES SÉDIMENTS .....	23
4.3.2	SPÉCIATION DU FER SOUS FORME IONIQUE SOLUBLE DANS L'EAU À LA SURFACE DES SÉDIMENTS .....	26
<b>5.</b>	<b>DISCUSSION ET CONCLUSION .....</b>	<b>29</b>
5.1	MAGNÉTOMÉTRIE ET CAMÉRA SOUS-MARINE.....	29
5.2	LOCALISATION ET QUANTIFICATION DES VOLUMES DE BOULETTES DE FER.....	29
5.3	SPÉCIATION DU FER .....	30

---

## TABLEAUX

Tableau 1	Concentrations de fer retrouvées dans les sédiments présents près des installations portuaires de la compagnie minière IOC (2003, 2010). .....	5
Tableau 2	Normes et critères de référence cités dans le document de MacDonald et al., 2014.....	5
Tableau 3	Synthèse granulométrique des sédiments au-devant du quai N° 2.....	17
Tableau 4	Proportion (%) et volume estimé de boulettes de fer contenu pour la carotte C1 .....	19
Tableau 5	Proportion (%) et volume estimé de boulettes de fer contenu pour la carotte C2 .....	19
Tableau 6	Proportion et volume estimé de boulettes de fer contenu pour la carotte C3 .....	19
Tableau 7	Proportion (%) et volume estimé de boulettes de fer contenu pour la carotte C4 .....	20
Tableau 8	Proportion (%) et volume estimé de boulettes de fer contenu pour la carotte C5 .....	20
Tableau 9	Volumes de boulettes estimés en fonction de la profondeur atteinte par les carottages .....	22
Tableau 10	Description des minerais d'origine anthropiques susceptibles de se retrouver dans les sédiments .....	22
Tableau 11	Concentration du fer dans les sédiments.....	23
Tableau 12	Minerais présents dans les sédiments .....	25
Tableau 13	Concentration du fer dans l'eau.....	27
Tableau 14	Paramètres physiques de l'eau de mer aux stations de mesure .....	27



---

## FIGURES

Figure 1	Diagramme de Pourbaix du Fer (Wikimedia Commons.2014).....	11
Figure 2	Intensité du champ magnétique total de la région est de la pointe aux Basques (Normandeau, 2011).....	13
Figure 3	Courbes du pourcentage cumulé des analyses granulométriques aux stations devant le quai No 2. ....	17
Figure 4	Courbes du pourcentage cumulé des analyses granulométriques de la strate 0-30 cm aux stations de carottage derrière le quai N° 2.....	18

---

## CARTES

Carte 1	Zone d'étude.....	4
Carte 2	Plan du relevé au magnétomètre .....	8
Carte 3	Stations d'échantillonnage et de mesures.....	10
Carte 4	Champ magnétique ambiant .....	14
Carte 5	Distribution des plaquages de boulettes de fer .....	16
Carte 6	Teneurs fer total et pourcentage de fer ferrique et de fer ferreux .....	24

---

## ANNEXES

Annexe 1	Protocole d'échantillonnage : CARACTÉRISATION DES BOULETTES DE FER DANS LES SÉDIMENTS DES INFRASTRUCTURES PORTUAIRES DE LA COMPAGNIE MINIÈRE IOC, (SEPT-ÎLES)
Annexe 2	Localisation des stations d'échantillonnage du benthos en 2011
Annexe 3	Photographies décrivant les activités de terrain réalisées à l'automne 2014
Annexe 4	Images extraites des vidéos sous-marines et donnant des exemples de la densité des plaquages de boulettes de fer
Annexe 5	Photographies des carottes de sédiment (Cor-1 à Cor-5)
Annexe 6	Explications additionnelles sur la détermination du fer ferreux et ferrique dans les sédiments



# 1. INTRODUCTION

Depuis plus de 30 ans, la compagnie minière IOC doit effectuer régulièrement un dragage d'entretien à ses installations portuaires de Sept-Îles afin d'y assurer les profondeurs minimales requises pour maintenir des opérations de navigation et de transbordement sécuritaires. En 2004, la compagnie a obtenu un décret gouvernemental autorisant les travaux de dragage pour une période de 10 ans. La compagnie a également entamé, en 2011, la production d'une nouvelle étude d'impact sur l'environnement dans le but de faire reconduire pour une 5e fois son autorisation d'application de son programme d'entretien.

Déposée en 2013 auprès du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), cette étude a fait l'objet, en août 2014, de l'émission de son avis de recevabilité, notamment sur la base d'un engagement de la part de la compagnie de procéder à une caractérisation détaillée de la présence de boulettes et de concentrés de fer, dans les sédiments de ses aires de transbordement à ses installations portuaires (quais N° 1 et N° 2). Il était alors requis que celle-ci soit réalisée avant la prise de décision gouvernementale concernant la délivrance d'un nouveau décret décennal de dragage (2015-2024). Cette caractérisation visait spécifiquement à documenter les impacts potentiels du fer dans le milieu marin, notamment sur les organismes du fond marin (benthos). Les résultats de cette caractérisation devaient aussi permettre, le cas échéant, d'évaluer les possibilités de gestion de ces matériaux.

Afin de répondre à ces suppléments d'information requis par le MDDELCC, la Compagnie minière IOC a donc mandaté WSP Canada Inc. (WSP) en août 2014. Un protocole a alors été soumis par WSP au MDDELCC, qui l'a approuvé à la fin du même mois. Ce protocole suggérait la réalisation de deux campagnes de relevés de terrain. La première campagne de terrain a ainsi eu lieu entre le 31 août et le 5 septembre 2014, alors que la deuxième campagne s'est déroulée du 6 au 11 octobre 2014. Le rapport ci-après présente d'abord les résultats de ces deux campagnes de terrain, ainsi que ceux des diverses analyses effectuées. La discussion qui suit traite des impacts potentiels sur l'environnement naturel de la présence du fer mesuré dans le milieu marin autour des installations portuaires. Enfin, la conclusion accompagne directement le texte de cette discussion.





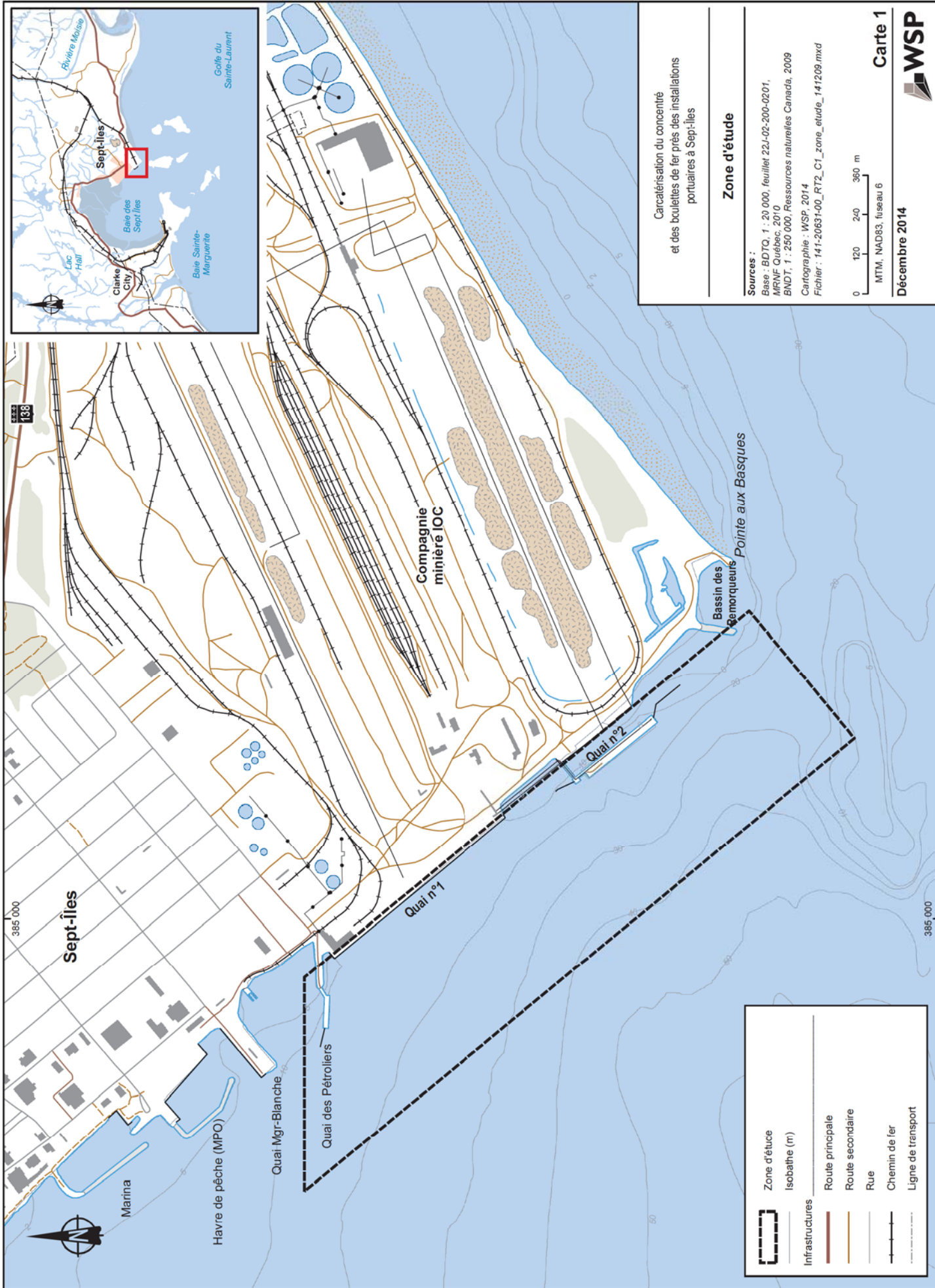
## 2. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Les deux quais utilisés pour les activités portuaires de transbordement de la Compagnie minière IOC se situent dans le secteur est de la baie des Sept Îles. À cet endroit, la bathymétrie au-devant des quais de IOC forme une pente relativement douce et cette dernière prend la forme d'un talus de plus forte pente à partir de l'isobathe de 15 m, et ce, jusqu'à la profondeur de 40 m (carte 1). Afin de bien documenter la situation, la zone d'étude s'étendra jusqu'au pied du talus côtier, soit jusqu'à 500 m de la côte. La zone d'étude couvrira donc une superficie totale de 1 800 m x 500 m, soit 90 ha (carte 1).

Le sédiment est un élément essentiel à la vie des organismes benthiques puisqu'il représente leur habitat à un cycle ou l'autre de leur vie. L'endofaune comme l'épifaune benthique contribuent à plusieurs processus marins importants, dont la régulation des cycles de l'azote et du carbone et la distribution des polluants présents dans le milieu (Snelgrove, 1998). Étant donné leur contact direct avec le sédiment, les organismes benthiques sont vulnérables aux contaminants retrouvés dans le milieu. Les effets sur ces organismes incluent tant la toxicité aiguë que chronique et peut atteindre un individu, une population, voire même une communauté.

À titre de contaminant, une grande variété de métaux, sous différentes formes, peut être retrouvée dans les sédiments aquatiques et marins. Certaines concentrations sont présentes naturellement dans le milieu, alors que d'autres peuvent provenir de la présence d'activités anthropiques. La propriété des métaux présents dans le sédiment dépendra majoritairement de la forme chimique sous laquelle ils se retrouvent (Manahan, 1991). Les métaux peuvent se bioaccumuler dans les organismes benthiques. Les organes et tissus des organismes touchés ont des affinités différentes selon les métaux retrouvés dans le milieu. Notons que ces métaux peuvent être absorbés par certains organismes sous une forme inoffensive. En fait, les conditions environnementales du milieu ont un rôle à jouer sur la forme que peuvent prendre les métaux et, conséquemment, peuvent avoir un effet sur le phénomène de bioaccumulation.

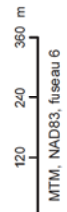
Les opérations de transbordement du minerai de fer pour de la compagnie minière IOC ont engendré, au fil du temps, une certaine accumulation de matière première (boulettes de fer) et de résidus ferreux sur le fond marin. Ces boulettes seraient majoritairement présentes au-devant du quai N° 2, là où la plupart des activités de transbordement s'effectuent. Il convient de mentionner ici que comme les boulettes constituent en effet la matière première produite par l'usine de la compagnie et que celle-ci est destinée à l'exportation, tout déversement accidentel constitue ainsi une perte à éviter dans le processus global de production et de transbordement. Il y a aussi déjà plusieurs années que la compagnie procède à des exercices d'optimisation afin d'éliminer l'occurrence de telles pertes. Il s'avère ainsi fort probable que les boulettes relevées au cours de cette étude proviennent d'opérations passées de transbordement.



Caractérisation du concentré  
et des bouillottes de fer près des installations  
portuaires à Sept-Îles

**Zone d'étude**

Sources :  
Base : BDTO, 1 : 20 000, feuillet 22J-02-200-0201,  
MRNF Québec, 2010  
BNDT, 1 : 250 000, Ressources naturelles Canada, 2009  
Cartographie : WSP, 2014  
Fichier : 141-20631-00\_RT2\_C1\_zone\_etude\_141209.mxd



	Zone d'étude
	Isobathe (m)
	Infrastructure
	Route principale
	Route secondaire
	Rue
	Chemin de fer
	Ligne de transport

Les échantillons récoltés par le passé directement dans la zone de transbordement (quai N° 2), indiquent des concentrations moyennes en fer de 24 750 mg/kg et 20 000 mg/kg pour respectivement 2003 et 2010. Ces concentrations en fer diminuent en s'éloignant vers le large, ainsi qu'en direction est ( $\leq 15\ 000$  mg/kg) (tableau 1).

Tableau 1 Concentrations de fer retrouvées dans les sédiments présents près des installations portuaires de la compagnie minière IOC (2003, 2010).

ANNÉE	ZONE D'ÉTUDE	STATION	CONCENTRATION EN FER (mg/kg)	CONCENTRATION MOYENNE EN FER (mg/kg)
2003	Quai N° 2	1	10 000	24 750
		2	13 000	
		3	28 000	
		4	48 000	
	Bassin des remorqueurs	6	15 000	11 350
		7	13 000	
		8	8 400	
		9	12 000	
		10	12 000	
		11	7 700	
		2010	Quai N° 2	
A1	13 000			
A3	27 000			
A4	16 000			

Pour le moment, il n'existe au Québec aucun critère en regard des seuils de concentration en fer acceptables en milieu dulcicole ou marin sur la faune présente. Dans cette optique, un recueil compilant les différents standards concernant les critères sur la qualité de l'eau et des sédiments en milieu aquatique, estuarien et marin du monde entier a récemment été rédigé pour Environnement Canada (MacDonald et al., 2014.). Sur les 17 critères proposés concernant le fer, il n'y en a que deux qui seraient applicables en milieu marin, et ceux-ci proviendraient de la même étude effectuée dans l'état de New-York (NYSDEC, 1994). D'après ce document, une valeur de 20 000 mg/kg est suggérée à titre de seuil minimal avec effet alors qu'une valeur de 40 000 mg/kg représenterait un seuil à effet sévère (tableau 2). La valeur seuil de 20 000 mg /kg représente en fait la teneur minimale de fer pouvant être retrouvée dans le sédiment et qui sera tolérée par la majorité des organismes benthiques, mais pouvant être toxique pour seulement quelques espèces (NYSDEC, 1994).

Tableau 2 Normes et critères de référence cités dans le document de MacDonald et al., 2014

CONCENTRATION SEUIL POUR LE FER (mg/kg)	CRITÈRE
20 000	Seuil à effet minimal
40 000	Seuil à effet sévère

En comparant les concentrations de fer obtenues à proximité du quai N° 2 avec ces valeurs seuils, quatre stations sur huit semblent enregistrer des concentrations en fer excédant le seuil à effet minimal et l'une d'entre elles surpasserait même le seuil à effets sévères, ce qui justifie en soi la réalisation de la caractérisation demandée par le MDDELCC. Il semblerait en effet possible, *a priori*, que les concentrations en fer retrouvées dans le sédiment à proximité des installations portuaires de la compagnie minière IOC puissent avoir un effet sur le milieu et la faune présente. Par contre, il convient de souligner que les objectifs des activités d'échantillonnage antérieures, dont les résultats sont présentés ici, n'étaient pas spécifiquement de documenter les effets du fer et il serait donc hasardeux d'en tirer directement de réelles conclusions. De là l'intérêt d'avoir réalisé la présente étude.

Dans ce contexte et tel que mentionné dans plusieurs articles portant sur le sujet, des informations supplémentaires se sont avérées nécessaires afin de déterminer s'il existait un risque réel pour l'environnement marin et, le cas échéant, le mode de gestion adéquat à appliquer pour ces boulettes et autres résidus ferreux. À cette fin, il est apparu primordial de quantifier la distribution du paramètre concerné, en occurrence le fer. Pour ce faire, il a été proposé de caractériser d'abord la superficie, la densité et le volume des boulettes de fer ainsi que les teneurs en fer des sédiments de la zone d'étude. Par la suite, une caractérisation en termes d'abondance et de diversité de la faune benthique devait être effectuée dans des zones de diverses concentrations différentes en fer afin d'observer, s'il y a lieu, une variabilité spatiale tributaire de ces concentrations.

## 3. MÉTHODES

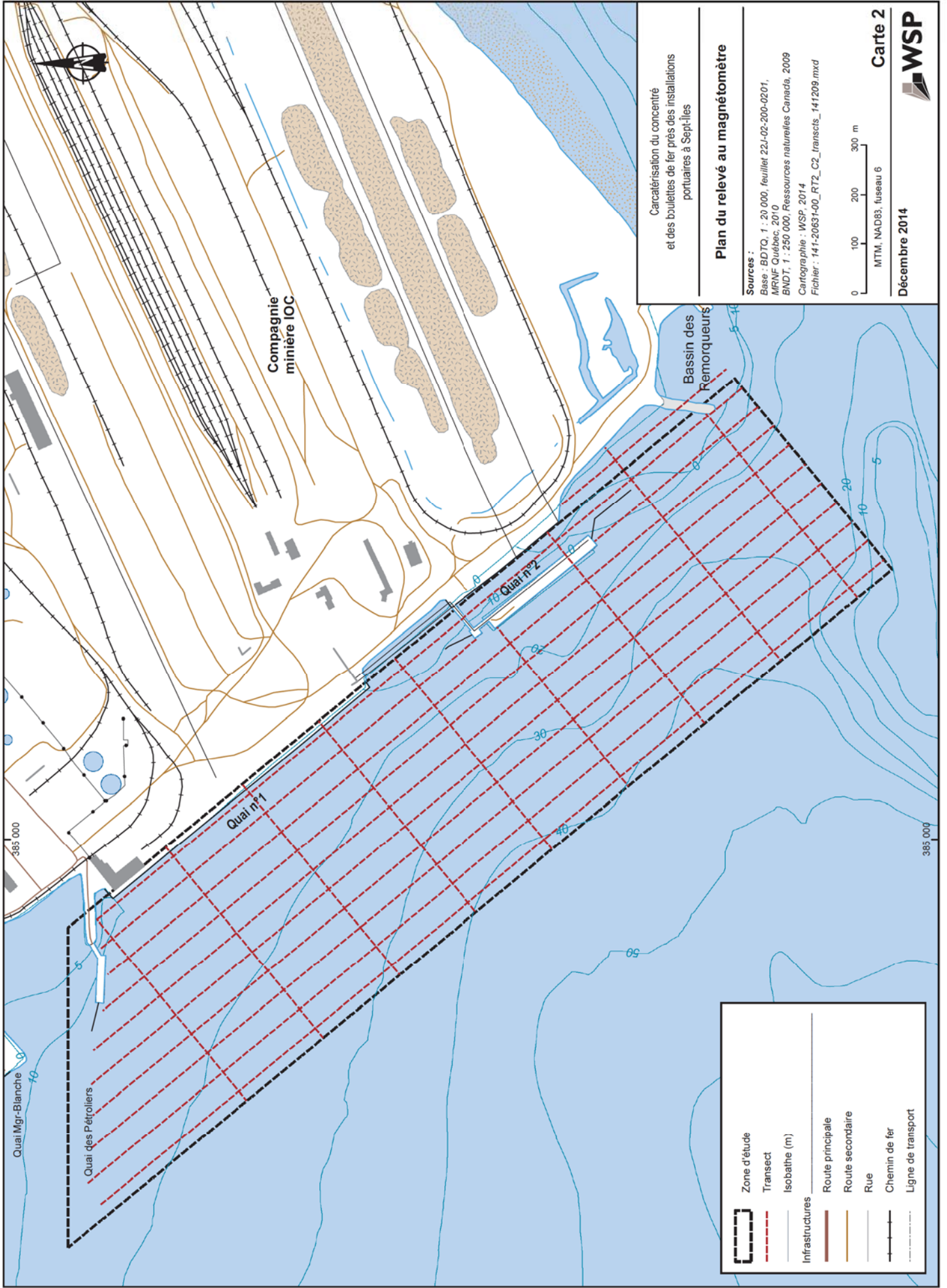
### 3.1 CARTOGRAPHIE DES CONCENTRATIONS DE FER AU MAGNÉTOMÈTRE

Pour dresser un portrait de la répartition du fer sur les fonds marins dans le secteur des quais de IOC, la cartographie du champ magnétique ambiant a été réalisée au moyen d'un magnétomètre de marque SeaSPY (Marine Magnetic Corp.). La méthode a été inspirée de celle suggérée par Pozza *et al.* (2004), dans une étude portant sur la cartographie des contaminants en métaux lourds. Le champ magnétique ambiant de l'aire d'étude a donc été enregistré (valeurs en nanoTesla [NT]) au cours des 2, 3 et 4 septembre 2014, en suivant des transects longitudinaux à la berge, distancés selon un intervalle de 50 m et en suivant des transects transversaux positionnés à chaque 200 m (carte 2). Au total, les 22,5 km de lignes ont été sondés sur une surface de 90 ha. Le magnétomètre a été treuillé par une embarcation de type ponton à une distance de 24 m derrière celle-ci et à moins de 1 m sous la surface de l'eau (annexe 1). L'acquisition des données a été réalisée à une vitesse moyenne de 10 km/h et la fréquence d'échantillonnage a été fixée à 4 Hz, faisant en sorte qu'une mesure a été enregistrée à chaque mètre. Un système de positionnement DGPS (Bluteck) a été interfacé aux systèmes SeaSpy, à l'aide du logiciel BOB (Marine Magnetics Corp. offrant une précision en X et en Y inférieure à 10 cm [annexe 1]).

Les données ont été nettoyées en fonction de la qualité du signal transmis par le magnétomètre, tel que suggéré par le fabricant. Par ailleurs, les travaux de Eyles *et al.* (2003) et de Normandeau (2011) indiquent que les variations du champ magnétique en fonction des variations diurnes et de la bathymétrie sont négligeables. Pour cette raison, ces facteurs de correction n'ont pas été appliqués aux données relevées dans le cadre des présents travaux. Les données retenues couvrent la totalité du territoire à l'étude puisque les transects ont été réalisés à quelques reprises. Une interpolation des données a par la suite été réalisée pour produire une carte du champ magnétique ambiant, tel que l'a fait Normandeau (2011) pour les secteurs compris entre la Pointe aux Basques et l'embouchure de la rivière Moisie.

### 3.2 CAMÉRA BENTHIQUE

Puisque la magnétométrie n'a jamais été utilisée dans un tel contexte et que la navigation avec le magnétomètre était impossible en certains endroits pour des raisons de sécurité, une caméra benthique à haute résolution a été déployée pour fins de validation et de cartographie plus fine dans le secteur du quai N° 2 (annexe 1). La surface du fond marin a été filmée le long de transects couvrant les zones les plus susceptibles d'accumuler les boulettes et les concentrés de fer, soit entre le littoral et le quai N° 2, principalement sous les passerelles des convoyeurs, ainsi que dans la zone de transbordement entre le quai et les bateaux. D'autres transects ont été réalisés entre le quai N° 2 et le quai N° 1. Tous les transects réalisés à la caméra ont été géoréférencés, de sorte qu'une cartographie des plaquages de boulettes de fer observées sur le fond marin a pu être réalisée. Des zones homogènes de pourcentage de recouvrement ont par la suite été tracées à partir de ces transects. La superficie de ces polygones a permis d'estimer des volumes de boulettes de fer.



Carcatérisation du concentré  
et des boulettes de fer près des installations  
portuaires à Sept-Îles

**Plan du relevé au magnétomètre**

Sources :  
Base : BDTO, 1 : 20 000, feuillet 22J-02-200-0201,  
MRNF Québec, 2010  
BNDT, 1 : 250 000, Ressources naturelles Canada, 2009  
Cartographie : WSP, 2014  
Fichier : 141-20631-00\_RT2\_C2\_transcis\_141209.mxd



Carte 2



Décembre 2014

	Zone d'étude
	Transect
	Isobathe (m)
<b>Infrastructures</b>	
	Route principale
	Route secondaire
	Rue
	Chemin de fer
	Ligne de transport

### 3.3 QUANTIFICATION DES VOLUMES DE BOULETTES DE FER

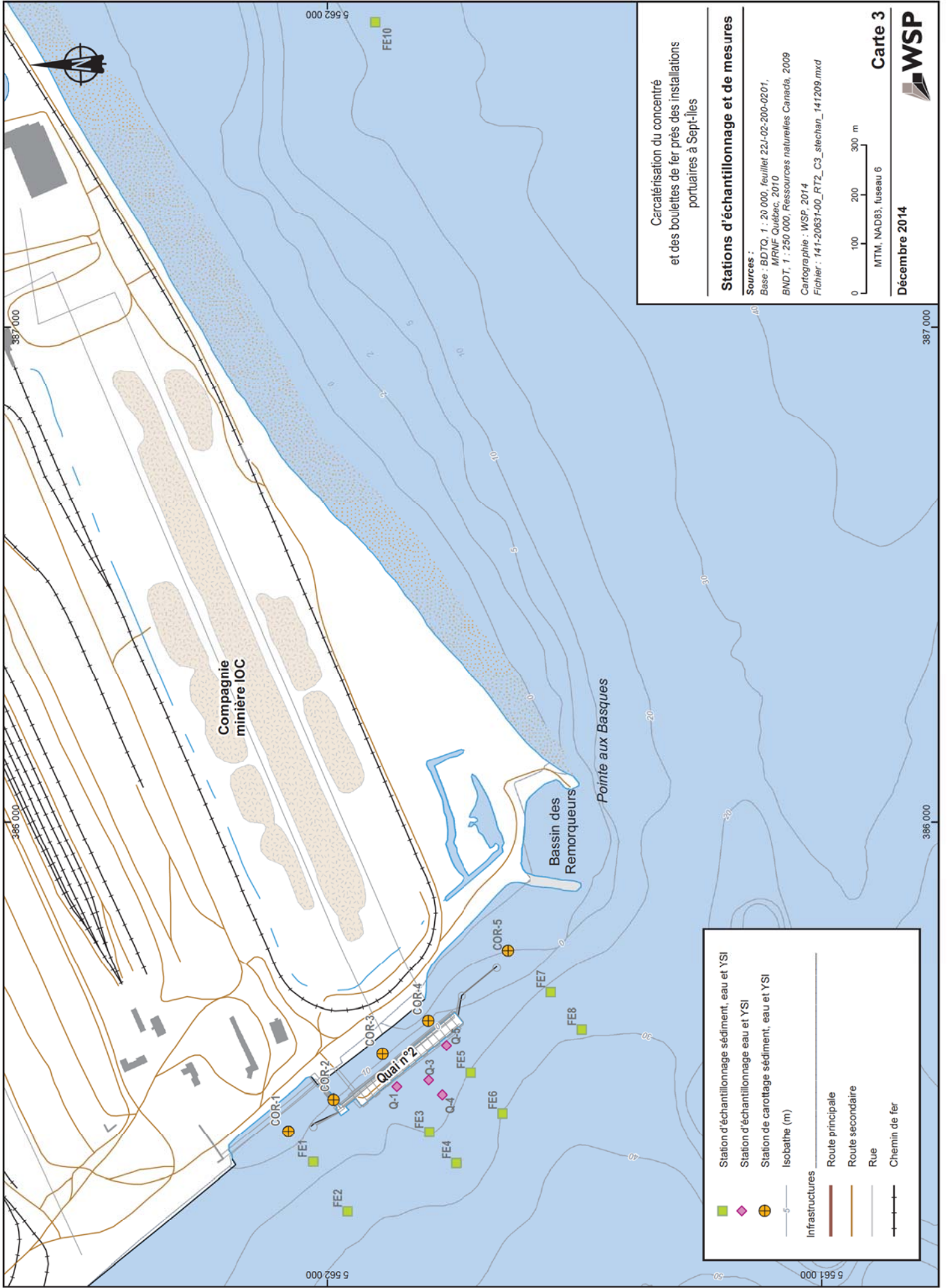
Pour estimer des volumes de boulettes de fer dans les sédiments du secteur des quais d'IOC, une carotte de sédiment a été prélevée à cinq stations différentes (carte 3). La localisation des stations a été guidée en fonction de la cartographie des plaquages de boulettes de fer réalisée au préalable. Les carottes ont été prélevées au moyen d'un vibro-carottier de marque Rossfelder. Leurs longueurs ont varié en fonction des profondeurs de refus de pénétration du carottier, causé lorsque des couches de plus forte compaction ont été rencontrées. Les carottes ont ensuite été sous-échantillonnées en laboratoire, selon les caractéristiques sédimentologiques homogènes des strates. Les échantillons ont enfin été acheminés au laboratoire de géomorphologie et de sédimentologie de l'Université Laval, afin d'y être tamisés dans le but d'évaluer la proportion de boulettes de fer à l'intérieur de chacune des unités sédimentaires identifiées. Les volumes de boulettes ont été calculés selon l'épaisseur de la strate et en considérant que le diamètre du carottier est de 10 cm.

### 3.4 SPÉCIATION DU FER DANS LES SÉDIMENTS ET DANS L'EAU

Afin de quantifier les risques écotoxicologiques associés à la présence anthropique de fer dans les sédiments, il est important de déterminer non seulement la quantité de fer présent, mais également sous quelle forme il se trouve. C'est pourquoi la détermination de la spéciation du fer dans les eaux et dans les sédiments permet de quantifier le potentiel des sédiments contaminés à libérer les formes toxiques du fer dans l'environnement. Cette approche est d'autant plus pertinente puisqu'aucun critère de référence n'existe au Québec et au Canada afin de déterminer la concentration maximale de fer acceptable dans les sédiments ou dissous dans l'eau de mer, sans atteinte à la vie aquatique.

Le diagramme de Pourbaix du fer (figure 1) décrit la spéciation du fer en fonction du potentiel d'oxydo-réduction du milieu, ainsi que du pH. Dans un milieu réducteur (Potentiel  $< -0,6$  V), le fer se réduit sous sa forme métallique solide ( $\text{Fe}^0$ ), soit une forme ni toxique, ni biodisponible. Dans un milieu neutre à acide de faiblement réducteur à faiblement oxydant, le fer ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) est favorisé. Il s'agit d'un fer sous forme ionique dissout dans l'eau. C'est également la forme la plus toxique et la plus biodisponible (MEPCB, 2008). Dans un milieu acide et oxydant, le fer ferrique ( $\text{Fe}^{3+}$ ) est favorisé. Tout comme le fer ferreux, cette espèce est aussi soluble dans l'eau, mais elle est moins toxique (MEPCB, 2008). Finalement, dans les milieux oxydants, neutres à basiques, les oxydes et les hydroxydes de fer sont favorisés. Ces espèces sont présentes sous forme solide et ne sont pas toxiques, ni biodisponibles.

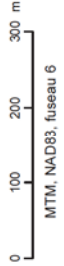
La source anthropique du fer présent dans les sédiments est potentiellement sous formes d'oxydes et de sulfures de fer. Des cations ferreux  $\text{Fe}^{2+}$  et ferriques  $\text{Fe}^{3+}$  peuvent s'échapper des minéraux pour se dissoudre dans l'eau lorsque les conditions sont favorables (en fonction entre autres du pH et du potentiel d'oxydoréduction). Il est donc pertinent de quantifier la concentration des différents minéraux du fer présents dans les sédiments pour déterminer le potentiel des sédiments à relarguer, les formes solubles, biodisponibles et toxiques du fer dans l'eau des sédiments.



Caractérisation du concentré  
et des boulettes de fer près des installations  
portuaires à Sept-Îles

**Stations d'échantillonnage et de mesures**

Sources :  
Base : BDTO, 1 : 20 000, feuillet 22J-02-200-0201,  
MRNF Québec, 2010  
BNDT, 1 : 250 000, Ressources naturelles Canada, 2009  
Cartographie : WSP, 2014  
Fichier : 141-20631-00\_RT2\_C3\_stechan\_141209.mxd



Carte 3

Décembre 2014



	Station d'échantillonnage sédiment, eau et YSI
	Station d'échantillonnage eau et YSI
	Station de carottage sédiment, eau et YSI
	Isobathe (m)
<b>Infrastructures</b>	
	Route principale
	Route secondaire
	Rue
	Chemin de fer



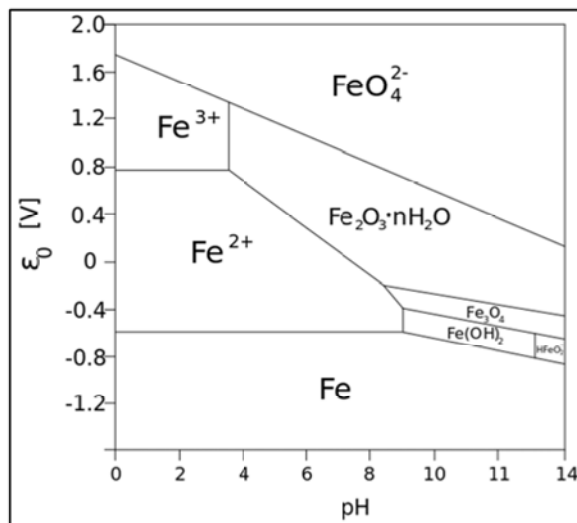


Figure 1 Diagramme de Pourbaix du Fer (Wikimedia Commons.2014)

Pour bien comprendre la concentration et la nature du fer dans les sédiments et les échanges possibles avec le milieu, une campagne d'échantillonnage de sédiment et d'eau ainsi que de mesures de paramètres physico-chimiques de l'eau a été réalisée (carte 3). Compte tenu qu'un dragage devait être réalisé entre les deux campagnes de terrain en 2014 et pour éviter de perdre de l'information quant à la situation existante, quatre des six stations d'échantillonnage qui ont servi à caractériser les sédiments pour l'obtention du certificat d'autorisation pour le dragage 2014 ont fait l'objet de mesures et d'échantillonnage afin de déterminer la spéciation du fer (carte 3). Le plan d'échantillonnage de la deuxième campagne a été élaboré en fonction des résultats découlant de la première campagne de terrain.

Selon un ordre précis, pour l'ensemble des stations d'échantillonnage (incluant les stations prévues pour le carottage), le potentiel d'oxydo-réduction, la quantité d'oxygène dissous, le pH ainsi que la température ont été mesurés directement sur le fond marin à l'interface de l'eau et des sédiments, à l'aide d'une sonde de type YSI. Cette dernière a été calibrée juste avant la première mesure. Par contre, les résultats de la première campagne de terrain doivent être interprétés prudemment, compte tenu que pour une même station, la valeur de certains paramètres enregistrés par cette sonde variait de façon importante au cours de la première journée et que la sonde a été non opérationnelle le lendemain. Pour s'assurer de la justesse des résultats, les mêmes stations ont été mesurées à nouveau lors de la deuxième campagne de terrain. Les stations ont été mesurées à deux reprises, soit à marée montante et à marée baissante.

Pour toutes les stations, un échantillon d'eau a été prélevé près de la surface des sédiments à l'aide d'une bouteille Kemmerer dans le but de mesurer, en laboratoire, les concentrations de fer dissous sous la forme des ions ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) et ferriques ( $\text{Fe}^{3+}$ ). Un échantillon de sédiment a également été prélevé avec une benne Van Veen. Les échantillons ont ensuite été mis en pot pour fins d'analyses granulométriques et physicochimiques. Les concentrations de fer total extractible, la quantification des différents minerais de fer ainsi que la spéciation du fer à l'état solide sont les paramètres qui ont été mesurés en laboratoire pour ces sédiments.

Afin d'éviter toute forme de dégradation possible et d'ainsi s'assurer que les proportions de chaque ion puissent demeurer stables, l'ensemble des échantillons d'eau et de sédiments ont été filtrés dès leur prélèvement (dans le cas de l'eau) et mis en pot en évitant de laisser des bulles d'air, de façon à éviter le plus possible tout contact avec l'oxygène de l'air qui auraient pu influencer les résultats en raison de leur oxydation. Pour les mêmes raisons, les pots ont aussi été mis à l'abri de la lumière et conservés au frais. Les échantillons ont été acheminés dans des glacières aux laboratoires d'analyse en moins de 24 heures. Enfin, compte tenu de l'approche moins conventionnelle de certains types d'analyses présentées dans cette étude, des explications additionnelles à propos de la quantification des teneurs en fer ferreux et ferrique dans les sédiments sont présentées à l'annexe 3.

### 3.5 CARACTÉRISATION DES COMMUNAUTÉS BENTHIQUES

À l'intérieur du protocole initial, comme les effets potentiels de la présence du fer n'étaient pas connus, une caractérisation des communautés benthiques dans la zone d'étude avait été proposée afin d'examiner son incidence potentielle sur la structure de celles-ci, sur leur diversité, leur richesse, l'abondance de chaque espèce, etc. Une telle étude biologique était proposée pour la seconde campagne de terrain en fonction des résultats de la première. Or, à la lumière des résultats de la première campagne de terrain, aucune trace d'ion ferreux et ferrique n'a été détectée dans les échantillons d'eau, ni dans les échantillons de sédiments. Compte tenu que cette situation démontrait déjà que le risque écotoxicologique anticipé était faible, il a été décidé de ne pas réaliser une telle étude biologique, mais de continuer à caractériser les paramètres physico-chimiques du milieu pour valider et compléter les relevés à l'échelle du secteur à l'étude, soit la zone sous l'influence de la cellule hydrosédimentaire immédiatement à l'est de la Pointe aux Basques.

Néanmoins, une étude a été réalisée en 2011 afin de caractériser la faune benthique entre le quai N° 1 et N° 2 (GENIVAR, 2012). Les résultats des identifications taxonomiques effectuées sur les quatre échantillons de microfaune endobenthique montrent qu'au total, 47 taxons différents avaient été recensés, ceux-ci étant répartis entre 8 phylums distincts de la manière suivante : 1 cnidaire, 1 bryzoaire, 1 nématode, 11 mollusques, 24 annélides, 1 pycnogonide, 5 crustacés et 3 échinodermes. Les annélides et les mollusques sont donc les phylums enregistrant le plus grand nombre d'espèces. C'est à la station la plus près de la rive (EX-B21; annexe 2) que le plus grand nombre d'espèces a été répertorié (32 espèces), alors que la station EX-B7 (annexe 2) enregistre la plus faible valeur (22 espèces). Par ailleurs, les observations durant les travaux de la première ont démontré la présence d'une macrofaune épibenthique abondante (étoiles de mer, homards, etc.).

## 4. RÉSULTATS

### 4.1 CARTOGRAPHIE DU FER CONTENU DANS LES SÉDIMENTS

#### 4.1.1 CHAMP MAGNÉTIQUE AMBIANT

La carte présentant le magnétisme ambiant de la zone d'étude montre des valeurs similaires à celles enregistrées par Normandeau (2011) à l'est de la Pointe aux Basques, avec des valeurs maximales respectives de 56 411 et de 55 297 nT (carte 4; figure 2). La principale caractéristique ressortant de la carte comparativement à celle de Normandeau (2011) est la faible valeur du champ magnétique ambiant enregistrée au-devant des quais, non seulement au quai N° 2, mais également au quai N° 1 et au quai des Pétroliers (carte 4).

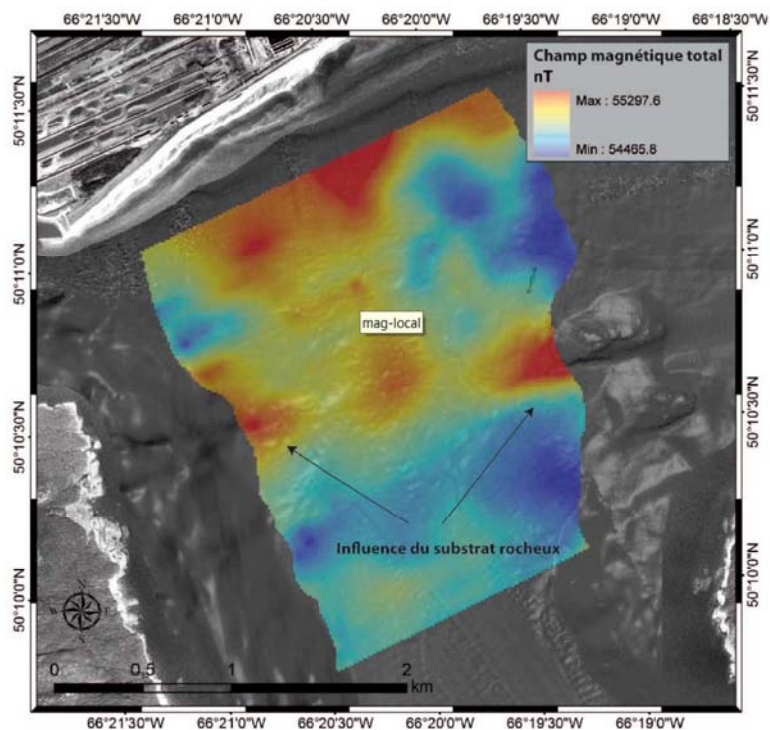
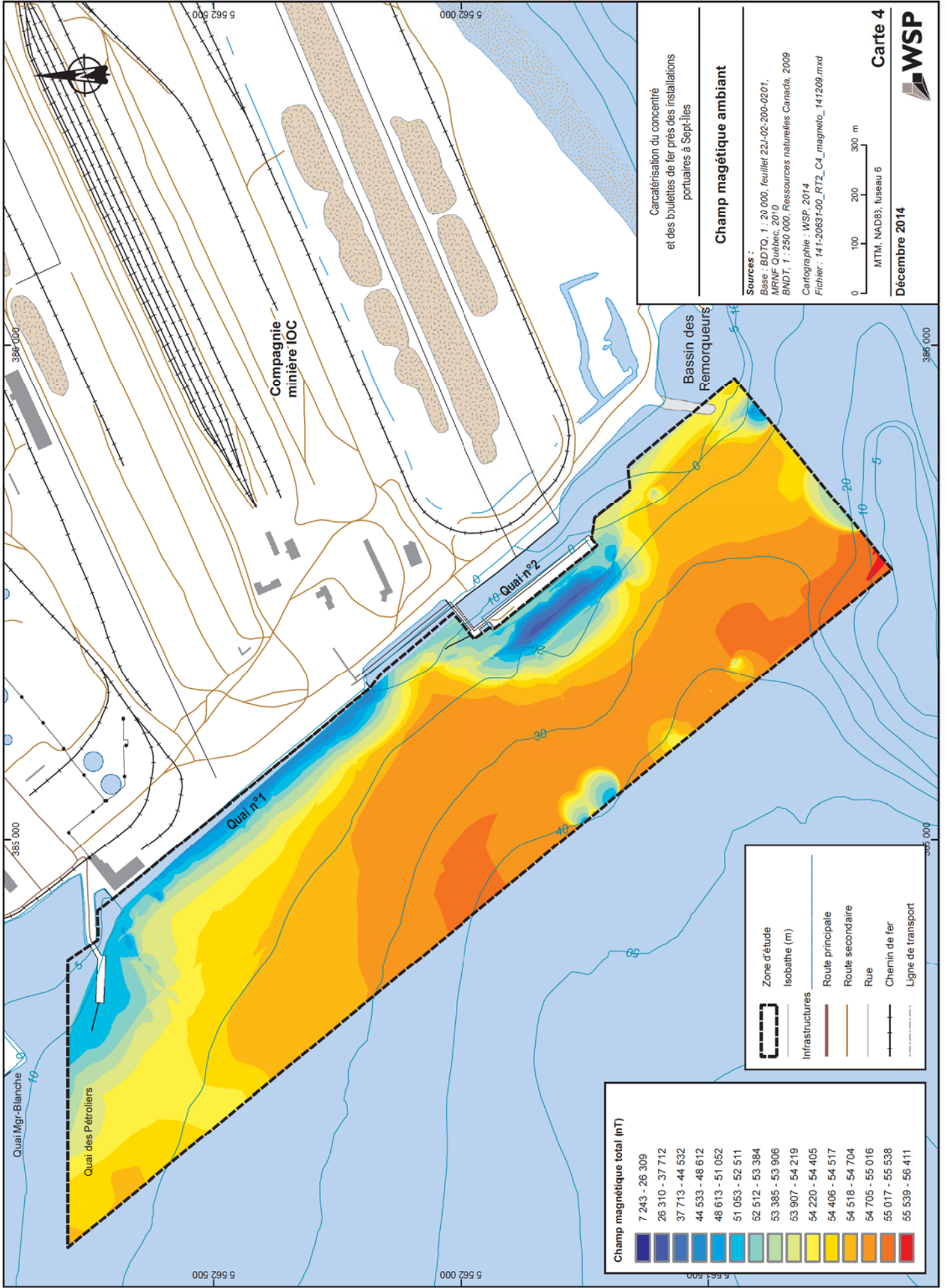


Figure 2 Intensité du champ magnétique total de la région est de la pointe aux Basques (Normandeau, 2011).



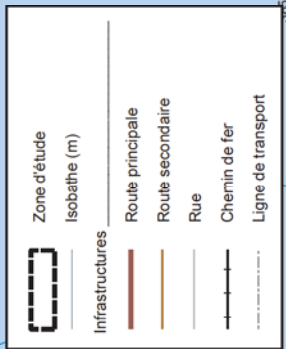
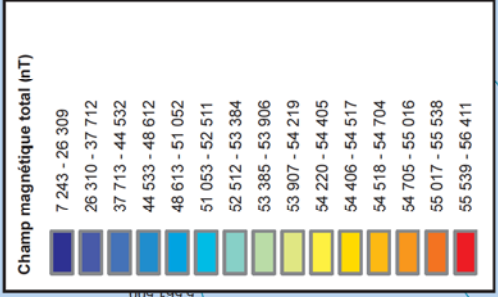
Catégorisation du concentré  
et des boulettes de fer près des installations  
portuaires à Sept-Îles

**Champ magnétique ambiant**

Sources :  
Base : BDTO, 1 : 20 000, feuillet 22,I-02-200-0201,  
MRNF Québec, 2010  
BNDT, 1 : 250 000, Ressources naturelles Canada, 2009  
Cartographie : WSP, 2014  
Fichier : 141-20631-00\_RT2\_C4\_magneto\_141209.mxd



**Carte 4**  
MTM, NAD83, fuseau 6  
**Décembre 2014**  
**WSP**



## 4.1.2 RECOUVREMENT DU FOND MARIN PAR LES BOULETTES DE FER

Les transects réalisés à la caméra benthique indiquent un recouvrement variable du fond marin par des plaquages de boulettes de fer (carte 5; annexe 4). Les plaquages fréquents avec une forte densité de boulettes de fer s'observent principalement sous la passerelle de transbordement du minerai la plus à l'ouest. À cet effet, il importe de souligner que la présence de montées bathymétriques sous cette passerelle a été observée lors des relevés. Le recouvrement du fond marin par les plaquages de forte densité se trouvent également dans le secteur nord-ouest, près de la berge, entre les quais N° 2 et N° 1 (carte 5). Les plaquages de boulettes de fer disparaissent ensuite graduellement jusqu'au quai N° 1 où aucun plaquage de boulettes n'est observé (carte 4), ce qui est conséquent avec le fait qu'il ne s'agit pas d'un quai d'expédition.

Les observations faites le long des transects relevés en face du quai N° 2 ainsi qu'à l'extrémité sud-est de la zone de transbordement des minéraliers démontrent la quasi-absence de boulettes de fer sur le fond marin de ce secteur d'expédition des produits (carte 5). Enfin, la présence de plaquages de boulettes de fer de densité moyenne à élevée a été observée directement derrière le quai N° 2 (carte 5).

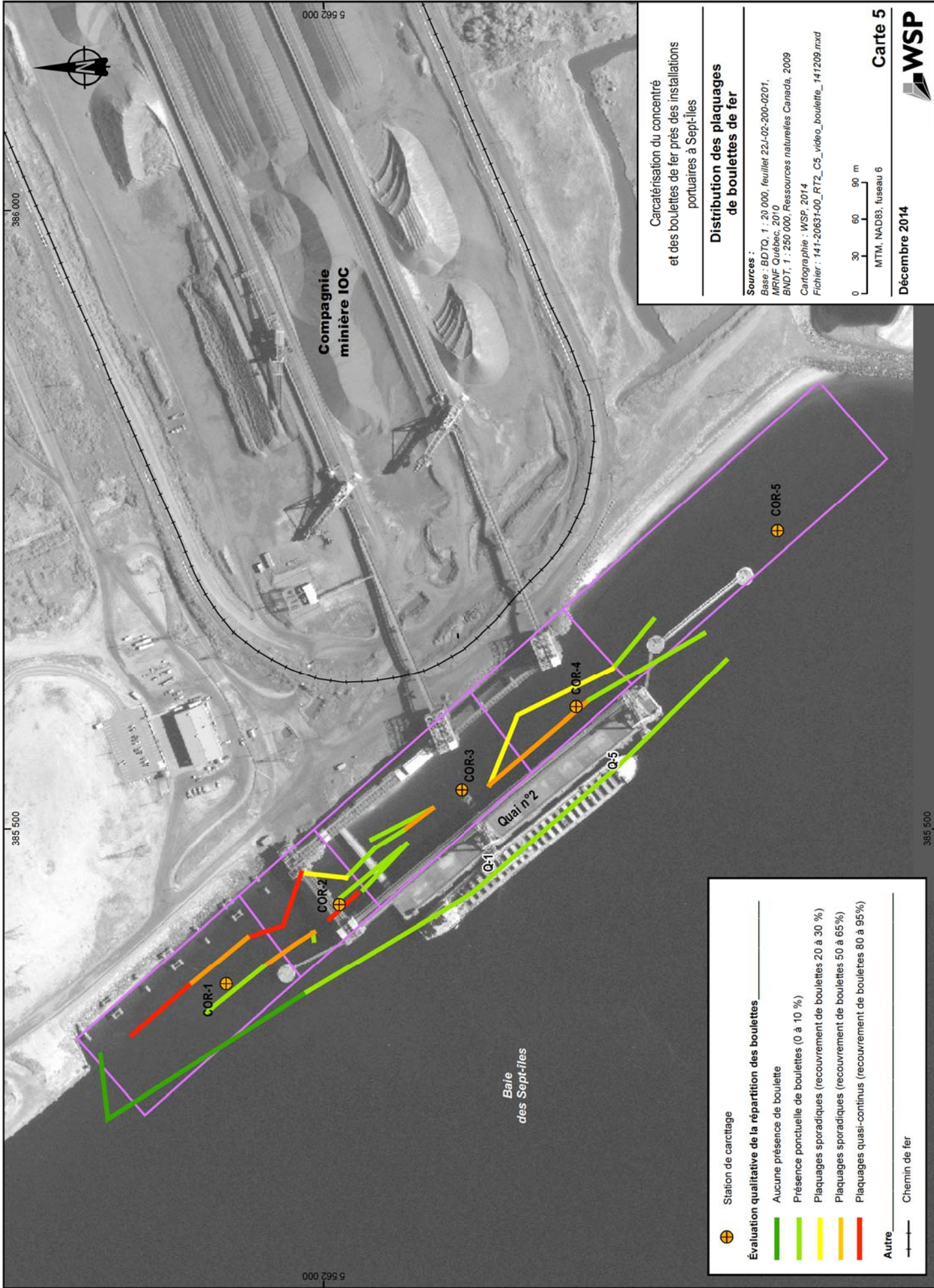
## 4.2 QUANTIFICATION DES BOULETTES DE FER

### 4.2.1 ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES

Les analyses granulométriques ont pour but de présenter la composition et la variabilité des sédiments qui composent le fond marin devant et derrière le quai N° 2. Il est à noter que les boulettes de fer ont été prélevées des échantillons avant d'effectuer les mesures granulométriques.

#### **Stations au-devant du quai No. 2**

La caractérisation visuelle des sédiments permet d'affirmer que pour tous les échantillons, une forte proportion de sable domine. Aucune boulette de fer n'a été recueillie dans le contenu des bennes, à l'exception de la station Q-4. Pour cette station, six boulettes de fer ont été observées, pour une contenance approximative de 2 l de sédiment. Les résultats des analyses granulométriques confirment que pour l'ensemble des stations, les sédiments comprennent une forte proportion en sables. Les courbes de pourcentage cumulé montrent deux regroupements : le premier comprend les stations Q1 et Q5 qui montrent une fraction plus silteuse comprise entre 20 et 30 % (carte 3; figure 3). Ces échantillons sont dominés par des sables fins et la répartition statistique de ce regroupement est unimodale avec un faible tri (tableau 3). Le deuxième groupement de stations qui comprend Q3 et Q4 montre une dominance des sables supérieure à 90 % (figure 3). Ces échantillons sont dominés par les sables fins moyens et la distribution statistique de ces échantillons est respectivement unimodale pour la Q3 et bimodale pour la Q4 (avec une proportion de 6 % de gravier). Ceux-ci présentent un tri moyen (tableau 3). L'absence de boulettes de fer est totale pour ces quatre échantillons prélevés de façon aléatoire à chaque station.



Caractérisation du concentré  
et des boulettes de fer près des installations  
portuaires à Sept-Îles

**Distribution des plaquages  
de boulettes de fer**

Sources :  
Base : BDTO, 1 : 20 000, feuillet 22J-02-200-0201,  
MRNF Québec, 2010  
BNDT, 1 : 250 000, Ressources naturelles Canada, 2009  
Cartographie : WSP, 2014  
Fichier : 141-20631-00\_RT2\_C5\_video\_boulette\_141209.mxd

0 30 60 90 m  
MTM, NAD83, fuseau 6

Décembre 2014

**Carte 5**

**WSP**

⊕ Station de carottage

**Évaluation qualitative de la répartition des boulettes**

- Aucune présence de boulette
- Présence ponctuelle de boulettes (0 à 10 %)
- Plaquages sporadiques (recouvrement de boulettes 20 à 30 %)
- Plaquages sporadiques (recouvrement de boulettes 50 à 65%)
- Plaquages quasi-continus (recouvrement de boulettes 80 à 95%)

Autre

- Chemin de fer

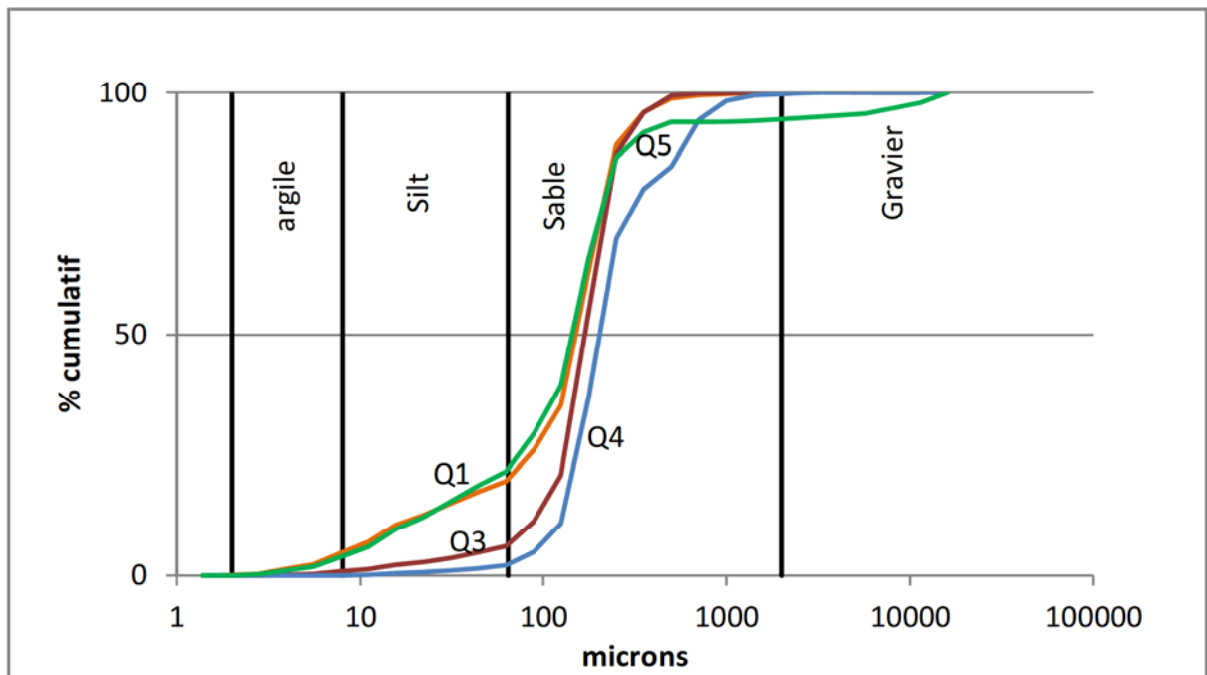


Figure 3 Courbes du pourcentage cumulé des analyses granulométriques aux stations devant le quai No 2.

Tableau 3 Synthèse granulométrique des sédiments au-devant du quai N° 2

STATION/ PARAMÈTRES	Q1	Q3	Q4	Q5	C1	C2	C3	C4	C5
Texture dominante (% de la classe)	sable fin (37 %)	sable fin (43 %)	sable moyen (43 %)	sable fin (36 %)	sable fin (39 %)	sable fin (24 %)	sable fin (37 %)	sable fin (38 %)	sable fin (46 %)
Moyenne (µm)	152,1	229,1	331,7	147,7	188,5	226,8	186,9	179,2	138,8
Mode 1 (µm)	213,4	213,4	301,8	213,4	150,9	150,9	150,9	213,4	213,4
Mode 2 (µm)	-	-	853,5	-		3414			
Tri (µm)	faible	moyen	moyen	faible	faible	très faible	faible	faible	faible

### Stations derrière le quai No.2

La caractérisation visuelle des sédiments permet d'affirmer qu'à l'exception de la station C2, une forte proportion de sable domine. Quelques boulettes de fer ont été recueillies dans le contenu des bennes aux stations C1, C2 et, dans une moindre proportion, à la station C3. Les résultats des analyses granulométriques confirment que pour l'ensemble des stations, les sédiments comprennent une forte proportion en sables. Les courbes de pourcentage cumulé montrent deux regroupements : le premier comprend les stations C1, C3, C4, C5, qui montrent une fraction de sable plus grossier et de gravier

entre 40 et 85 % (figure 4). Ces échantillons sont dominés par des sables fins et la répartition statistique de ce regroupement est unimodale avec un faible tri (tableau 1). La courbe C2 se distingue des autres stations, avec une moins grande dominance des sables fin et une répartition statistique bimodale qui tend vers les graviers (tableau 1).

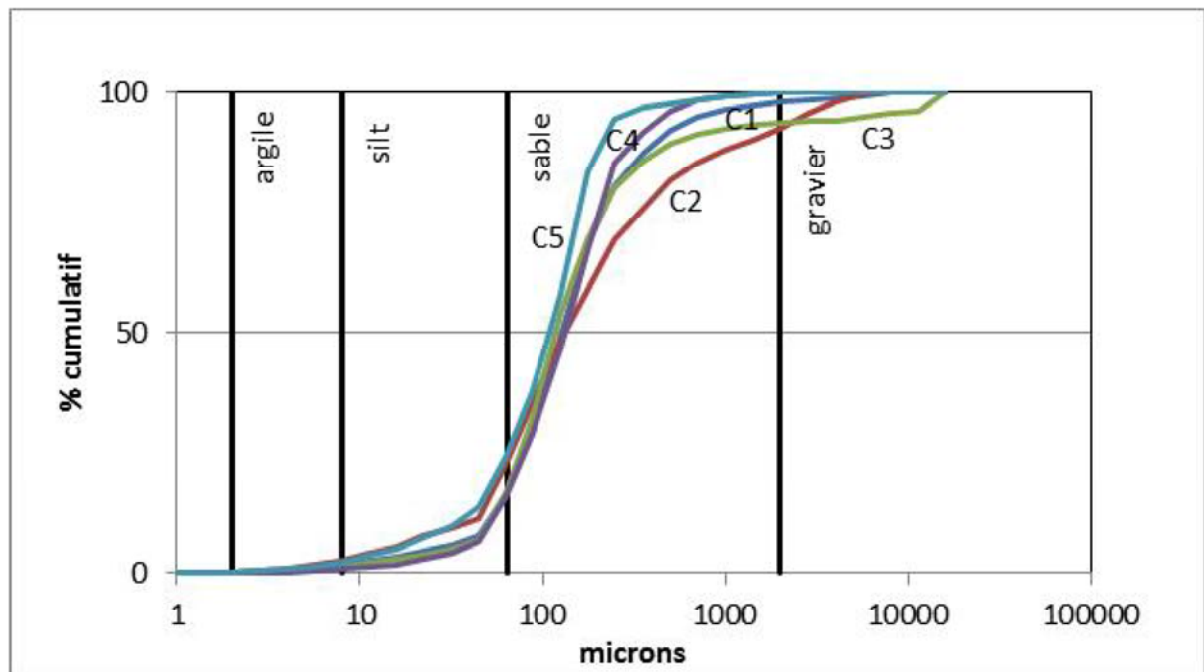


Figure 4 Courbes du pourcentage cumulé des analyses granulométriques de la strate 0-30 cm aux stations de carottage derrière le quai No. 2.

#### 4.2.2 STRATIGRAPHIE ET COMPOSITION DES CAROTTES DE SÉDIMENTS

La carotte C1 a une longueur de 1,5 m (tableau 4). Elle est sous-divisée en cinq unités distinctes, établies principalement selon les critères granulométriques, la densité observée de boulettes de fer ainsi que la couleur. La première unité, la strate 0-30 cm, est d'une couleur brunâtre et se compose principalement de sable moyen (annexe 2). Les strates suivantes, soit la 30-55 cm et la 55-70 cm, sont constituées de sable moyen de couleur noire et elles se distinguent par une densité croissante de boulettes de fer, de 3,5 à 7,5 % (annexe 1; tableau 4). Les boulettes sont absentes à la strate 70-100 cm, qui est composée de sables moyen noirs. Enfin, la strate 100-150 cm est constituée de sable plus grossier et de couleur plus brunâtre (annexe 1).



Tableau 4 Proportion (%) et volume estimé de boulettes de fer contenu pour la carotte C1

STRATE (CM)	PROPORTION SÉDIMENT (%)	PROPORTION BOULETTES (%)	VOLUME DE BOULETTES (CM <sup>3</sup> )
0-30	99,8	0,2	4,7
30-55	96,5	3,5	68,7
55-70	92,5	7,5	88,4
70-100	98,6	1,4	33,0
100-150	100	0	0,0

La carotte C2 est longue de 50 cm et est sous-divisée en trois unités (tableau 5). La proportion de boulettes est très élevée dans toutes les strates, soit entre 57 et 62 %. La seule caractéristique qui distingue la strate 19-37 cm des deux autres unités est la couleur plus brunâtre des sédiments, comparativement aux strates 0-19 et 37-50 qui sont davantage noires (annexe 2).

Tableau 5 Proportion (%) et volume estimé de boulettes de fer contenu pour la carotte C2

STRATE (CM)	PROPORTION SÉDIMENT (%)	PROPORTION BOULETTES (%)	VOLUME DE BOULETTES (CM <sup>3</sup> )
0-19	37,9	62,2	927,0
19-37	38,4	61,6	870,7
37-50	42,2	57,8	589,5

La carotte C3 a une longueur de 1,55 m et est sous-divisée en quatre unités (tableau 6). Pour toutes ces strates, la proportion de boulettes de fer est très faible, avec un pourcentage maximal de 3,5 %. La strate 0-30 cm est constituée de sable moyen de couleur brunâtre. Il est à noter qu'une couche d'environ 1 cm d'épaisseur de sédiment plus fins et brunâtre se trouve à la surface de cette unité (annexe 2). La strate 30-90 cm se distingue surtout de par la couleur noire de ses sédiments et la transition vers l'unité 90-120 est marquée par la présence de quelques boulettes de fer. Pour ce qui est de la strate 120-155 cm, la compaction semble plus importante et les sédiments tendent vers une couleur plus brunâtre.

Tableau 6 Proportion et volume estimé de boulettes de fer contenu pour la carotte C3

STRATE (CM)	PROPORTION SÉDIMENT (%)	PROPORTION BOULETTES (%)	VOLUME DE BOULETTES (CM <sup>3</sup> )
0-30	99,7	0,3	7,3
30-90	98,0	2,0	92,2
90-120	96,5	3,5	83,6
120-155	99,9	0,1	4,0

La carotte C4 a une longueur de 1,3 m et se sous-divise en six unités, qui ont de très faibles proportions de boulettes de fer (tableau 7). Seule la strate 90-110 cm montre une proportion de boulettes de fer relativement élevée de près de 36 %. La première strate (0-25 cm) est formée de sédiments de taille moyenne de couleur beige (annexe 2). Les strates suivantes sont caractérisées par des sables moyens de couleur noire. La différence entre les strates ne dépend que de la densité des boulettes de fer observées (annexe 2).

Tableau 7 Proportion (%) et volume estimé de boulettes de fer contenu pour la carotte C4

STRATE (CM)	PROPORTION SÉDIMENT (%)	PROPORTION BOULETTES (%)	VOLUME DE BOULETTES (CM <sup>3</sup> )
0-25	100,0	0,0	0,0
25-50	99,9	0,1	1,0
50-70	95,3	4,7	73,7
70-90	91,5	8,5	133,2
90-110	64,1	35,9	562,9
110-130	94,8	5,2	81,4

La carotte C5 mesure 1,6 m de longueur et comprend cinq unités différentes (tableau 6). Aucune strate ne contient des proportions notables de boulettes de fer (tableau 8). La strate 0-30 se compose de sable fin à moyen de couleur brunâtre et contient quelques débris organiques. Quant aux strates inférieures, elles se composent de sables moyen plutôt beige et deviennent de plus en plus foncées pour atteindre une couleur noirâtre au niveau 140-160 cm (annexe 2).

Tableau 8 Proportion (%) et volume estimé de boulettes de fer contenu pour la carotte C5

STRATE (CM)	PROPORTION SÉDIMENT (%)	PROPORTION BOULETTES (%)	VOLUME DE BOULETTES (CM <sup>3</sup> )
0-30	100,0	0,0	0,0
30-60	100,0	0,0	0,0
60-90	99,9	0,1	1,2
90-140	100,0	0,0	1,9
140-160	100,0	0,0	0,5

La concentration de boulettes dans la carotte C1 est généralement faible, sauf à des profondeurs comprises entre 30 et 70 cm. Cette faible densité de boulettes de fer dans les sédiments concorde avec les observations réalisées à la caméra benthique pour cette station. Ce secteur est l'ancien site de transbordement de boulettes de fer (avant 1984). Les boulettes sédimentées par le passé ont donc été enfouies sous le sable avec le temps. Plus près de la berge, toujours entre le quai N° 1 et N° 2, la présence de boulettes de fer est plus marquée à la surface du fond marin, comme le montrent les résultats de la caméra benthique (carte 5). La présence de boulettes à la surface tend à démontrer que ces dernières, sédimentées avant 1984, sont difficilement mobilisables par les courants de la dérive littorale, contrairement au sable qui ne parvient pas à se sédimenter à cet endroit plus dynamique.

Les teneurs les plus importantes sont observées sur l'ensemble de la carotte C2, dont la station est située directement sous le convoyeur nord-ouest du quai N° 2. Ce constat est corroboré par les observations réalisées à la caméra benthique (carte 5). La différence de couleurs entre les strates de cette carotte démontre que la sédimentation s'est réalisée en trois épisodes distincts et tend à démontrer que l'accumulation de boulettes s'est effectuée épisodiquement en fonction, probablement, de mauvais fonctionnements passés du convoyeur. La carotte C4 montre également une forte teneur en boulettes dans la strate 90-110 cm. La présence de cette strate enfouie sous le sable peut s'expliquer par un seul déversement accidentel sous le convoyeur sud-est ou encore quelques déversements plus petits durant une même période.

Les teneurs en boulettes de fer sont particulièrement faibles pour les carottes C3 et C5. Dans le cas de la station C3, cette absence de boulettes s'explique soit par le bon fonctionnement et/ou l'utilisation moins fréquente du convoyeur central. Pour ce qui est de la station C5, l'absence de boulettes s'explique surtout en raison de la distance aux installations portuaires (carte 5). L'absence de boulettes à ces stations appuie l'hypothèse que les boulettes de fer ne sont peu ou pas mobilisables par le transport sédimentaire actif dans le secteur.

#### 4.2.3 ESTIMATION DES VOLUMES DE BOULETTES DE FER PAR SECTEUR

Dans le but d'obtenir une appréciation du volume de boulettes de fer pouvant se trouver dans la zone d'étude, celui-ci a été calculé en fonction de zones délimitées selon la répartition des boulettes de fer à la surface du fond marin (carte 5). Un volume de sédiment a ainsi été calculé pour chaque strate de chaque carotte et le volume des boulettes a été calculé en fonction du pourcentage de boulettes présenté aux tableaux 4 à 8 (tableau 9). Compte tenu que les carottes ne donnent qu'une observation en un point donné et que l'étendue des déversements accidentels de boulettes semble plutôt limitée dans l'espace, il est probable que cette méthode surestime passablement la quantité réelle de boulettes présentes. Ces valeurs devraient donc être utilisées uniquement à titre indicatif.

Les résultats montrent que le volume de boulettes dans le premier mètre en moyenne de sédiment est relativement faible et concentré, surtout dans la zone délimitée de la station C2. Il est important de noter qu'à l'exception de la carotte C2, les sédiments contenant un important volume de boulettes se trouvent souvent dans les strates inférieures à 50 cm. Par ailleurs, ces résultats indiquent que les sédiments du secteur contiennent assurément moins de 4 % de boulettes de fer.

### 4.3 SPÉCIATION DU FER

IOC expédie deux produits, soit le concentré de fer et les boulettes de fer qui sont susceptibles de se retrouver dans les sédiments. Selon les informations obtenues auprès d'un représentant de la compagnie IOC, monsieur Viclhaber Wolfgang, lors d'une entrevue téléphonique, le concentré de fer est le minerai broyé qui est composé de magnétite. La formule chimique de ce minéral est  $Fe_3O_4$ .

Tableau 9 Volumes de boulettes estimés en fonction de la profondeur atteinte par les carottages

ZONE	SUPERFICIE (M <sup>2</sup> )	ÉPAISSEUR DE SÉDIMENT (M)*	VOLUME TOTAL DE SÉDIMENT (M <sup>3</sup> )	VOLUME DE BOULETTES (M <sup>3</sup> )
COR-1	14 131	1,50	3 432,0	348,9
COR-2	6 864	0,50	3 432,0	2 087,4
COR-3	13 739	1,55	21 295,5	327,4
COR-4	8 566	1,30	11 135,8	930,0
COR-5	22 822	1,60	36 515,2	10,5
<b>Total</b>	<b>66 122</b>	-	<b>93 575,0</b>	<b>3 704,3</b>

Le fer s'y trouve sous l'état d'oxydation (II) et (III) dans un rapport 1 pour 2. Lorsque le concentré de fer subit un traitement thermique pour fabriquer les boulettes de fer, une réaction exothermique s'en suit et produit l'hématite, un oxyde de fer faiblement magnétique où le fer se trouve sous l'état d'oxydation (III) (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Le pourcentage massique de fer total dans les boulettes est variable, mais est généralement de l'ordre de 65 %. Moins de 4,6 % du pourcentage massique des boulettes est composé d'oxydes de silice et le reste de la masse est attribuable à de multiples composés présents à des pourcentages très faibles comme l'oxyde d'aluminium, de calcium et de magnésium. Il est possible que des sulfures de fer soient présents dans les boulettes de fer sous la forme minérale du pyrite, où le fer se trouve à l'état d'oxydation de (II) (FeS<sub>2</sub>). Le pourcentage massique du soufre dans les boulettes est généralement autour de 0,004 %. Le fer d'origine anthropique présent dans les sédiments est donc susceptible de se trouver sous trois formes décrites dans le tableau 10.

Tableau 10 Description des minerais d'origine anthropiques susceptibles de se retrouver dans les sédiments

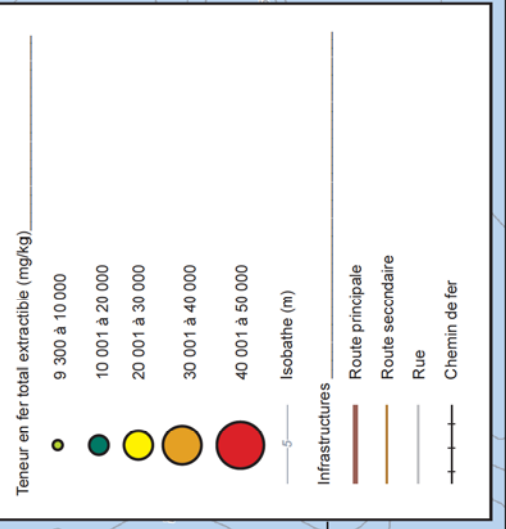
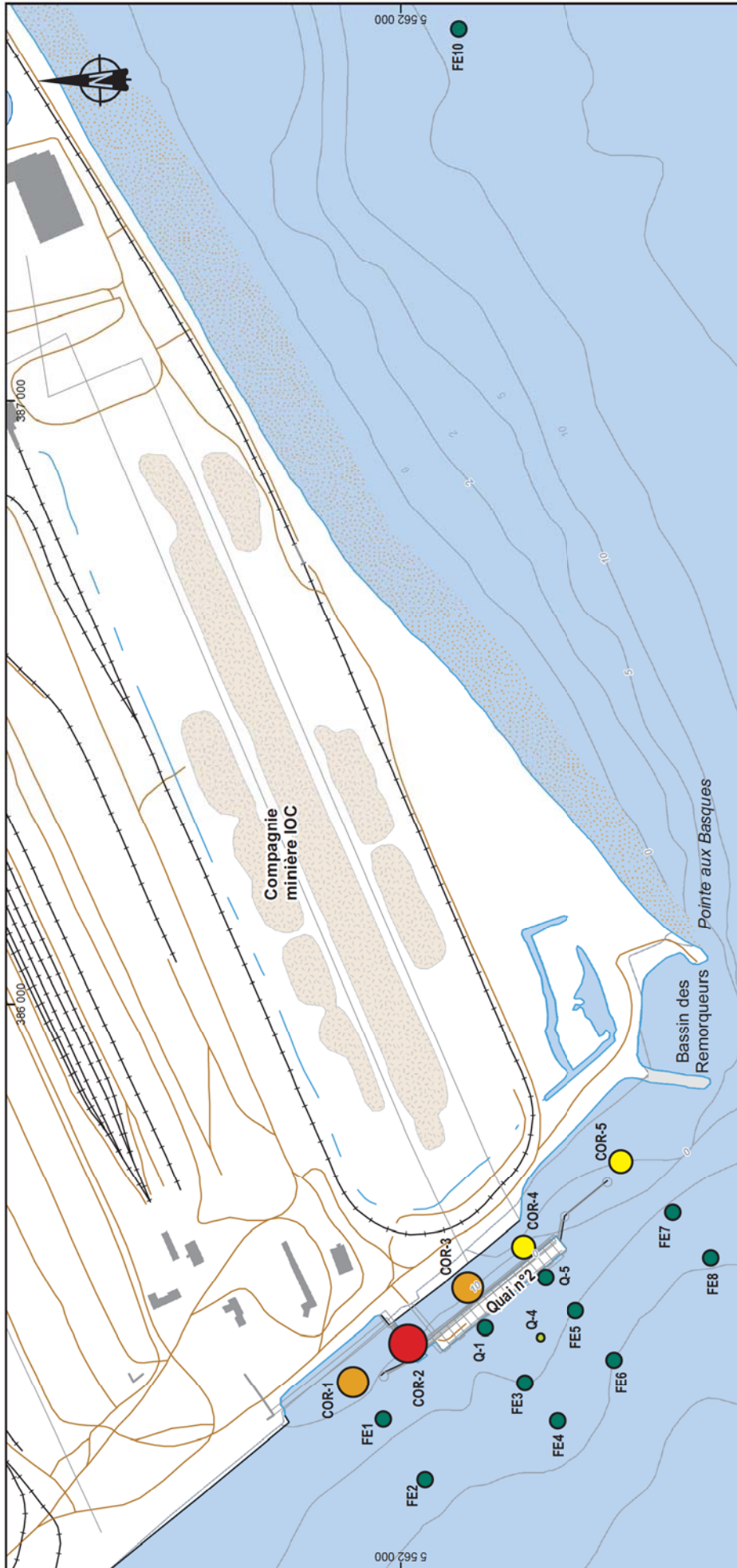
MINERAIS	COULEUR	PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES	FORMULES CHIMIQUES	ÉTAT D'OXYDATION DU FER	MÉTHODE DE QUANTIFICATION
Magnétite	Noir	Magnétique	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	II et III rapport 1 : 2 (ferreux et ferrique)	DRX FRX
Hématite	Gris noir sous forme cristallisée et rouge sous forme de poudre hydratée,	Faiblement magnétique	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	III (ferrique)	DRX FRX
Pyrite	Doré	Non magnétique	FeS <sub>2</sub>	II (ferreux)	XPS

#### 4.3.1 SPÉCIATION DU FER SOUS FORME SOLIDE DANS LES SÉDIMENTS

Les résultats des analyses chimiques pour la caractérisation des sédiments montrent que les concentrations en fer total extractibles varient de 9 300 à 45 000 mg/kg dans les sédiments (tableau 11; carte 6). La station d'échantillonnage de référence (FE10) présente une concentration de 11 000 mg/kg de fer total extractible dans les sédiments (tableau 11). Les concentrations les plus élevées sont observées derrière le quai N° 2 (COR-1 à 5). Quatre de ces stations (COR-1, 3, 4 et 5) dépassent le critère de 20 000 mg/kg, considéré par MacDonald *et al.*, 2014 comme la teneur minimale de fer pouvant être retrouvée dans le sédiment et qui sera tolérée par la majorité des organismes benthiques. Seule la station COR-2 montre une teneur supérieure à 45 000 mg/kg, ce qui est au-delà du seuil à effets sévères, considéré par MacDonald *et al.*, 2014. (tableau 11; carte 6). Les autres valeurs observées sont toutes ou légèrement au-dessus de la valeur observée en conditions naturelles (station FE10) (tableau 11; carte 6).

Tableau 11 Concentration du fer dans les sédiments.

STATION D'ÉCHANTILLONNAGE	PARAMÈTRES ANALYSÉS		
	FER TOTAL EXTRACTIBLE	FER FERRIQUE (FE <sup>3+</sup> )	FER FERREUX (FE <sup>2+</sup> )
	MG/L mg/kg	MG/L % MASSIQUE	MG/L % MASSIQUE
Q-1	16 000	7,4	0,7
Q-2	9900	1,3	0,3
Q-4	9300	2,9	0,3
Q-5	<b>20 000</b>	5,6	0,6
COR-1	<b>34 000</b>	18,3	1,4
COR-2	<b>45 000</b>	<b>40,6</b>	<b>3,9</b>
COR-3	<b>35 000</b>	16,4	1,6
COR-4	<b>30 000</b>	17,3	1,8
COR-5	<b>24 000</b>	4,9	0,5
FE1	<b>20 000</b>	3,8	0,4
FE2	13 000	1,0	0,2
FE3	13 000	0,6	0,2
FE4	13 000	1,1	0,2
FE5	13 000	1,0	0,2
FE6	12 000	1,2	0,3
FE7	14 000	1,2	0,3
FE8	11 000	0,7	0,2
FE10 (Référence)	11 000	0,9	0,2



STATIONS	FER FERRIQUE (FE <sup>3+</sup> )		FER FERREUX (FE <sup>2+</sup> )	
	MG/L	% MASSIQUE	MG/L	% MASSIQUE
Q-1	7.4%			0.7%
Q-2	1.3%			0.3%
Q-4	2.9%			0.3%
Q-5	5.6%			0.6%
COR-1	18.3%			1.4%
COR-2	<b>40.6%</b>			<b>3.9%</b>
COR-3	16.4%			1.6%
COR-4	17.3%			1.8%
COR-5	4.9%			0.5%
FE1	3.8%			0.4%
FE2	1.0%			0.2%
FE3	0.6%			0.2%
FE4	1.1%			0.2%
FE5	1.0%			0.2%
FE6	1.2%			0.3%
FE7	1.2%			0.3%
FE8	0.7%			0.2%
FE10 (Référence)	0.9%			0.2%

Caractérisation du concentré et des boulettes de fer près des installations portuaires à Sept-Îles

**Teneurs fer total et pourcentage de fer ferrique et de fer ferreux**

Sources :

Base : BDTO, 1 : 20 000, feuillet 22.J-02-200-0201, MRNF Québec, 2010

BNDT, 1 : 250 000, Ressources naturelles Canada, 2009

Cartographie : WSP, 2014

Fichier : 141-20631-00\_RT2\_C6\_teneurFer\_141209.mxd

0 100 200 300 m

MTM, NAD83, fuseau 6

**Carte 6**

**Décembre 2014**

**WSP**

L'hématite est présent en proportion entre 0,5 et 74 % de la masse des échantillons (tableau 12). La magnétite compose également une fraction des échantillons de sédiment à un pourcentage variant de 0,8 à 17,5 %. Enfin, la pyrite n'a pas été détectée dans aucun échantillon. Les teneurs en autres minéraux des échantillons sont présentées à l'annexe 6.

Tableau 12 Minerais présents dans les sédiments

STATION D'ÉCHANTILLONNAGE	PARAMÈTRES ANALYSÉS		
	HÉMATITE	MAGNÉTITE	PYRITE
UNITÉ	% MASSIQUE	% MASSIQUE	% MASSIQUE
Q-1	13,3	3,3	
Q-3	1,6	1,3	
Q-4	5,0	1,5	
Q-5	10,1	2,5	
Q-15	3,4	1,2	
COR-1	34,8	6,4	
COR-2	73,9	17,5	0
COR-3	29,9	7,1	
COR-4	31,1	7,9	
COR-5	8,7	2,4	
FE1	6,5	2,0	
FE2	1,4	0,9	0
FE3	0,5	0,8	
FE4	1,4	1,1	
FE5	1,4	1,0	
FE6	1,5	1,2	
FE7	1,6	1,2	
FE8	0,6	1,0	
FE10 (Référence)	1,0	1,0	0

L'échantillon COR-2 est composé en grande partie de minerais du fer, soit 73,9 % d'hématite et 17,5 % de magnétite. Moins de 9 % de l'échantillon correspond à d'autres minéraux. Les mêmes minéraux sont observés dans de moins grandes proportions aux stations C1, C3, C4 et C5. Ces stations sont localisées dans ce qui semble correspondre à la zone de déversement des minerais de fer, car on y retrouve des teneurs en hématite et en magnétite significativement plus élevées qu'aux autres stations.

La forte teneur en hématite par rapport à la magnétite peut être expliquée de deux façons. Dans l'échantillon prélevé à la station COR-2, une forte teneur en boulettes de fer a été trouvée (entre 57 et 62 %). Malgré que les boulettes aient été retirées des sédiments pour leurs analyses par diffraction des rayons-X (DRX), fluorescence des rayons-X (FRX) et par spectrométrie photoélectronique X (XPS), une forte teneur en hématite demeure dans les sédiments. Ceci s'explique par le fait que la manutention des boulettes de fer est en fait un mélange de sables de fer et de boulettes,

probablement issus de la dégradation des boulettes de fer au moment du transport, créant ainsi des particules plus fines d'hématite. Une autre explication pourrait être la transformation de la magnétite en hématite dans les sédiments via une oxydation du fer ferreux en fer ferrique (Santana, 2001). En effet, selon les résultats du tableau 13, le milieu serait assez oxydant (187 mV) pour oxyder la magnétite en hématite, la forme privilégiée du fer aux conditions environnantes selon le diagramme de Pourbaix (>-200 mV)

Les résultats des analyses chimiques pour la caractérisation des sédiments montrent que le fer se trouve principalement sous la forme ferrique dans l'hématite. Le pourcentage massique d'ions ferriques emprisonnés dans l'hématite est sous forme d'oxyde ferrique. Les stations COR-1, COR-2, COR-3 et COR-4 présentent des pourcentages massiques de fer variant de 18 à 40 % de la masse de sédiment sec, ce qui est largement supérieure à la teneur qui a été trouvée à la station de référence 0,9 % (tableau 11). Une conclusion similaire est tirée des pourcentages massiques de fer ferreux provenant de la magnétite et variant de 1,4 % à 1,8 % pour les stations COR-1, COR-2, COR-3 et COR-4, tandis que la teneur en fer ferreux à la station de référence est de 0,2 % (tableau 11).

#### 4.3.2 SPÉCIATION DU FER SOUS FORME IONIQUE SOLUBLE DANS L'EAU À LA SURFACE DES SÉDIMENTS

Le fer est resté principalement non détecté dans l'eau à la surface des sédiments (tableau 14) malgré que ces derniers contenaient jusqu'à 40,6 % d'oxyde de fer sous l'état d'oxydation (III) par rapport à la masse sèche du sédiment (station COR-2). Ainsi, aucun relargage d'ions ferreux et ferriques n'a été détecté même en présence de teneurs extrêmement élevées en hématite (74 %) dans les sédiments.

Les paramètres physico-chimiques de l'eau (tableau 13) montrent que la quantité d'oxygène dissous, le potentiel d'oxydo-réduction ainsi que la température sont similaires d'une station à l'autre. Cependant, le pH varie grandement entre 3,90 et 9,82, ce qui pourrait être attribuable à un mauvais fonctionnement de la sonde pendant la première campagne de terrain : le bris de la sonde a été confirmé. Autrement, les mesures de pH de la deuxième campagne de terrain montrent très peu de variabilité d'une station à l'autre, tant à marée montante qu'à marée baissante. Les résultats démontrent donc que la surface des sédiments est un milieu aérobique puisque la concentration d'oxygène dissous est en moyenne de 11,01 mg/L. Ce milieu est également légèrement oxydant, puisque le potentiel y est en moyenne de 180 mV.



Tableau 13 Paramètres physiques de l'eau de mer aux stations de mesure

STATION	DATE	HEURE	PHASE DE LA MARÉE	OXYGÈNE DISSOUS (MG/L)	POTENTIEL D'OXYDO-RÉDUCTION (MV)	PH	TEMPÉRATURE (°C)
Q-1	01-09-2014	15 :00	Flot	11,37	111,00	9,82	10,69
Q-3	01-09-2014	14 :30	Flot	10,71	174,40	5,00	11,75
Q-4	01-09-2014	17 :30	Flot	10,88	246,00	3,90	12,20
Q-5	01-09-2014	18 :00	Flot	11,08	190,00	8,86	10,65
COR-1	07-10-2014	17:20	Jusant	5.90	193.20	7.84	6.70
COR-2	07-10-2014	16:10	Jusant	6.08	202.30	7.83	5.40
COR-3	07-10-2014	15:00	Jusant	5.97	200.30	7.82	6.45
COR-4	07-10-2014	14:00	Jusant	6.05	197.50	7.82	5.90
COR-5	07-10-2014	12:00	Flot	6.35	225.60	7.76	5.30
FE1	08-10-2014	12:50	Flot	1.86	221.60	7.76	5.20
FE3	08-10-2014	11:15	Flot	2.07	185.20	7.76	5.10
FE4	08-10-2014	11:40	Flot	1.98	195.70	7.75	5.10
FE5	08-10-2014	10:05	Flot	2.46	154.40	7.75	5.40
FE6	08-10-2014	10:35	Flot	2.31	143.70	7.75	5.00
FE7	08-10-2014	08:45	Flot	3.46	152.90	7.74	5.40
FE8	08-10-2014	09:20	Flot	2.70	145.90	7.75	5.10
FE10	08-10-2014	08:00	Jusant	5.66	203.40	7.70	4.89

Tableau 14 Concentration du fer dans l'eau

STATION D'ÉCHANTILLONNAGE	TYPE D'ÉCHANTILLON	PARAMÈTRES ANALYSÉS		
		Fer total extractible	Fer ferrique (Fe <sup>3+</sup> )	Fer ferreux (Fe <sup>2+</sup> )
unité	Eau sédiments	mg/L MG/KG	mg/L % massique	mg/L % massique
Q-1	eau	<0,1	<0,1	0,06
Q-3	eau	<0,1	<0,1	0,06
Q-4	eau	<0,1	<0,1	<0,05
Q-5	eau	<0,1	<0,1	<0,05
COR-1	eau	<0,3	<0,3	<0,05
COR-2	eau	<0,3	<0,3	<0,05
COR-3	eau	<0,3	<0,3	<0,05
COR-4	eau	<0,3	<0,3	<0,05
COR-5	eau	<0,3	<0,3	<0,05
FE1	eau	<0,3	<0,3	<0,05
FE2	eau	<0,1	<0,1	<0,05
FE3	eau	<0,3	<0,3	<0,05
FE4	eau	<0,1	<0,1	<0,05
FE5	eau	<0,3	<0,3	0,07
FE6	eau	<0,3	<0,3	<0,05
FE7	eau	<0,3	<0,3	<0,05
FE8	eau	<0,3	<0,3	<0,05
FE10	eau	<0,3	<0,3	<0,05

Le pH de l'eau à la surface des sédiments est similaire d'un point d'une station à l'autre et est en moyenne de 7,77 tandis que le potentiel d'oxydo-réduction est en moyenne de 0. Il s'agit donc d'un milieu neutre, légèrement oxydant. La forme du fer qui est privilégiée dans ces conditions selon le diagramme de Pourbaix est l'hématite, où le fer est à l'état d'oxydation (III). Ainsi, le milieu aquatique à la surface des sédiments n'est pas assez acide, ni assez réducteur pour induire le relargage du fer ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) soit la forme la plus toxique du fer, ni même la forme ferrique ( $\text{Fe}^{3+}$ ). Cependant, il est important de noter que les conditions reliées à l'eau à la surface des sédiments peuvent différer des conditions aqueuses au sein même des sédiments. L'eau contenue au cœur des sédiments est connue pour être plus réductrice (potentiel d'oxydo-réduction faible) dans les sédiments profonds non bioturbés. Pour un même pH, si le potentiel d'oxydoréduction du milieu diminue en dessous de -100 mV, l'ion de fer ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) sera la forme du fer privilégiée. Ainsi, dans de telles conditions, il est possible que les sédiments relarguent du fer dissous dans l'eau interstitielle sous sa forme la plus toxique, ce qui pourrait alors affecter la faune endobenthique. Cependant, il est peu probable que la faune endobenthique soit affectée puisque cette dernière se situe habituellement dans un horizon superficiel de sédiment typiquement assez oxygéné et oxydant pour assurer l'oxydation et la précipitation des ions ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) sous forme d'hématite.

## 5. DISCUSSION ET CONCLUSION

### 5.1 MAGNÉTOMÉTRIE ET CAMÉRA SOUS-MARINE

Les résultats cartographiques des relevés du champ magnétique confirment, pour cette portion de la baie des Sept Îles, la forte teneur « naturelle » en fer, reconnue dans les sables de la région (Hein *et al.*, 1993; Normandeau, 2011). De plus, les valeurs les plus élevées enregistrées sur le site d'étude montrent la présence d'affleurements rocheux (confirmée par la présence d'un îlot affleurant à la surface de l'eau) dont la composition minéralogique est dominée, entre autres, par le fer, comme Normandeau (2011) l'a observé dans son secteur d'étude.

De leur côté, les faibles valeurs du champ magnétique ambiant directement au-devant du quai N° 2. suggèrent à première vue que les concentrations de fer seraient plus basses à ces endroits. L'explication la plus plausible serait que les mouvements des bateaux, entre autres, les puissants moteurs propulsant les hélices des remorqueurs, évacuent précisément à ces endroits les sédiments les plus fins. Ces sédiments évacués peuvent être soit du sable naturel provenant de la dérive littorale, vers le nord-ouest et/ou du concentré de fer produit par IOC. La caméra sous-marine tend à confirmer qu'en certains endroits le long des transects au-devant du quai N° 2, les sédiments sont effectivement plus graveleux, avec la présence de galets. Cette hypothèse que les bateaux remanient les sédiments au pied des quais est d'autant plus valable dans la mesure que la même diminution du champ magnétique ambiant est observée en avant du quai N° 1 et en avant du quai des Pétroliers.

### 5.2 LOCALISATION ET QUANTIFICATION DES VOLUMES DE BOULETTES DE FER

Aux quais d'IOC, la proportion de boulettes manutentionnées annuellement est 13,5 millions de tonnes (Mt) alors que le concentré n'est que de 4 Mt: Le volume de boulettes tombées à l'eau lors des opérations passées de transbordement serait de l'ordre de 3 000 à 4 000 m<sup>3</sup> pour le premier 1-1,5 m de sédiment et pour une superficie totale de près de 7 ha. Les plus importantes concentrations se trouvent surtout derrière le quai N° 2, et plus particulièrement au niveau du convoyeur nord-ouest, ainsi qu'au-devant de l'ancien convoyeur démantelé. Suivant l'analyse stratigraphique des carottes, la forte proportion de boulettes manutentionnées versus le concentré de fer, ainsi que les fortes teneurs en hématite des sédiments composant la matrice des boulettes de fer, portent à croire que les boulettes chargées sur les navires sont mélangées à de fortes proportions de sable de fer.

### 5.3 SPÉCIATION DU FER

Les stations COR-1, COR-2, COR-3 et COR-4 présentent des teneurs en fer total extractible, en hématite et en magnétite significativement supérieures aux teneurs de la station de référence FE10, ce qui illustre la présence d'une contamination des sédiments derrière le quai N° 2. Toutefois, le fer s'y trouve principalement sous forme d'un oxyde non biodisponible pour les organismes marins, soit l'hématite. Sous cette forme, le fer se retrouve à l'état d'oxydation de (III), soit sous sa forme ferrique

En contrepartie, les résultats démontrent qu'aucun fer n'a été détecté dans l'eau à la surface des sédiments sauf au niveau des stations Q1, Q3 et FE5 où moins de 0,08 mg/L d'ions ferreux ont été détectés. Cette valeur est largement inférieure au critère de 0,35 mg/L pour le fer total dissous dans les eaux douces (estimé être majoritairement sous forme ferreuse) du ministère de l'Environnement de la province de la Colombie-Britannique (MEPCB, 2008) ainsi que du critère de qualité de l'eau de surface du Québec pour le fer total, qui est de 0,30 mg/L (MDDELCC, 2014),

Le pH et le potentiel d'oxydoréduction de l'eau à la surface des sédiments sont similaires d'une station à l'autre et sont en moyenne respectivement de 7,77 et 0,179V, ce qui devrait favoriser la présence de fer sous la forme d'oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) à l'état d'oxydation (III), soit l'hématite. Par contre, le milieu aquatique à la surface des sédiments n'est pas assez acide, ni assez réducteur, pour induire le relargage du fer ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) soit la forme la plus toxique du fer.

Une certaine limitation de cette étude provient du fait que le potentiel d'oxydoréduction et le pH du milieu ont dû être mesurés à la surface des sédiments, ce qui n'est possiblement pas représentatif de l'eau interstitielle au cœur des sédiments. Par contre, il n'est pas possible de déterminer simplement et avec précision les paramètres physico-chimiques au sein d'un sédiment de façon in situ en présence d'une colonne d'eau importante. Néanmoins, l'ensemble des résultats obtenus par cette étude sont jugés suffisamment fiables pour tirer des conclusions.

Les conclusions de cette étude démontrent qu'à une station en particulier (COR-2), les sédiments contiennent une quantité très élevée de fer extractible, de minerais hématite et de boulettes de fer composées d'hématite derrière le quai N° 2. Cependant, leurs propriétés physico-chimiques telles qu'elles ont été mesurées lors de cette étude ne les rendent pas sujets à libérer le fer sous forme ferreuse. En effet, pratiquement aucun fer dissous dans l'eau n'a été détecté à la surface des sédiments. En fait, pour pouvoir être relargués et devenir biodisponibles, il faudrait que les ions toxiques de fer soient présents dans un milieu plus anoxique et réducteur. Aussi, près des installations portuaires d'IOC, il est très peu probable que la faune endobenthique puisse être affectée puisque cette dernière se situe dans un horizon superficiel de sédiment typiquement assez oxygéné et oxydant pour assurer l'oxydation et la précipitation des ions ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) sous forme d'hématite. De plus, les observations effectuées par le passé et au cours de cette étude sur cette faune démontrent que celle-ci est abondante et diversifiée.

Enfin, une gestion des boulettes et du concentré de fer par leur récupération pour des motifs écotoxicologiques ne s'avère donc pas justifiée. Si leur récupération devait néanmoins être une option à envisager, une analyse avantages-coûts des méthodes de récupération et des diverses options de gestion devrait alors être effectuée. Ses résultats pourraient alors être discutés auprès des autorités avant toute décision. Par contre, il va sans dire que la Compagnie minière IOC s'engage, dans l'intérêt de l'environnement ainsi que ses propres intérêts, à poursuivre ses efforts continuels de réduction, voire élimination, de ses pertes à l'eau de ses produits d'exportation.



# Annexe 1

**PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE :  
CARACTÉRISATION DES BOULETTES DE FER DANS  
LES SÉDIMENTS DES INFRASTRUCTURES  
PORTUAIRES DE LA COMPAGNIE MINIÈRE IOC  
(SEPT-ÎLES)TITRE**





Compagnie minière IOC

# PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE 2014

CARACTÉRISATION DES BOULETTES  
DE FER DANS LES SÉDIMENTS DES  
INFRASTRUCTURES PORTUAIRES DE  
LA COMPAGNIE MINIÈRE IOC  
(SEPT-ÎLES)



# PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE 2014

CARACTÉRISATION DES BOULETTES  
DE FER DANS LES SÉDIMENTS DES  
INFRASTRUCTURES PORTUAIRES  
DE LA COMPAGNIE MINIÈRE IOC  
(SEPT-ÎLES)

**Compagnie minière IOC**

Projet n° : 141-20631-00  
Date : AOÛT 2014

—  
**WSP Canada Inc.**  
5355, boul. des Gradins  
Québec (Québec) G2J 1C8

Téléphone : 418-623-2254  
Télécopieur : 418-623-1857  
[www.wspgroup.com](http://www.wspgroup.com)





---


# SIGNATURES

Préparé par



---

Julie Simard  
Géomorphologue, Ph.D.



---

Mélanie Lévesque,  
Biologiste  
M. Sc. Océanographie

Révisé par

---

Mario Heppell, Biol.-amén., M. ATDR.  
Directeur de projet



---

## ÉQUIPE DE RÉALISATION

### **Compagnie minière IOC**

Responsable de projet	Pascale Gauthier, Coordinatrice Environnement
Conseillère	Anne-Marie Proulx, Conseillère Environnement

### **WSP Canada Inc. (WSP)**

Directeur de projet	Mario Heppell, Biologiste-aménagiste, M. ATDR.
Collaborateur	Julie Simard, Géomorphologue, Ph. D.
Collaborateur	Mélanie Lévesque, Océanographe, M. Sc.
Cartographie	Mélissa Gaudreault
Traitement de texte et édition	Linette Poulin

---

### **Référence à citer :**

WSP. 2014. *Caractérisation des boulettes de fer dans les sédiments des infrastructures portuaires de la compagnie minière IOC (Sept-Iles). Protocole d'échantillonnage 2014.* Rapport de WSP à Compagnie minière IOC. 15 p.





# TABLE DES MATIÈRES

ÉQUIPE DE RÉALISATION .....	I
TABLEAUX.....	V
CARTES .....	V
<b>1. CONTEXTE ET OBJECTIFS .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ZONE D'ÉTUDE.....</b>	<b>3</b>
<b>3. MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>5</b>
3.1 CARACTÉRISATION DES BOULETTES DE FER .....	7
3.2 CARACTÉRISATION DES COMMUNAUTÉS BENTHIQUES.....	10
<b>4. CONCLUSION .....</b>	<b>13</b>
<b>5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>15</b>



---

## TABLEAUX

Tableau 1	Concentrations de fer retrouvées dans les sédiments présents près des installations portuaires de la compagnie minière IOC (2003, 2010). .....	6
Tableau 2	Normes et critères de référence cités dans le document de MacDonald et al., 2014.....	7

---

## CARTES

Carte 1	Zone d'étude.....	4
Carte 2	Transects à réaliser pour le sondage au magnétomètre.....	9



# 1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Depuis plus de 30 ans, la compagnie minière IOC doit effectuer régulièrement un dragage d'entretien à ses installations portuaires de Sept-Îles afin d'y assurer les profondeurs minimales requises pour maintenir des opérations de navigation et de transbordement sécuritaires. En 2004, la compagnie a obtenu un décret gouvernemental autorisant les travaux de dragage pour une période de 10 ans. Or, cet automne, le dernier dragage d'entretien de ce programme est prévu au niveau du quai n°2. Aussi, la compagnie a entamé en 2011 la production d'une nouvelle étude d'impact sur l'environnement dans le but de faire reconduire pour une 5<sup>e</sup> fois son autorisation d'application de son programme d'entretien. Déposée en 2013 auprès du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), cette étude devrait faire l'objet à court terme de l'émission de son avis de recevabilité, notamment suite à l'engagement de la part de la compagnie de procéder à une caractérisation détaillée de la présence de résidus de fer, dont de multiples boulettes, dans les sédiments de ses aires de transbordement à ses installations portuaires (quais n<sup>os</sup> 1 et 2). Il est requis que celle-ci soit réalisée avant la prise de décision gouvernementale concernant la délivrance d'un nouveau décret décennal de dragage (2015-2025). Cette caractérisation vise spécifiquement à documenter les effets potentiels du fer dans le milieu marin, notamment sur les organismes du fond marin (benthos). Les résultats de cette caractérisation permettront, le cas échéant, d'évaluer judicieusement les diverses possibilités de gestion de ces matériaux, soit par le maintien du déversement au site de rejet, par le retrait des boulettes de fer pour les réintroduire dans le procédé de l'usine, par le retrait des boulettes pour une disposition dans un lieu autorisé pour ces matières résiduelles ou encore toute autre option appropriée.

Dans l'optique de répondre à ces suppléments d'information requis par le MDDELCC, la compagnie minière IOC a mandaté WSP Canada Inc. (WSP) afin de proposer un protocole d'échantillonnage en ce sens.

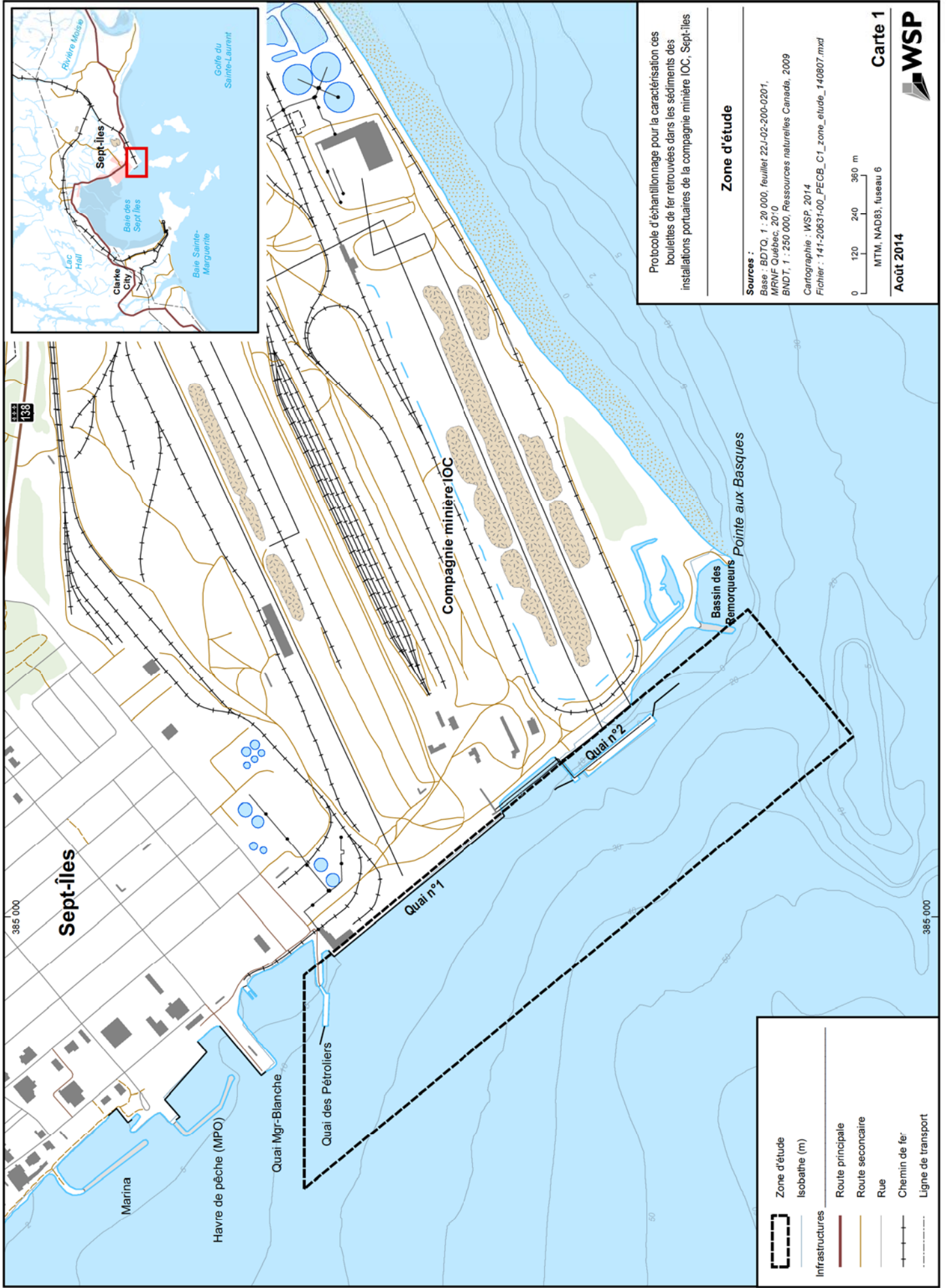
Outre la mise en contexte, ce document présente la localisation de la zone d'étude, de même que la description des méthodologies préconisées pour :

- délimiter la superficie et l'épaisseur de la couche sédimentaire où des boulettes de fer sont retrouvées dans la zone d'étude concernée;
- évaluer si la présence du fer dans le milieu marin peut avoir une influence négative significative sur les communautés benthiques présentes dans cette même zone.



## 2. ZONE D'ÉTUDE

Les deux quais utilisés pour les activités portuaires de transbordement de la Compagnie minière IOC se situent dans le secteur est de la baie des Sept Îles. À cet endroit, la bathymétrie au-devant des quais de IOC forme une pente relativement douce et cette dernière prend la forme d'un talus de plus forte pente à partir de l'isobathe de 15 m, et ce, jusqu'à la profondeur de 40 m (carte 1). Le transport littoral des sédiments s'effectue du sud-est vers le nord-ouest, soit de la pointe aux Basques vers la ville de Sept-Îles, et est interrompu par la présence d'épis, tel le quai des Pétroliers. Cette structure anthropique influence la dynamique sédimentaire au-devant des installations portuaires d'IOC. Pour cette raison, la zone d'étude sera comprise entre le quai des Pétroliers et le brise-lames ouest du bassin des Remorqueurs, puisque cette zone est la plus susceptible de contenir les résidus de fer issus des opérations de transbordement. En effet, les résidus, qui peuvent atteindre environ 10 à 20 mm dans le cas des boulettes, peuvent s'étaler sur le fond marin du secteur au gré des conditions hydrodynamiques; leur étalement étant tributaire de la gravité et de la force des courants au moment des activités de transbordement. Néanmoins, on peut s'attendre à ce que les concentrations les plus élevées soient retrouvées à proximité des quais, dans l'axe des convoyeurs. Afin de bien documenter la situation, la zone d'étude s'étendra jusqu'au pied du talus côtier, soit jusqu'à 500 m de la côte. La zone d'étude couvrira donc une superficie totale de 1 800 x 500 m, soit 90 ha (carte 1). Tel qu'il sera expliqué plus loin, une telle étendue est aussi requise pour obtenir des zones contrastées présentant des concentrations de fer variées.



Protocole d'échantillonnage pour la caractérisation des bouelettes de fer retrouvées dans les sédiments des installations portuaires de la compagnie minière IOC, Sept-Îles

**Zone d'étude**

Sources :  
 Base : BDTO, 1 : 20 000, feuillet 22-J-02-200-0201,  
 MRNF Québec, 2010  
 BNDT, 1 : 250 000, Ressources naturelles Canada, 2009  
 Cartographie : WSP, 2014  
 Fichier : 141-20631-00\_FECB\_C1\_zone\_etude\_140807.mxd

0 120 240 360 m  
 MTM, NAD83, fuseau 6

**Carte 1**  
**Août 2014**

**WSP**

**Zone d'étude**

**Isobathe (m)**

**Infrastructures**

- Route principale
- Route secondaire
- Rue
- Chemin de fer
- Ligne de transport



### 3. MÉTHODOLOGIE

Le sédiment est un élément essentiel à la vie des organismes benthiques puisqu'il représente leur habitat à un cycle ou l'autre de leur vie. L'endofaune comme l'épifaune benthique contribuent à plusieurs processus marins importants, dont la régulation des cycles de l'azote et du carbone, et la distribution des polluants présents dans le milieu (Snelgrove, 1998). Étant donné leur contact direct avec le sédiment, les organismes benthiques sont vulnérables aux contaminants retrouvés dans le milieu. Les effets sur ces organismes incluent tant la toxicité aigüe que chronique et peut atteindre un individu, une population, voire même une communauté.

À titre de contaminant, une grande variété de métaux, sous différentes formes, peut être retrouvée dans les sédiments aquatiques et marins. Certaines concentrations sont présentes naturellement dans le milieu alors que d'autres peuvent provenir de la présence d'activités anthropiques. La propriété des métaux présents dans le sédiment dépendra majoritairement de la forme chimique sous laquelle ils se retrouvent (Manahan, 1991). Les métaux peuvent se bioaccumuler dans les organismes benthiques. Les organes et tissus des organismes touchés ont des affinités différentes selon les métaux retrouvés dans le milieu. Notons que ces métaux peuvent être absorbés par certains organismes sous une forme inoffensive. En fait, les conditions environnementales du milieu auront un rôle à jouer sur la forme que prendront les métaux et, conséquemment, auront un effet sur le phénomène de bioaccumulation.

Les opérations de transbordement du minerai de fer pour de la compagnie minière IOC ont engendré, au fil du temps, une certaine accumulation de matière première (boulettes de fer) et de résidus ferreux sur le fond marin. Ces boulettes seraient majoritairement présentes au-devant du quai n° 2, là où la plupart des activités de transbordement s'effectuent. Il convient de mentionner ici que comme les boulettes constituent en effet la matière première produite par l'usine de la compagnie et que celle-ci est destinée à l'exportation, tout déversement accidentel constitue une perte à éviter dans le processus global de production et de transbordement. Aussi, il y a déjà plusieurs années que la compagnie procède à des exercices d'optimisation afin d'éliminer l'occurrence de telles pertes. Il s'avère ainsi probable que les boulettes éventuellement relevées proviennent d'opérations passées de transbordement.

Les échantillons récoltés par le passé, directement dans la zone de transbordement (quai n° 2), indiquent des concentrations moyennes en fer de 24 750 mg/kg et 20 000 mg/kg pour respectivement 2003 et 2010. Ces concentrations en fer diminuent en s'éloignant vers le large ainsi qu'en direction est ( $\leq 15\ 000$  mg/kg) (tableau 1).

Tableau 1 Concentrations de fer retrouvées dans les sédiments présents près des installations portuaires de la compagnie minière IOC (2003, 2010).

ANNÉE	ZONE D'ÉTUDE	STATION	CONCENTRATION EN FER (mg/kg)	CONCENTRATION MOYENNE EN FER (mg/kg)
2003	Quai no 2	1	10 000	24 750
		2	13 000	
		3	28 000	
		4	48 000	
	Bassin des remorqueurs	6	15 000	11 350
		7	13 000	
		8	8 400	
		9	12 000	
		10	12 000	
		11	7 700	
		2010	Quai no 2	
A1	13 000			
A3	27 000			
A4	16 000			

Pour le moment, il n'existe au Québec aucun critère en regard des seuils de concentration en fer acceptables en milieu dulcicole ou marin sur la faune présente. Dans cette optique, un recueil compilant les différents standards concernant les critères sur la qualité de l'eau et des sédiments en milieu aquatique, estuarien et marin du monde entier a récemment été rédigé pour Environnement Canada (MacDonald et al., 2014.). Sur les 17 critères proposés concernant le fer, il n'y en a que deux qui seraient applicables en milieu marin, et ceux-ci proviendraient de la même étude effectuée dans l'état de New-York (NYSDEC, 1994). D'après ce document, une valeur de 20 000 mg/kg est suggérée à titre de seuil minimal avec effet alors qu'une valeur de 40 000 mg/kg représenterait un seuil à effet sévère (tableau 2). La valeur seuil de 20 000 mg /kg représente en fait la teneur minimale de fer pouvant être retrouvée dans le sédiment et qui sera toléré par la majorité des organismes benthiques, mais pouvant être toxique pour seulement quelques espèces (NYSDEC, 1994). En comparant les concentrations de fer obtenues à proximité du quai n° 2 avec ces valeurs seuils, quatre stations sur huit semblent enregistrer des concentrations en fer excédant le seuil à effet minimal et l'une d'entre elles surpasserait même le seuil à effets sévères, ce qui justifierait en soi la réalisation de la caractérisation demandée par le MDDELCC. Par contre, il convient de souligner que les objectifs des activités antérieures d'échantillonnage, dont les résultats sont présentés ici, n'étaient pas spécifiquement de documenter les effets du fer et il serait donc hasardeux d'en tirer de réelles conclusions.

Il est néanmoins possible que les concentrations en fer retrouvées dans le sédiment à proximité des installations portuaires de la compagnie minière IOC puissent avoir un effet sur le milieu et la faune présente.

Tableau 2 Normes et critères de référence cités dans le document de MacDonald et al., 2014

CONCENTRATION SEUIL POUR LE FER (mg/kg)	CRITÈRE
20 000	Seuil à effet minimal
40 000	Seuil à effet sévère

Aussi, tel que mentionné dans plusieurs articles portant sur le sujet, des informations supplémentaires s'avèrent nécessaires afin de déterminer s'il existe un risque réel pour l'environnement marin et, le cas échéant, le mode de gestion adéquat de ces boulettes et autres résidus ferreux. Pour cela, il est *a priori* primordial de quantifier la distribution du paramètre concerné, en occurrence le fer. Pour ce faire, il est proposé de caractériser d'abord la superficie, la densité et le volume des boulettes de fer ainsi que les teneurs en fer des sédiments de la zone d'étude. Par la suite, une caractérisation en termes d'abondance et de diversité de la faune benthique serait effectuée dans des zones de diverses concentrations différentes en fer afin d'observer, s'il y a lieu, une variabilité spatiale tributaire de ces concentrations.

### 3.1 CARACTÉRISATION DES BOULETTES DE FER

La caractérisation des boulettes de fer sera réalisée en deux étapes distinctes. Dans un premier temps, la cartographie des concentrations de fer à la surface du fond marin sera effectuée au moyen d'un magnétomètre sous-marin afin de pouvoir localiser les zones de forte concentration. Les résultats cartographiques permettront par la suite d'échantillonner des carottes sédimentaires afin de déterminer l'épaisseur des unités sédimentaires qui contiennent des boulettes de fer et d'ensuite pouvoir en déterminer la densité et le volume. Une caractérisation visuelle des boulettes sera également réalisée.

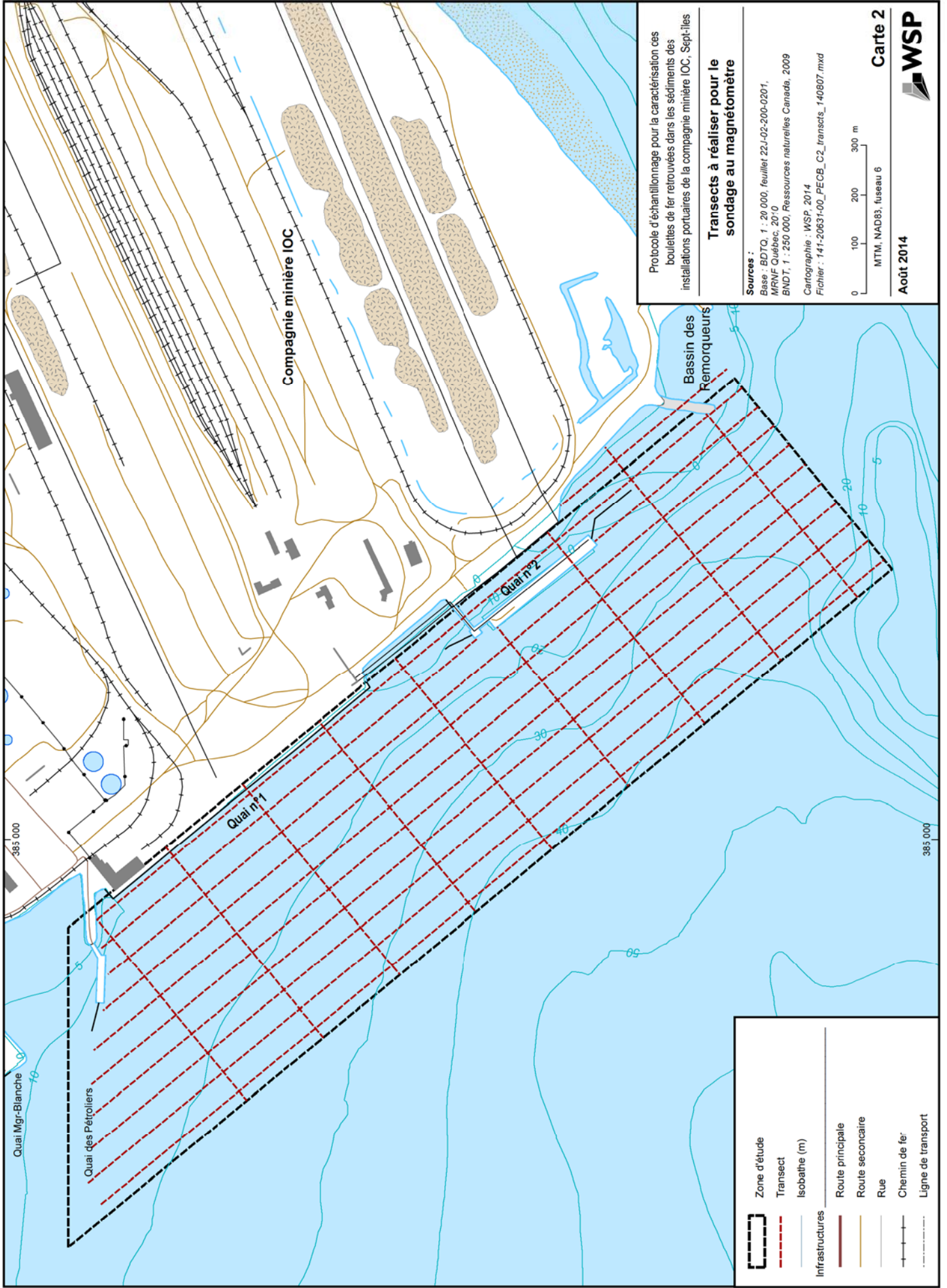
La magnétométrie sous-marine consiste à mesurer l'intensité du champ magnétique ambiant, qui est constitué principalement du champ magnétique terrestre et du magnétisme généré par masses contenant divers métaux, dont le fer. Ce type de mesure est utilisé non seulement pour la recherche d'explosifs enfouis ou d'épaves, mais sert également diverses disciplines scientifiques telles la géologie et la géomorphologie. De façon plus appliquée, la magnétométrie contribue depuis peu à circonscrire des superficies correspondant à des masses de sédiments contaminés aux métaux (Pozza *et al.*, 2004). En effet, la présence de divers métaux dans les sédiments, dont le fer, est en corrélation directe avec la présence même de contamination aux métaux lourds (Pozza *et al.*, 2004). L'utilisation du magnétomètre marin est donc proposée pour cartographier la surface contenant potentiellement des boulettes de fer au-devant des installations portuaires d'IOC.

Pour ce faire, WSP prévoit utiliser un magnétomètre de marque SeaSPY (Marine Magnetic Corp.), qui mesurera le champ magnétique en nT (nanoTesla) sur toute la zone d'étude. Le magnétomètre sera treuillé par une embarcation de type ponton à une distance de 20 m du bateau et à une hauteur constante de 5 m au-dessus du fond marin, grâce à un altimètre. Les transects longitudinaux à la berge seront distancés selon un intervalle de 50 m, alors que les transects transversaux seront positionnés à chaque 200 m (carte 2). Au total, 22,5 km de lignes seront ainsi sondées sur cette surface de 90 ha. L'acquisition des données sera réalisée à une vitesse de 10-15 km/h et la fréquence d'échantillonnage sera de 4 Hz, faisant en sorte qu'une mesure sera enregistrée à chaque mètre parcouru. Un système de positionnement au DGPS sera interfacé aux systèmes SeaSpy, à l'aide du logiciel BOB (Marine Magnetics Corp.).

Les données seront traitées afin de soustraire au champ magnétique ambiant les divers bruits issus, par exemple, du champ magnétique terrestre ou encore des variations diurnes (Guérout, 2002). Un fichier.txt, localisant en X et en Y les valeurs exprimées en nT, permettra donc de créer une carte des anomalies magnétiques selon une trame de couleur, ce qui traduira en valeur relative les concentrations en fer. Pour fins de validation, une caméra sous-marine sera déployée afin de filmer la surface du fond marin selon les mêmes transects empruntés par le magnétomètre.

Pour évaluer les épaisseurs, la concentration et le volume des boulettes de fer dans les sédiments, des carottes de sédiments d'une longueur de 4 m seront prélevées au vibro-carottier. Le nombre et la localisation des stations dépendront des résultats de la cartographie des anomalies magnétiques et des analyses physico-chimiques de la campagne de caractérisation des sédiments menée en parallèle. Il est à noter que, sur la base des images vidéos, trois carottes de sédiments seront prélevées dans les zones prévues pour le dragage de septembre 2014, en même temps que les relevés au magnétomètre pour éviter de perdre de l'information en raison du dragage prévu pour la mi-septembre.

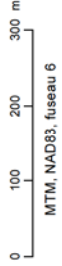
Sur place, les carottes de sédiment seront ouvertes en deux selon la longueur. Sur la première moitié de la carotte, une analyse stratigraphique sera réalisée. Pour chaque unité sédimentaire définie, un échantillon sera rapidement prélevé pour fins d'analyses physicochimiques dans des pots en verres ambrés scellés, sans bulles d'air, afin d'éviter tout changement de propriétés chimiques dû à l'oxydation. Ainsi, toute variation de texture, ou encore de couleur du sédiment (c'est-à-dire des strates plus noires ou encore des strates dont la couleur pourrait refléter des traces d'oxydation), sera considérée pour une analyse physico-chimique. Pour assurer un contrôle qualité de l'échantillonnage, des répliqués seront réalisés à raison de 10 % du nombre total d'échantillons. Un pseudo-répliqué sera également prélevé afin de contrôler la qualité du laboratoire. Les concentrations de fer total, de sulfures de fer, d'oxydes et d'hydroxydes de fer seront les paramètres mesurés en laboratoire dans les sédiments. La quantité d'oxygène dissous, le potentiel d'oxydo-réduction, le pH ainsi que la température seront les paramètres mesurés *in situ* dans les sédiments à l'aide d'une sonde de type YSI.



Protocole d'échantillonnage pour la caractérisation des boueilles de fer retrouvées dans les sédiments des installations portuaires de la compagnie minière IOC, Sept-Îles

**Transects à réaliser pour le sondage au magnétomètre**

Sources :  
 Base : BDTO, 1 : 20 000, feuillet 22J-02-200-0201,  
 MRNF Québec, 2010  
 BNDT, 1 : 250 000, Ressources naturelles Canada, 2009  
 Cartographie : WSP, 2014  
 Fichier : 141-20631-00\_FECS\_C2\_transects\_140807.mxd



	Zone d'étude
	Transect
	Isobathe (m)
<b>Infrastructures</b>	
	Route principale
	Route secondaire
	Rue
	Chemin de fer
	Ligne de transport

La deuxième moitié de la carotte sera acheminée au laboratoire de géomorphologie et de sédimentologie du département de Géographie de l'Université Laval. La carotte sera scannée à l'aide d'un autre magnétomètre afin d'évaluer les teneurs en fer de chacune des unités. Chaque unité sédimentaire discriminée sera tamisée à l'aide d'un tamis de 2 mm, pour isoler les boulettes de fer du reste des sédiments, ce qui permettra d'évaluer la densité et le volume des boulettes de fer. Enfin, l'analyse visuelle (couleur, émoussé, oxydé) sera notée afin d'évaluer le degré d'altération des boulettes selon leur âge relatif.

Enfin, afin de vérifier la présence de fer biodisponible pour les organismes à la surface des sédiments, des échantillons d'eau seront prélevés le plus près possible du fond marin à l'aide d'une bouteille Kemmerer. Ceux-ci seront ensuite filtrés à l'aide de filtres, dont la porosité sera de 0,45 µm, et conservés dans des bouteilles protégées de la lumière à l'aide de papier d'aluminium et scellées sans bulle d'air. Les concentrations de fer dissous sous forme des ions  $Fe^{2+}$  et  $Fe^{3+}$  seront mesurées au laboratoire.

### 3.2 CARACTÉRISATION DES COMMUNAUTÉS BENTHIQUES

Le présent protocole propose de recueillir parallèlement de l'information sur les communautés benthiques présentes dans la zone d'étude. La comparaison des communautés benthiques présentes dans des sédiments contenant différentes teneurs en fer permettra de voir si ce métal a une influence négative réelle sur le milieu marin. En plus d'y comparer l'abondance et la diversité, il sera possible d'y comparer la composition spécifique de stations présentant différentes concentrations de fer. La présence de certaines espèces indicatrices, résistantes au stress par exemple, permettrait d'évaluer plus justement si le milieu est réellement perturbé par la présence du fer.

Le plan d'échantillonnage recommandé pour la caractérisation de l'endofaune benthique est d'utiliser un plan d'étude par gradient, soit en fonction de la concentration en fer retrouvée. Ainsi, le positionnement des stations sera établi suite à l'analyse des données en provenance du magnétomètre et, si requis, des images vidéos. Ces résultats permettront de déterminer les stations d'échantillonnage comportant des concentrations en fer différentes. Trois stations seront d'abord positionnées à proximité du quai n° 2, où les concentrations maximales en fer auront été obtenues. Une quatrième station sera, par la suite, positionnée dans une zone comprenant des concentrations inférieures en fer, avoisinant celles retrouvées naturellement dans le milieu. Par la suite, trois autres stations seront réparties le long d'un transect reflétant un gradient d'exposition au fer. Notons que les conditions abiotiques des stations établies sur ce transect devront être similaires à celles observées au-devant du quai n° 2 (type de sédiment, profondeur, etc.) de manière à minimiser l'influence d'autres facteurs dans l'analyse des résultats. D'ailleurs, pour chaque station, un échantillon sera prélevé séparément pour en effectuer des analyses granulométriques et chimiques, dont celles

décrites antérieurement au niveau du fer, l'objectif étant d'établir le degré effectif d'homogénéité générale des conditions du milieu et de pouvoir attribuer les effets, le cas échéant, aux caractéristiques spécifiques du benthos de chaque station. Par surcroît, trois autres stations localisées dans une zone de référence voisine, mais non influencées directement ou indirectement par les activités portuaires de la compagnie minière, feront l'objet de prélèvements similaires afin de pouvoir comparer les communautés benthiques des deux zones. Cela permettra de mieux juger des effets réels de l'exposition au minerai de fer des communautés proximales du port par rapport à une zone non exposée.

Les coordonnées géographiques des diverses stations seront préalablement entrées dans le DGPS utilisé pour la campagne de terrain. L'endofaune sera récoltée à l'aide d'une benne Van Veen (superficie d'échantillonnage de 0,1 m<sup>2</sup>) à partir d'une embarcation motorisée. Une analyse de l'acceptabilité des échantillons devra *a priori* être effectuée avant de poursuivre les étapes subséquentes.

Critère d'acceptabilité des échantillons :

- plus de 50 % de son contenu est rempli;
- l'échantillon n'est pas trop incliné;
- les mâchoires de la benne sont bien fermées.

Les échantillons récoltés à la benne seront tamisés sur un tamis de maille 1 mm. Le contenu du tamis sera conservé dans une solution de formaldéhyde 4 % tamponné aux fins d'identification au laboratoire de taxonomie. Chaque pot utilisé pour contenir les échantillons sera dûment identifié au nom de la station et la date de l'échantillonnage y sera également inscrite.

Les échantillons seront analysés au laboratoire d'écologie benthique de l'ISMER. Le contenu des pots sera trié à la loupe binoculaire afin de séparer les organismes des sédiments et autres débris. Chaque individu sera identifié au niveau taxonomique le plus précis possible à l'aide de clefs d'identification. Le nom des espèces sera validé avec les sites taxonomiques reconnus tel que WoRMS (<http://www.marinespecies.org>). Un fichier Excel répertoriant l'ensemble des densités d'espèces pour chaque station permettra d'effectuer les tests statistiques adéquats afin d'évaluer l'effet potentiel du fer sur les communautés.

#### Évaluation de la toxicité par des bioessais

Un rapport produit en mai 2013, effectué pour la compagnie minière IOC (Maxxam, 2013) afin de répondre aux exigences MARPOL, présente les résultats d'une évaluation de la toxicité écologique d'échantillons d'eau exposée directement aux boulettes de fer. Ces bioessais ont été effectués sur les espèces suivantes, soit *Daphnia magna*, la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) et une espèce d'algue verte (*Pseudokirchneriella subcapitata*). Tous les résultats des tests n'ont démontré aucun effet toxique des boulettes de fer sur ces organismes.

À l'heure actuelle, il serait précipité de procéder à des bioessais afin de vérifier la toxicité écologique des boulettes de fer sur des organismes marins. Les bioessais évaluent l'effet d'un contaminant sur quelques espèces exclusivement, alors qu'il s'avère plus approprié de vérifier *a priori* l'effet in situ de ce contaminant au niveau des communautés benthiques. La présence de certaines espèces opportunistes ou généralistes pourra d'ores et déjà en dire beaucoup sur les effets potentiels du fer sur les organismes marins, permettant probablement d'exclure la nécessité d'effectuer des bioessais supplémentaires.



## 4. CONCLUSION

Partout dans le monde, les activités de transbordement de fer occasionnent une certaine accumulation de boulettes de fer sur le fond marin. Les effets de ces accumulations sur la faune sont peu connus, comme c'est le cas au-devant des installations portuaires d'IOC dans la baie de Sept Îles. Afin de mieux comprendre les effets environnementaux de ces apports en fer dans le milieu marin, IOC vise à documenter quantitativement les concentrations en fer dans la cellule hydrosédimentaire locale active dans la zone du port. Dans une seconde démarche, IOC vise à décrire en termes de diversité et d'abondance les différentes espèces d'organismes benthiques. Ce n'est que suite à cette étape qu'une décision pourra être prise quant à la gestion des sédiments, qui seront éventuellement dragués au-devant de ces quais. En fonction des résultats, celle-ci sera prise sur la base d'une analyse comparative de divers modes identifiés de gestion des sédiments dragués.



## 5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARRICK, R., S. Becker, L. Brown, H. Beller et R. Pastorok. 1988b. *Sediment quality values refinement. Volume II-data appendices E,F &G* : 1988 update and evaluation of Puget Sound AET. Prepared for Puget Sound Estuary Program. U.S. Environmental Protection Agency. Seattle. Washington.
- ENVIRONNEMENT CANADA. 2002. *Guide d'échantillonnage des sédiments du Saint-Laurent pour les projets de dragage et de génie maritime. Volume 2 : Manuel du praticien de terrain*. Environnement Canada, Direction de la protection de l'environnement, Région du Québec, Section innovation technologique et secteurs industriels. Rapport. 107 p.
- GUÉROUT, M. 2002. Recherche magnétométrique. Internet : <http://archeonavale.org/gran2012/>
- MANAHAN, S.E. 1991. *Environmental Chemistry*. Lewis Publishers, Inc., 48, 1-18.
- NYSDEC. 1994. *Technical guidance for screening contaminated sediments*. Division of Fish and Wildlife. Division of Marine Resources. Albany, New York. 36 pp
- POZZA, M. R., J. I. Boyce et W. A. Morris. Lake-based magnetic mapping of contaminated sediment distribution, Hamilton Harbour, Lake Ontario, Canada. *Journal of Applied Geophysics* 57 : 23-41
- SNELGROVE, P. 1998. *The biodiversity of macrofaunal organisms in marine sediments. Biodiversity and Conservation* 7, 1123-1132.
- TETRA TECH. 1987. *Recommended protocols for sampling and analyzing subtidal benthic macroinvertebrate assemblages in Puget Sound*. Prepared for the Puget Sound Estuary Program. USEPA. Region 10. Seattle. 31 p.



# Annexe 2

**LOCALISATION DES STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE  
DU BENTHOS EN 2011**





**Aire de dragage**  
 Zone tampon de 100 m de part et d'autre des aménagements projetés  
 Aménagements projetés

**Bathymétrie 2011**  
 Isobathes de 5,50 m à 22,00 m  
 Isobathes de 22,01 m à 39,00 m  
 \* Equispacing de 0,5 m par rapport au zéro des cartes

**Stations d'échantillonnage**  
 ● Caractérisation des sédiments  
 ● Benthos  
 --- Transect de caméra vidéo







# Annexe 3

**PHOTOGRAPHIES DÉCRIVANT LES ACTIVITÉS DE  
TERRAIN RÉALISÉES À L'AUTOMNE 2014**





Photo 1 – Mesure des paramètres physicochimiques de l'eau à la sonde YS1



Photo 2 – Benne Van Veen



Photo 3 – Mise en pot des sédiments



Photo 4 – Dispositifs mettant en place la caméra benthique



Photo 5 – Caméra benthique



Photo 6 – Mise à l'eau du magétomètre



Photo 7 – Poste de controle de la barge de travail

# Annexe 4

**IMAGES EXTRAITES DES VIDÉOS SOUS-MARINES ET  
DONNANT DES EXEMPLES DE LA DENSITÉ DES  
PLAQUAGES DE BOULETTES DE FER**







Photo 1 – Présence ponctuelle de boulettes (0 à 10 %)

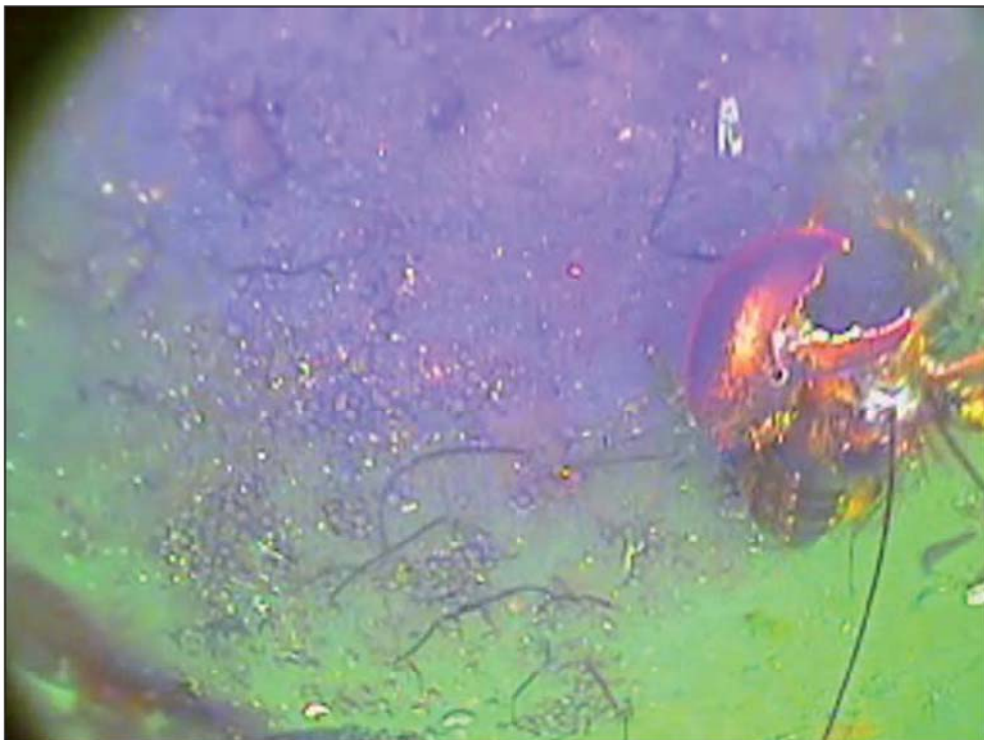


Photo 2 – Plaques sporadiques (recouvrement de boulettes entre 20 et 30 %)



Photo 3 – Plaques sporadiques (recouvrement de boulettes entre 50 et 65%)



Photo 4 – Plaques quasi-continues (recouvrement de boulettes entre 80 et 95%)

# Annexe 5

**PHOTOGRAPHIES DES CAROTTES DE SÉDIMENT  
(COR-1 À COR-5)**





Photo 1 – Carotte 1



Photo 2 – Carotte 2



Photo 3 – Carotte 3



Photo 4 – Carotte 4



Photo 5 – Carotte 5





# Annexe 6

**EXPLICATIONS ADDITIONNELLES SUR LA  
DÉTERMINATION DU FER FERREUX ET FERRIQUE  
DANS LES SÉDIMENTS**



#### **Annexe 4 : Explication additionnelles sur la détermination du fer ferreux et ferrique dans les sédiments**

Plusieurs minéraux contenus dans les sédiments et contenant potentiellement du fer ont été détectés par les méthodes de la Diffraction des Rayons X (DRX) et par la méthode de Fluorescence des Rayons C (FRX) (tableaux 1 et 2). Plusieurs minéraux contenant du fer ont été identifiés, comme le clinocllore,  $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  (tableau 1). Tel qu'indiqué dans la formule chimique de ce minéral, la quantité exacte d'ion ferreux par mole de minéral ne peut être connue. Ainsi, tous les minéraux dont la concentration d'ions ferreux ne pouvait pas être calculée ont été exclus de l'estimation de la concentration en fer ferreux et ferrique dans les sédiments.

Lors de la préparation des échantillons avant l'analyse de la Fluorescence des Rayons X (FRX), l'échantillon a été chauffé ce qui a converti une certaine proportion de magnétite en hématite. Cette quantité semble cependant négligeable, puisque la teneur en hématite détectée par FRX est très similaire à la somme des pourcentages massiques de l'hématite et de la magnétite déterminée par DRX. Ainsi, ces deux techniques donnent des résultats concluants (tableau 3). Puisque les sédiments n'ont pas été chauffés pour la DRX, le pourcentage massique de fer ferreux et du fer ferrique présentés dans l'étude ont été calculés à partir du pourcentage massique de magnétite et d'hématite dans les sédiments quantifié à l'aide de la Diffraction des Rayons X (DRX).

Vu que les sulfures de fer sont très difficilement détectables à l'aide de DRX et de FRX, la technique XPS a été utilisée pour quantifier le pourcentage de pyrite dans les sédiments. Aucun sulfure de fer n'a été détecté dans les échantillons analysés (tableau 4). Ainsi, le pourcentage massique d'ions ferriques et ferreux dans les sédiments peut être calculé à partir des teneurs en magnétite et en hématite déterminées à l'aide de la DRX.

Les techniques utilisées pour caractériser les échantillons solides (XPS, FRX et DRX) présentent une limitation qu'il est important de préciser. Ces techniques analysent seulement la surface de l'échantillon. Ainsi, si l'échantillon a été préparé de façon à ne pas assurer son homogénéité, la quantification des différents minéraux déterminée à partir de l'analyse de la surface n'est pas représentative de l'échantillon en entier. Vu que les résultats sont concluants entre la FRX et la DRX, cette lacune ne semble pas avoir eu un impact significatif lors de la présente étude.

Tableau 1 Composition des sédiments (excluant les boulettes de fer) déterminé par Diffraction des Rayons X.

STATION D'ÉCHANTILLONNAGE UNITE : % MASSIQUE	PARAMÈTRES ANALYSÉS																			
	Actinolite	Ankerite-	Dolomite	Biotite	Calcite	Clinchlore	Gypsum	Halite	Hematite	Ilmenite	K-feldspar	Magnetite	Plagioclase	Quartz	Muscovite	Phlogopite	Goethite	Titanite	Almandine	Somme
Q-1	4.70	0.80	3.80	0.90	0.80	0.00	0.50	<b>13.30</b>	0.90	14.80	<b>3.30</b>	33.00	23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100
Q-3	5.10	0.60	4.60	0.40	0.70	0.80	1.10	<b>1.60</b>	0.60	15.70	<b>1.30</b>	40.80	27.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100
Q-4	4.90	0.50	4.00	0.50	0.60	0.00	1.70	<b>5.00</b>	0.80	13.50	<b>1.50</b>	39.60	26.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100
Q-5	4.60	0.70	4.80	0.60	1.00	0.00	0.90	<b>10.10</b>	1.10	14.90	<b>2.50</b>	34.80	24.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100
Q-15	5.60	0.70	4.30	0.50	1.00	0.00	1.30	<b>3.40</b>	0.60	16.90	<b>1.20</b>	39.80	24.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100
COR-1	4.35	0.70	0.00	0.40	0.10	0.00	0.55	<b>34.80</b>	0.00	8.50	<b>6.40</b>	23.10	17.01	0.00	3.25	0.00	0.00	0.00	0.00	100
COR-2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	<b>73.90</b>	0.00	1.25	<b>17.48</b>	2.15	3.76	0.00	0.00	0.00	1.11	0.00	0.00	100
COR-3	4.56	0.75	0.00	0.39	0.00	0.00	0.54	<b>29.90</b>	0.00	10.84	<b>7.05</b>	24.00	18.45	0.00	3.46	0.00	0.00	0.00	0.00	100
COR-4	4.84	0.86	0.00	0.35	0.60	0.00	0.20	<b>31.10</b>	0.00	9.25	<b>7.94</b>	22.70	17.54	0.00	4.55	0.00	0.00	0.00	0.00	100
COR-5	5.05	0.85	0.00	0.49	1.01	0.00	1.02	<b>8.70</b>	0.00	14.08	<b>2.40</b>	34.30	23.40	0.00	7.35	0.00	1.39	0.00	0.00	100
FE1	8.31	0.37	0.00	0.33	0.88	0.00	1.20	<b>6.50</b>	0.00	13.78	<b>1.99</b>	37.50	24.55	0.00	3.75	0.00	0.00	0.00	0.00	100
FE2	7.30	0.90	0.00	0.40	1.00	0.00	1.00	<b>1.40</b>	0.00	12.40	<b>0.90</b>	41.60	26.30	1.80	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100
FE3	6.85	0.00	0.00	0.82	0.68	0.00	0.88	<b>0.51</b>	0.00	15.74	<b>0.78</b>	42.40	26.20	0.00	4.31	0.00	0.00	0.00	0.00	100
FE4	7.50	1.00	0.00	0.40	1.10	0.00	0.70	<b>1.40</b>	0.00	12.30	<b>1.10</b>	41.90	26.26	2.00	4.20	0.00	0.00	0.00	0.00	100
FE5	6.99	0.00	0.00	0.45	0.89	0.00	1.69	<b>1.35</b>	0.00	14.39	<b>1.00</b>	41.00	26.60	0.00	4.79	0.00	0.00	0.00	0.00	100
FE6	6.98	0.00	0.00	0.40	0.79	0.00	1.24	<b>1.49</b>	0.71	15.11	<b>1.19</b>	40.30	26.26	0.00	4.51	0.00	0.00	0.00	0.00	100
FE7	7.55	0.00	0.00	0.43	0.73	0.00	1.92	<b>1.60</b>	0.00	14.98	<b>1.15</b>	40.30	25.86	0.00	4.53	0.00	0.00	0.00	0.00	100
FE8	7.22	0.00	0.00	0.40	0.61	0.00	0.90	<b>0.61</b>	0.00	14.05	<b>0.96</b>	42.70	28.17	0.00	3.59	0.00	0.00	0.00	0.00	100
FE10	7.57	0.00	0.00	0.43	0.92	0.00	1.04	<b>0.97</b>	0.00	16.77	<b>1.04</b>	40.00	24.59	0.00	5.39	0.00	0.00	0.00	0.00	100

**Tableau 2 Composition des sédiments (excluant les boulettes de fer) déterminé par Fluorescence des Rayons X.**

STATION D'ÉCHANTILLONNAGE UNITÉ : % MASSIQUE	PARAMÈTRES ANALYSÉS												
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ba	Somme
Q-1	54,03	11,75	<b>20,29</b>	3,68	1,53	3,30	2,07	0,09	0,59	0,17	<0,01	0,09	99,71
Q-3	64,51	14,10	<b>6,13</b>	3,49	1,60	4,16	2,57	0,08	0,62	0,19	<0,01	0,12	99,77
Q-4	62,41	13,25	<b>10,23</b>	3,49	1,51	4,31	2,15	0,09	0,67	0,17	<0,01	0,09	100,54
Q-5	57,47	12,49	<b>16,18</b>	3,22	1,60	3,62	2,27	0,09	0,59	0,19	<0,01	0,10	99,72
Q-15	60,81	13,88	<b>8,27</b>	3,69	1,94	4,11	2,61	0,09	0,71	0,26	<0,01	0,11	99,70
COR-1	39,51	8,40	<b>42,19</b>	2,32	0,99	2,39	1,61	0,10	0,39	0,11	<0,01	0,07	99,46
COR-2	5,55	0,93	<b>91,20</b>	0,59	0,37	0,28	0,10	0,13	0,32	0,02	<0,01	<0,01	100,05
COR-3	41,78	8,67	<b>39,82</b>	2,10	0,88	2,55	1,75	0,08	0,27	0,09	0,01	0,07	99,57
COR-4	39,79	8,54	<b>40,81</b>	2,43	1,29	2,27	1,64	0,10	0,44	0,15	<0,01	0,07	99,30
COR-5	57,67	12,67	<b>14,48</b>	3,35	1,72	3,65	2,32	0,09	0,65	0,22	0,01	0,10	99,30
FE1	59,59	13,23	<b>11,55</b>	3,41	1,75	3,86	2,51	0,09	0,72	0,23	<0,01	0,11	99,78
FE2	62,76	14,08	<b>6,43</b>	3,62	1,96	4,01	2,74	0,09	0,70	0,29	<0,01	0,11	99,55
FE3	64,53	14,63	<b>4,79</b>	3,86	1,82	4,09	2,78	0,08	0,68	0,22	<0,01	0,12	99,58
FE4	64,31	14,01	<b>6,57</b>	3,69	1,80	3,90	2,64	0,09	0,75	0,25	<0,01	0,11	99,94
FE5	61,57	13,68	<b>6,15</b>	3,49	1,90	4,21	2,53	0,08	0,64	0,27	<0,01	0,10	99,39
FE6	63,37	14,01	<b>6,21</b>	3,56	1,81	4,06	2,57	0,08	0,68	0,24	<0,01	0,12	99,25
FE7	60,94	13,43	<b>6,42</b>	3,52	1,87	4,19	2,39	0,08	0,68	0,23	<0,01	0,10	99,09
FE8	66,74	14,34	<b>4,54</b>	3,60	1,52	4,18	2,55	0,08	0,59	0,20	<0,01	0,10	99,76
FE10	61,55	14,27	<b>6,01</b>	3,93	2,25	4,02	2,77	0,10	0,76	0,33	0,01	0,11	100,17

**Tableau 3** Comparaison des teneurs en hématite et en magnétite des sédiments (excluant les boulettes de fer), calculées à partir des technique de DRX et FRX

STATION D'ÉCHANTILLONNAGE	DRX			FRX	
	HEMATITE	MAGNETITE	SOMME	HEMATITE	% DE DIFFÉRENCE
Q-1	13,30	3,30	16,60	20,29	5
Q-3	1,60	1,30	2,90	6,13	18
Q-4	5,00	1,50	6,50	10,23	11
Q-5	10,10	2,50	12,60	16,18	6
Q-15	3,40	1,20	4,60	8,27	14
COR-1	34,80	6,40	41,20	42,19	1
COR-2	73,90	17,48	91,38	91,20	0
COR-3	29,90	7,05	36,95	39,82	2
COR-4	31,10	7,94	39,04	40,81	1
COR-5	8,70	2,40	11,10	14,48	7
FE1	6,50	1,99	8,49	11,55	8
FE2	1,40	0,90	2,30	6,43	24
FE3	0,51	0,78	1,29	4,79	29
FE4	1,40	1,10	2,50	6,57	22
FE5	1,35	1,00	2,35	6,15	22
FE6	1,49	1,19	2,69	6,21	20
FE7	1,60	1,15	2,75	6,42	20
FE8	0,61	0,96	1,57	4,54	24
FE10	0,97	1,04	2,01	6,01	25

**Tableau 4** Pourcentage massique de l'hématite, de la magnétite et de la pyrite de fer dans les sédiments (excluant les boulettes de fer)

STATION D'ÉCHANTILLONNAGE	PARAMÈTRES ANALYSÉS		
	HÉMATITE	MAGNÉTITE	PYRITE
UNITÉ	% MASSIQUE	% MASSIQUE	% MASSIQUE
Q-1	13,3	3,3	
Q-3	1,6	1,3	
Q-4	5,0	1,5	
Q-5	10,1	2,5	
Q-15	3,4	1,2	
COR-1	34,8	6,4	
COR-2	73,9	17,5	0
COR-3	29,9	7,1	
COR-4	31,1	7,9	
COR-5	8,7	2,4	
FE1	6,5	2,0	
FE2	1,4	0,9	0
FE3	0,5	0,8	
FE4	1,4	1,1	
FE5	1,4	1,0	
FE6	1,5	1,2	
FE7	1,6	1,2	
FE8	0,6	1,0	
FE10 (Référence)	1,0	1,0	0

