

#7012

SC0702 B47d Rapport final

INRS - GÉORESSOURCES

CENTRE DE RECHERCHES MINÉRALES

7D
427
.533
D49
1997
ex.1

CENTRE DE DOCUMENTATION CSL
105, McGill, 2^{ème} étage
Montréal (Québec) H2Y 2E7
Tél: (514) 288-2702
Fax: (514) 288-7100

**DÉVELOPPEMENT D'UN PROCÉDÉ DE TRAITEMENT
DE SÉDIMENTS CONTAMINÉS PAR UTILISATION DE
TECHNOLOGIES MINÉRALURGIQUES**

RAPPORT FINAL

RAPPORT PRÉSENTÉ À

**ENVIRONNEMENT CANADA (RÉGION DU QUÉBEC)
SECTION DU DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE
DIRECTION DE LA PROTECTION**

MAI 1997

PERSPECTIVE DE GESTION

Ce résumé du rapport final est publié dans le cadre du « Programme de Développement et de Démonstration Technologiques » d'Environnement Canada qui vise à appuyer les initiatives du secteur privé dans le développement et la démonstration de nouvelles technologies environnementales. Ce programme est associé au Bureau fédéral de développement régional du Québec (BFDR-Q) et fait partie intégrante du Plan d'action Saint-Laurent Vision 2000 d'Environnement Canada.

AVIS DE RÉVISION

Le présent rapport a été examiné par la Direction de la Protection, Environnement Canada, qui en a autorisé la publication. Cette autorisation ne signifie pas nécessairement que le contenu du rapport reflète les opinions et les politiques du Ministère. Les mentions de marque de commerce et de produits commerciaux qui apparaissent dans ce rapport ne signifient aucunement que leur utilisation est recommandée.

COMMENTAIRES DES LECTEURS

Veillez adresser vos commentaires sur le contenu du présent rapport à la Direction de la protection, Section du développement technologique, Environnement Canada, 105 rue McGill, 4^e étage, Montréal (Québec) H2Y 2E7.

Erratum

p. 110 du rapport final et p.16 du résumé exécutif :

Remplacer : «Le bilan de masse du procédé montre, qu'après filtration, le sédiment traité représente 15 % de la masse in situ, le concentré organique 2 % le concentré métallique 4 % et l'eau présente dans les sédiments 79 %.»

Par : «Le bilan de masse du procédé montre, qu'après filtration, le sédiment traité représente 15 % de la masse in situ, le concentré organique 5 %, le concentré métallique 11 %, l'eau 68 %, une fraction grossière faiblement contaminée (1 %) est soutirée en début de procédé.»

Programme développement et démonstration technologiques
Environnement Canada

Développement d'un procédé de traitement de sédiments contaminés par utilisation de technologies minéralurgiques

RAPPORT FINAL

préparé par :

l'INRS - Géoressources

et

le Centre de Recherches Minérales

soumis à la :

Section du développement technologique
Direction de la protection de l'environnement
Environnement Canada

Partenaires financiers :

INRS - Géoressources

Centre de Recherches Minérales

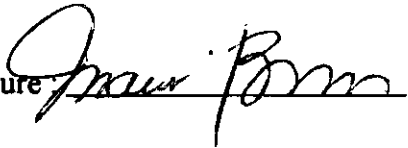
Environnement Canada

Verreault Navigation Inc.

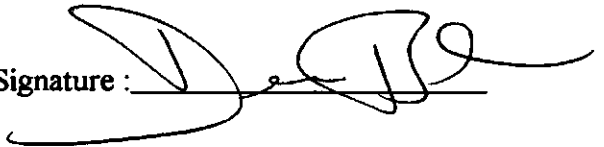
Sainte-Foy, le 22 mai 1997

Préparé par Messieurs et Madame :

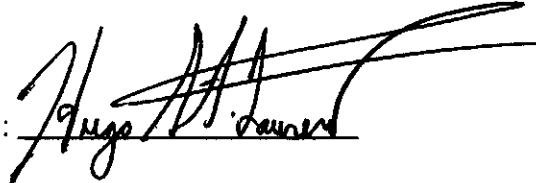
Mario Bergeron, Ph. D.
Professeur agrégé
INRS-Géoressources

Signature : 


Denis Blackburn, ing. M.Sc.
Chargé de projet
Centre de Recherches Minérales

Signature : 

Hugo St-Laurent, ing.
Assistant de recherche
INRS-Géoressources

Signature : 

Anne Gosselin, ing., M.Sc.
Assistante de recherche
INRS-Géoressources

Signature : 

Toute référence à ce document devra être citée de la façon suivante :

Bergeron M., St-Laurent H., Blackburn D. et Gosselin A. (1997). *Développement d'un procédé de traitement de sédiments contaminés par utilisation de technologies minéralurgiques*. Rapport présenté par l'INRS-Géoressources et le Centre de Recherches Minérales à Verreault Navigation et Environnement Canada. 118 p. et annexes I à XVI.

Date : 22 mai 1997

RÉSUMÉ

De nombreuses zones fluviales et portuaires au Québec, au Canada et à travers le monde sont contaminées. Des concentrations élevées en composés organiques et inorganiques sont en effet présentes dans les sédiments. L'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-Géoressources) et le Centre de Recherches Minérales (CRM) ont développé un procédé assurant le traitement des sédiments contaminés en métaux et en composés organiques (hydrocarbures pétroliers). Après traitement, les teneurs en contaminants sont inférieures au critère C de la *Politique de réhabilitation des terrains contaminés* du Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (MEF). On peut alors disposer, à des coûts modiques, les sédiments traités en les acheminant vers des sites d'enfouissement sanitaire acceptant ce type de matériaux.

Deux sites ont été échantillonnés et caractérisés, l'un de ces sites est localisé dans la zone portuaire de Québec, l'autre dans celle de Montréal. On retrouve sur ces deux sites des contaminants divers dont les concentrations sont de beaucoup supérieures aux critères intérimaires: seuil d'effets néfastes (SEN) pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent définis par Environnement Canada et le Ministère de l'Environnement et de la faune du Québec. Ainsi, le secteur échantillonné, de la zone portuaire de Québec présente notamment une contamination en cuivre, en zinc et en cadmium (respectivement de 8, 13 et de 16 fois supérieures au SEN); on retrouve aussi une contamination en nickel, chrome, plomb et arsenic selon la granulométrie. Près de 40% en masse de ces sédiments ont un diamètre inférieur à 45 µm.

Les sédiments provenant du secteur échantillonné de la zone portuaire de Montréal contiennent de hautes teneurs en cuivre, en chrome, en arsenic, en nickel (respectivement de 53, 9, 6 et de 3 fois supérieures au SEN) et en hydrocarbures pétroliers (7 fois supérieures au critère C). Plus de 60% (en masse) de ces sédiments ont un diamètre inférieur à 45 µm.

Les essais en laboratoires et à l'échelle pilote ont permis d'élaborer un diagramme de procédé qui assure un traitement des sédiments. Le procédé est issu de technologies minières connues et reconnues pour leurs faibles coûts d'opération. Le procédé développé est basé sur l'utilisation d'appareils de séparation gravimétrique et d'équipements de flottation.

Les essais de traitement en colonnes de flottation ont indiqué un enlèvement de 90 % des hydrocarbures pétroliers et de 56 à 99 % des contaminants inorganiques. En plus de permettre d'abaisser le niveau de contamination des sédiments sous le critère C, le procédé favorise une valorisation des concentrés en métaux lourds et potentiellement une valorisation des concentrés en hydrocarbures pétroliers qui sont obtenus en cours d'opération.

Les limites technologiques de l'approche suggèrent que l'atteinte de seuils de décontamination sous le critère du seuil d'effets mineurs (SEM) et sous le critère B de la politique de réhabilitation des terrains contaminés du MEF est possible.

SUMMARY

Several harbors and fluvial zones in Quebec, in Canada and elsewhere in the world contain contaminated sediments. High concentrations of organic and inorganic contaminants have been found in these sediments. A new effective process for the decontamination of sediments contaminated by heavy metals and organic compounds (oil and grease) has been developed by the Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-Géoressources) and the Centre de Recherches Minérales (CRM). After treatment, contaminants concentrations are below the criteria C of the *Politique de réhabilitation des terrains contaminés* of the Ministère de l'Environnement et de la faune du Québec (MEF). The treated sediments can be disposed at low cost in authorized landfill sites.

Two contaminated harbor sites have been sampled and characterized, one is located in the Quebec harbor zone, the other in the Montreal harbor zone. Contaminant concentrations at these two sites exceed by several times the provisional criteria for the toxic effect level (TEL) applicable to the sediment quality as defined by Environment Canada and the Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec. The principal contaminants found in the sampled sector of the Quebec harbor zone are: copper, zinc and cadmium (respectively exceeding by 8, 13 and 16 fold the TEL level). Nickel, chromium, lead and arsenic also exceed the TEL level depending on the size fractions considered. About 40% of the sediments mass show a particles diameter that is less than 45 μm .

Sediments from the sampled sector of the Montreal harbor exhibit high contents of copper, chromium, arsenic and nickel (respectively exceeding by 53, 9, 6 and 3 fold the TEL level) and in petroleum hydrocarbons (7 fold superior to the criteria C). More than 60% of the sediments mass show a particles diameter that is less than 45 μm .

Laboratory and pilot-scale tests led to the elaboration of a treatment process flowsheet for the treatment of sediments. The process is born from well known mineral technologies based on the use of gravity concentration and flotation devices.

Flotation column tests have reached a 90 % petroleum hydrocarbons removal and a 56 to 99% inorganic contaminants removal. Not only the process leads the sediments treated to an acceptable level (below criteria C of the MEF) in respect of disposal prescriptions, but also it allows a valorization of the contaminant heavy metals concentrate and possibly of the petroleum hydrocarbons concentrate obtained during the treatment procedures.

Technological limits inherent to the process suggest that the obtention of decontamination levels below the minimal effect level (MEL) and below criteria B of the MEF is possible.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	3
SUMMARY	5
TABLE DES MATIÈRES	7
LISTE DES ANNEXES	9
LISTE DES TABLEAUX.....	10
LISTE DES FIGURES, DES GRAPHIQUES ET DES PHOTOGRAPHIES.....	12
ÉQUIPE DE TRAVAIL	13
1. INTRODUCTION	14
1.1 OBJECTIF DU PROJET.....	14
1.2 PARTENAIRES DU PROJET	16
<i>1.2.1 INRS-Géoressources.....</i>	<i>16</i>
<i>1.2.2 Centre de Recherches Minérales.....</i>	<i>17</i>
<i>1.2.3 Verreault Navigation Inc.</i>	<i>18</i>
1.3 HISTORIQUE ET CONTEXTE DU PROJET	19
1.4 PROBLÉMATIQUE.....	21
1.5 TECHNOLOGIES PROPOSÉES.....	23
<i>1.5.1 Technologies gravimétriques</i>	<i>26</i>
<i>1.5.2 Technologies de flottation.....</i>	<i>28</i>
<i>1.5.3 Conditionnement et ajout de réactifs.....</i>	<i>29</i>
<i>1.5.4 Attrition et techniques de délogement des hydrocarbures pétroliers.....</i>	<i>30</i>
<i>1.5.5 Équipements de classification et réactifs pour sédimentation.....</i>	<i>31</i>
1.6 CARACTÈRE INNOVATEUR	32
ÉCHANTILLONNAGE ET CARACTÉRISATION MINÉRALURGIQUE.....	34
2.1 ÉCHANTILLONNAGE.....	34
<i>2.1.1 Zone portuaire de Québec.....</i>	<i>34</i>
<i>2.1.2 Zone portuaire de Montréal.....</i>	<i>35</i>
2.2 CARACTÉRISATION MINÉRALURGIQUE	36
<i>2.2.1 Analyse granulométrique</i>	<i>37</i>
<i>2.2.2 Analyse des composés organiques.....</i>	<i>38</i>
<i>2.2.3 Analyse des composés inorganiques.....</i>	<i>38</i>
<i>2.2.4 Résultats des analyses des composés inorganiques et organiques.....</i>	<i>41</i>
<i>2.2.5 Analyse modale.....</i>	<i>48</i>
<i>2.2.6 Étude de l'état de libération</i>	<i>56</i>
<i>2.2.7 Résumé de la caractérisation minéralurgique</i>	<i>63</i>
3. TRAITEMENT.....	68
3.1 OBJECTIFS	68
3.2 PROGRAMME D'ESSAIS PRÉLIMINAIRES	69
3.3 SCHÉMA DE TRAITEMENT PRÉLIMINAIRE, ZONE PORTUAIRE DE QUÉBEC.....	75
<i>3.3.1 Résumé des résultats de traitement, zone portuaire de Québec.....</i>	<i>80</i>

3.4 ÉLABORATION D'UN DIAGRAMME DE PROCÉDÉ, ZONE PORTUAIRE DE MONTRÉAL	82
3.4.1 <i>Choix des technologies utilisées: gravimétrie versus flottation.....</i>	<i>82</i>
3.4.2 <i>Diagramme de procédé.....</i>	<i>85</i>
3.4.3 <i>Résultats de traitement</i>	<i>90</i>
3.4.4 <i>Bilan de masse.....</i>	<i>96</i>
3.4.5 <i>Disposition des sédiments décontaminés.....</i>	<i>97</i>
3.4.6 <i>Disposition des concentrés de métaux.....</i>	<i>97</i>
3.4.7 <i>Disposition des concentrés d'huiles et graisses.....</i>	<i>97</i>
3.4.8 <i>Revalorisation des concentrés métalliques et des concentrés d'hydrocarbures pétroliers.....</i>	<i>98</i>
3.4.9 <i>Eaux de procédé.....</i>	<i>99</i>
3.4.10 <i>Coûts de traitement anticipés à l'échelle industrielle.....</i>	<i>101</i>
3.4.11 <i>Applicabilité sur d'autres sites.....</i>	<i>103</i>
3.4.12 <i>Limite technologique du procédé</i>	<i>104</i>
3.4.13 <i>Potentiel de commercialisation de la technologie</i>	<i>107</i>
4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	109
5. BILIOGRAPHIE.....	112

LISTE DES ANNEXES

- Annexe I :** Carte de la zone portuaire de Québec
Carte de la zone portuaire de Montréal, secteurs 103 et 104
Photographies
- Annexe II :** Critères d'évaluation de la qualité des sédiments et des sols
- Annexe III :** Analyses granulométriques
Équipements pour le tamisage et la classification
- Annexe IV :** Description des techniques d'analyses des composés organiques
- Annexe V :** Description des techniques d'analyses des composés inorganiques
- Annexe VI :** Certificats d'analyses
Résultats de la caractérisation - organiques
- Annexe VII :** Certificats d'analyses
Résultats de la caractérisation - inorganiques
- Annexe VIII :** Photographies du montage utilisé pour l'extraction au liquide lourd
- Annexe IX :** Habitus du cuivre dans les sédiments
- Annexe X :** Paramètres et résultats bruts des essais de traitement
- Annexe XI :** Coefficients indicateurs utiles découlant des essais de traitement
- Annexe XII :** Procédure expérimentale et résultats des essais visant la sélection d'un surfactant
- Annexe XIII :** Procédure expérimentale et résultats des essais avec utilisation d'ultrasons
- Annexe XIV :** Résultats des analyses des eaux usées de procédé
- Annexe XV :** Paramètres, résultats et coefficients des essais de récupération de l'or dans la fraction décontaminée pauvre en or
- Annexe XVI :** Photographies des principaux équipements utilisés

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1 : Liste des méthodes d'analyses des composés organiques	39
Tableau 2 : Liste des méthodes d'analyses des composés inorganiques	40
Tableau 3 : Résultats d'analyses des composés organiques et inorganiques des sédiments de la zone portuaire de Québec --- Lot-1 (Grue)	43
Tableau 4 : Résultats d'analyses des composés organiques et inorganiques des sédiments de la zone portuaire de Québec --- Lot-2 (benne Van Veen)	44
Tableau 5 : Résultats d'analyses des composés organiques et inorganiques des sédiments de la zone portuaire de Montréal --- F-2	45
Tableau 6 : Résultats d'analyses des composés organiques et inorganiques des sédiments de la zone portuaire de Montréal --- B-27	46
Tableau 7 : Résultats d'analyses des composés organiques et inorganiques des sédiments de la zone portuaire de Montréal --- B-22-28	47
Tableau 8 : Résultats de l'analyse modale et rappel du bilan métallurgique des sédiments de la zone portuaire de Québec - Lot 1 (Grue)	49
Tableau 9 : Résultats de l'analyse modale et rappel du bilan métallurgique des sédiments de la zone portuaire de Québec - Lot 2 (Benne Van Veen)	50
Tableau 10 : Résultats de l'analyse modale et rappel du bilan métallurgique des sédiments de la zone portuaire de Montréal - F2	51
Tableau 11 : Résultats de l'analyse modale et rappel du bilan métallurgique des sédiments de la zone portuaire de Montréal - B27	52
Tableau 12 : Résultats de l'analyse modale et rappel du bilan métallurgique des sédiments de la zone portuaire de Montréal - B22-28	53
Tableau 13 : Teneurs limites du critère C de la Politique de réhabilitation des terrains contaminés du MEF, du SEN et de la contamination actuelle des sédiments des zones portuaires de Québec et de Montréal	64
Tableau 14 : Plage de distribution des coefficients indicateurs découlant des essais de traitement pour le cuivre et le zinc, zone portuaire de Québec > 45 µm	71
Tableau 15 : Plage de distribution des coefficients indicateurs découlant des essais de traitement pour le cuivre et le zinc, zone portuaire de Québec < 45 µm	72
Tableau 16 : Plage de distribution des coefficients indicateurs découlant des essais de traitement pour le cuivre, l'arsenic, le baryum et le sélénium, zone portuaire de Montréal > 45 µm	73

Tableau 17 : Plage de distribution des coefficients indicateurs découlant des essais de traitement pour le cuivre, l'arsenic, le baryum et le sélénium, zone portuaire de Montréal < 45 µm	73
Tableau 18 : Plage de distribution des coefficients indicateurs découlant des essais de traitement pour les hydrocarbures pétroliers, zone portuaire de Montréal	74
Tableau 19 : Présentation du SEN, des teneurs en métaux et en composés organiques avant traitement, du critère B, du critère C et des teneurs en métaux et en composés organiques des sédiments traités de la zone portuaire de Québec	80
Tableau 20 : Présentation du SEN, des teneurs en métaux et en composés organiques avant traitement, du critère B, du critère C et des teneurs en métaux et en composés organiques des sédiments traités de la zone portuaire de Montréal	93
Tableau 21 : Bilan de masse du procédé	96
Tableau 22 : Règlement 87 de la Communauté Urbaine de Montréal relatif aux rejets des eaux usées dans les réseaux d'égout et les cours d'eau et résultats d'analyses	100
Tableau 23 : Estimés de coûts en fonction de volumes à traiter	102

LISTE DES FIGURES, DES GRAPHIQUES ET DES PHOTOGRAPHIES

	Page
Figure 1 : Limites de récupération de chacun des équipements utilisées en fonction de la taille des particules de l'alimentation	24
Figure 2 A-B : Distribution massique (%) des principaux contaminants par tranches granulométriques, A: zone portuaire de Québec; B : zone portuaire de Montréal	54-5
Figure 3 : Concentrations, Critères C, SEN, des principaux contaminants, zone portuaire de Québec	65
Figure 4 A-B : Concentrations, Critères C, SEN, des principaux contaminants, zone portuaire de Montréal	66-7
Figure 5 : Schéma de traitement préliminaire, zone portuaire de Québec	76
Figure 6 : Concentrations, Critères C, teneurs après traitement, du cuivre et du zinc, zone portuaire de Québec	81
Figure 7 : Coefficient de nettoyage en fonction du pourcentage massique du rejet pour le MGS et la Flottation	83
Figure 8 : Procédé général : zone portuaire de Montréal	88
Figure 9 : Enlèvement partiel des huiles et graisses, zone portuaire de Montréal	89
Figure 10 : Classification, zone portuaire de Montréal	91
Figure 11 : Enlèvement partiel des métaux, zone portuaire de Montréal	92
Figure 12 A-B: Concentrations, Critères C, teneurs après traitement, des principaux contaminants, zone portuaire de Montréal	94-5
Graphique 1 : Coefficient d'efficacité du procédé selon le type d'équipement, zone portuaire de Québec; A : cuivre; B : zinc.	78
Graphique 2 : Coefficient de réussite du procédé selon le type d'équipement, zone portuaire de Québec; A : cuivre; B : zinc.	79
Graphique 3 : Coefficient d'efficacité du procédé selon le type d'équipement - cuivre zone portuaire de Montréal	86
Graphique 4 : Coefficient de réussite du procédé selon le type d'équipement - cuivre zone portuaire de Montréal	86
Photographies: Photographies des sections polies des minéraux métalliques des fractions lourdes	59-62

ÉQUIPE DE TRAVAIL

INRS-GÉORESSOURCES

Mario Bergeron, Ph. D.
Professeur agrégé

Hugo St-Laurent, ing.
Assistant de recherche

Anne Gosselin, ing., M.Sc.
Assistante de recherche

André Hébert, Isabelle Bélanger, Jean-Pierre Ricbourg, Marc Greendale, Réal Gosselin, Marc-Antoine Dion, Jules Bélanger.

CRM

Denis Blackburn, ing., M.Sc.
Chargé de projet

Arthur J. Plumpton, ing., Ph.D.
Directeur projet développement technologique

Bertrand Paquet, Jean-François Wilhelmy, Edmond Rousseau, Jean Robitaille, André Lemay, Guy Lachance, Jacques Dumas.

1. INTRODUCTION

1.1 OBJECTIF DU PROJET

Ce projet avait pour objectif principal de développer un procédé de traitement peu coûteux et efficace applicable aux sédiments fluviaux et portuaires contaminés en composés organiques et inorganiques. Le procédé a été principalement développé en utilisant comme matériel des échantillons de sédiments contaminés (plus de 5 tonnes métriques) provenant d'un secteur particulier de la zone portuaire de Montréal.

Plus spécifiquement, on visait l'atteinte d'un objectif de restauration permettant un rapport optimal entre les coûts de traitement et les coûts de disposition en milieu terrestre des sédiments traités.

Pour la zone portuaire de Montréal, un objectif de restauration permettant l'atteinte de teneurs en contaminants se situant sous celles du critère C¹ du Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec a été visé. Cet objectif de restauration apparaît optimal en regard du rapport, coûts de traitement/coûts de disposition.

La possibilité d'un rejet en eau libre des sédiments traités n'a pas été envisagée. En effet, la réglementation développée par Environnement Canada et le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec sur les rejets en eau libre, indique la nécessité de procéder à une étude environnementale poussée du site de disposition dans les cas où des effets nocifs sur la vie benthique sont appréhendés. Le choix d'un site éventuel de rejet ainsi que les coûts reliés à l'étude environnementale ne faisaient pas partis de la problématique du présent projet.

¹ Ministère de l'Environnement et de la Faune (1996). *Politique de réhabilitation des terrains contaminés*. Direction des politiques du secteur industriel, du Ministère de l'Environnement et de la Faune. Terrains contaminés, ISSN 1204-2072, ISBN 2-551-16878-3.

Pour atteindre l'objectif visé, les étapes suivantes ont été réalisées:

(Chapitre 2 : Échantillonnage et caractérisation)

1. Échantillonnage des sédiments contaminés;
Caractérisation physico-chimiques et minéralurgiques des sédiments contaminés.

(Chapitre 3 : Traitement)

2. Élaboration des éléments de schémas de traitement préliminaires comprenant;
 - Essais de décontamination et/ou récupération des hydrocarbures pétroliers ainsi que des autres produits organiques;
 - Essais de décontamination et/ou récupération par traitements gravimétrique et physico-chimique des métaux.
3. Mise au point et évaluation du diagramme de procédé de traitement pour une section de la zone portuaire de Montréal comprenant;
 - Choix technologique : gravimétrie versus flottation;
 - Optimisation du procédé à l'échelle pilote;
 - Vérification de l'atteinte de l'objectif de restauration: teneurs en contaminants inférieures à celles du critère C;
 - Analyses des possibilités de revalorisation des concentrés obtenus (métaux, hydrocarbures pétroliers);
 - Bilan de masse;
 - Évaluation des coûts de traitement.

1.2 PARTENAIRES DU PROJET

1.2.1 INRS-Géoressources

Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), Centre Géoressources,
2700 rue Einstein,
Casier postal 7500,
Sainte-Foy, Québec,
G1V 4C7.
tel. (418) 654-2611.
fax (418) 654-2615.

L'INRS-Géoressources est un organisme universitaire qui a pour but de développer des travaux de recherche à caractères sociaux et économiques ayant des implications à court et à moyen termes dans l'économie québécoise et canadienne. Essentiellement, ces activités de recherche sont concentrées sous trois thèmes généraux: 1. Environnement, 2. Ressources minérales et hydrocarbures, 3. Géologie régionale et analyse des bassins. Les activités directement concernées par le présent rapport s'inscrivent sous le thème de l'environnement.

L'équipe scientifique oeuvrant dans le domaine environnemental couvre les secteurs de la caractérisation et du développement de procédés de restauration. L'équipe se compose d'ingénieurs chimistes, d'ingénieurs hydrogéologues, de géochimistes et de chimistes. Les différents projets réalisés, ou en cours de réalisation, touchent les problématiques suivantes:

- la caractérisation environnementale;
- la caractérisation minéralurgique;
- la caractérisation des déchets miniers;
- la restauration des sols contaminés par les hydrocarbures et les BPC;
- la décontamination de sédiments et de sols contenant des contaminants métalliques;
- la décontamination de sédiments et de sols présentant une contamination mixte organique et inorganique.

Le centre dispose d'équipements de terrain et de laboratoires de pointes lui permettant d'offrir à ces partenaires des projets complets, de l'échantillonnage, au développement de procédés incluant les étapes de la caractérisation et celles des essais à l'échelle semi-industrielle.

1.2.2 Centre de Recherches Minérales

Centre de Recherches Minérales (CRM)

2700 rue Einstein

Sainte-Foy, Québec,

G1P 3W8.

tel. (418) 643-4531

fax (418) 643-6706

Le CRM, un centre du ministère des Ressources naturelles du Québec, est un partenaire de choix en recherche et développement de technologies dédiées aux besoins des entreprises qui oeuvrent dans les domaines de l'exploitation, du traitement, de la transformation et de l'utilisation des substances minérales. Le CRM fournit à ses partenaires industriels et gouvernementaux des services de consultation et de développement expérimental de produits et de procédés. Ses principaux secteurs de spécialisation sont l'analyse et la caractérisation des matériaux, le développement et l'optimisation des schémas de procédés, la protection de l'environnement et la récupération secondaire, les produits de minerai de fer et l'essai des procédés et des équipements à l'échelle semi-industrielle.

Le CRM est muni d'équipements des plus modernes en analyse et en caractérisation des substances minérales, comprenant un microscope électronique à balayage Cambridge, un diffractomètre Rigaku, un appareil ATG-ATD avec analyse FTIR des gaz, un analyseur d'images LECO ainsi que des systèmes d'analyse à fluorescence-X, à activation neutronique, à plasma et à absorption atomique. Les laboratoires de son service de développement de procédés disposent d'équipements de traitement de minerais et de métallurgie extractive qui rivalisent avec les laboratoires les mieux équipés au monde. Sa station d'essais semi-industriels comprend des équipements hydrométallurgiques, pyrométallurgiques ainsi que des équipements en traitement de minerais. Parmi ces équipements, les plus modernes sont: le séparateur Mozley MGS, les séparateurs magnétiques à haut gradient (sec et humide), les spirales chinoises, australiennes et américaines, un cône Reichert, un broyeur à jet Alpine, un broyeur semi-autogène automatisé. Le CRM est reconnu sur le plan international par ses publications, ses rapports techniques et ses conférences couvrant les divers secteurs de l'industrie minérale, y compris celui de la récupération secondaire et des procédés de décontamination de l'environnement.

1.2.3 Verreault Navigation Inc.

Verreault Navigation inc.

146, rue Principale,

Les Méchins, Québec,

Canada G0J 1T0.

tel. (418) 729-3733

fax (418) 729-3285

Verreault Navigation Inc. est une filiale du Groupe Maritime Verreault inc. La société est spécialisée dans la construction et la réparation de navires ainsi que dans les opérations de dragage. La division dragage opère six dragues qui effectuent actuellement divers travaux dans plusieurs ports canadiens. Verreault Navigation réalise des opérations de dragage depuis plus de 40 ans. Au cours de cette période, Verreault Navigation a continuellement renouvelé, remplacé et développé de nouveaux équipements afin d'assurer à sa clientèle un choix de technologies de pointe.

En ce qui concerne spécifiquement le dragage, Verreault Navigation possède plusieurs types de dragues telles que : dragues à suction, à godet et rétrocaveuse. Pour le transport des sédiments sur l'eau, la société est la seule entreprise à posséder des barges autopropulsées, lesquelles sont plus manoeuvrables et peuvent ainsi naviguer plus facilement dans des aires restreintes. Ces barges peuvent également remorquer ou déplacer rapidement la drague au besoin.

Verreault Navigation inc. a donc développé une grande expertise dans plusieurs genres de travaux de dragage, dont quelques projets comportant des sédiments contaminés qui ont dû être déposés dans des cellules de confinement.

1.3 HISTORIQUE ET CONTEXTE DU PROJET

5 septembre 1995:

- la Section du développement technologique d'Environnement Canada confirmait l'octroi d'une contribution financière pour la réalisation du projet « Mise au point d'une méthode de traitement des sédiments contaminés lors des opérations de transbordement de minerais (port de Québec) ». Ce projet était proposé par l'INRS-Géoressources et le Centre de Recherches Minérales (CRM) avec la participation financière de Verreault Navigation. L'objectif était de mettre au point, à l'échelle pilote et à partir d'échantillons provenant de la zone portuaire de Québec, une technologie de traitement gravimétrique applicable aux sédiments essentiellement contaminés par les métaux.

20 novembre 1995:

- l'entente de contribution avec Environnement Canada était amendée par l'ajout d'un sous-programme relié au traitement des sédiments de la zone portuaire de Montréal. Ce projet avait pour objectif principal l'élaboration d'un schéma de traitement préliminaire applicable à l'enlèvement de contaminants organiques et inorganiques présents dans une section de la zone portuaire de Montréal.

En cours de projet (à partir du 21 février 96), il a été décidé de développer un procédé complet applicable à la zone portuaire de Montréal car cette zone montrait des contaminations organiques et inorganiques caractéristiques de plusieurs zones portuaires et fluviales. Le procédé développé à partir des sédiments de la zone portuaire de Montréal apparaissait donc d'application plus large que celui proposé au départ pour la zone portuaire de Québec. En conséquence, les travaux se rapportant à la zone portuaire de Québec ont été limités à l'élaboration d'un schéma de traitement préliminaire au profit d'essais supplémentaires avec des sédiments provenant de la zone portuaire de Montréal.

Suite à cette modification, les sous objectifs visés étaient les suivants:

Pour les zones portuaires de Québec et Montréal,

1. échantillonnage des sédiments contaminés;
2. caractérisation minéralurgique des sédiments échantillonnés;

Pour les zones portuaires de Québec et de Montréal,

1. élaboration de schémas de traitement préliminaires en utilisant les approches de classification par hydrocyclones, de récupération des contaminants par techniques gravimétriques et techniques de flottation. Les techniques de flottation couvrant l'utilisation de cellules et de colonnes.

Pour une section de la zone portuaire de Montréal,

1. à partir des essais préliminaires de récupération des contaminants organiques et inorganiques, élaborer un schéma de traitement;
2. vérifier à l'échelle pilote ce schéma de traitement en regard de l'enlèvement des contaminants organiques et inorganiques, les produits finaux étant un sédiment se classifiant sous le critère C, un concentré de contaminants organiques (hydrocarbures pétroliers) et un concentré de contaminants inorganiques (métaux);
3. analyser les possibilités de valorisation des concentrés de contaminants obtenus;
4. établir une analyse technico-économique de la performance du schéma de traitement.

1.4 PROBLÉMATIQUE

Le transport de marchandises et l'activité industrielle dans les zones portuaires et le long des plans entraînent souvent une contamination des sédiments. Un grand nombre de sites contaminés dans les zones portuaires ont déjà été identifiés et caractérisés par les agences gouvernementales canadiennes. En général, deux catégories de contaminants ont été identifiées. La première catégorie, comprend les composés organiques, ici désignés comme étant les hydrocarbures pétroliers; la deuxième, inclue l'ensemble des contaminants métalliques.

L'accès continu des navires aux quais requiert un dragage régulier des sédiments portuaires. Le dépassement du seuil d'effet néfaste (SEN²) implique une obligation de traitement des sédiments contaminés ou une obligation de confinement sécuritaire.

Un bref résumé de la réglementation concernant la disposition des matériaux dragués est présenté ci-dessous. Pour être rejeté en eau libre ou être utilisé à d'autres fins, les concentrations en contaminants doivent se situer à égalité ou en dessous du seuil d'effet mineur (SEM²). Sous ce seuil, les sédiments peuvent être rejetés en eau libre à condition de ne pas présenter des effets nocifs sur la faune benthique se trouvant dans la zone de rejet. Pour des matériaux dragués contenant des teneurs en contaminants supérieures au SEM, des effets nocifs sur l'environnement sont généralement appréhendés. Ainsi, la décision d'effectuer ou de ne pas effectuer un rejet en eau libre doit être basée sur la réalisation d'une étude environnementale poussée du site de disposition. Un rejet en eau libre sera autorisé seulement dans les cas où l'étude environnementale démontre que la déposition des sédiments n'entraînera pas une dégradation environnementale du site récepteur.

Lorsque la concentration d'un contaminant excède le seuil d'effet néfaste (SEN), des effets environnementaux sévères sont appréhendés. Dans ces cas, les matériaux dragués ne peuvent être rejetés directement en eau libre. Plutôt, ils doivent être traités ou confinés de façon sécuritaire.

² Centre Saint-Laurent, (1992), *Critères intérimaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent*, Environnement Canada, Ministère de l'Environnement du Québec. ISBN 0-662-97096-9.

Le présent projet vise le développement d'une méthode de traitement s'appliquant aux matériaux dragués dont les teneurs en contaminants sont supérieures au SEN. Idéalement, le schéma de procédé recherché devra répondre aux conditions suivantes:

- Faibles coûts d'opération ; en raison du large volume de sédiments à draguer et à décontaminer.
- Niveau élevé de performance ; le lieu et les coûts reliés à la disposition des sédiments sont grandement liés à l'atteinte de critères environnementaux. Le procédé doit être suffisamment performant pour assurer que les teneurs en contaminants, après traitement, permettent la disposition des sédiments à coûts modiques.

L'approche proposée consiste dans les faits à considérer les sédiments contaminés comme un minerai de pauvre teneur. Les caractéristiques générales de ce minerai pauvre sont les suivantes:

- la matrice est déjà broyée et en général la taille des particules composant la matrice est inférieure à 100 µm;
- le minerai est déjà sous forme de pulpe;
- on peut l'acheminer facilement par pompage ou dragage vers les équipements de concentration;
- les métaux que l'on désire récupérer, soit le cuivre, le sélénium, l'arsenic, et le zinc, sont généralement localisés dans des phases minéralogiques distinctes, lesquelles présentent habituellement des différences de densité spécifique supérieures à 1,5 g/cm³ avec la matrice argileuse;
- les composés organiques sont souvent hydrophobes et potentiellement récupérables par des technologies de flottation.

Comme on considère le sédiment comme un minerai pauvre, il faut utiliser des techniques de récupération économiques et performantes. Les approches physiques du traitement de minerai regroupant les technologies gravimétriques et les technologies de flottation sont pertinentes. Il s'agit donc d'évaluer dans quelle mesure les technologies existantes peuvent être employées pour décontaminer des sédiments contenant des teneurs qui seraient considérées comme un minerai pauvre dans le cas d'opérations minières.

1.5 TECHNOLOGIES PROPOSÉES

Les technologies qui ont été testées sont couramment utilisées dans le domaine de l'industrie minière. Les travaux ont été réalisés avec des équipements dont le fonctionnement est basé sur deux concepts: la gravimétrie et la flottation. Cette limite technologique a été imposée par la recherche d'un procédé peu coûteux.

Des essais de séparation gravimétrique ont été réalisés avec les équipements suivants :

- * Spirale MG-4
- * Table à secousses Wilfley
- * Table Bartles-Mozley
- * Classificateur hydraulique C.F.S.
- * Cône Knelson
- * Centrifugeur MGS Mozley
- * Centrifugeur Super Bowl

Des essais de flottation ont été réalisés avec les équipements suivants:

- * Cellule Denver
- * Colonne

La figure 1 à la page suivante présente les limites granulométriques des technologies précédentes. On y retrouve les limites de récupération de chacun des équipements en fonction de la taille des particules de l'alimentation.

On retrouve à l'annexe XVI, des photographies des principaux équipements utilisés.

Figure 1 : Limites de récupération de chacun des équipements utilisés en fonction de la taille des particules de l'alimentation.

TECHNOLOGIES	100 mm	10 mm	1 mm	100 µm	45 µm	10 µm	1 µm
Classificateur C.F.S.		■	■	■			
Spirale		■	■	■			
Table à secousses Wilfley			■	■	■		
Table Bartles-Mozley			■	■	■	■	
Cône Knelson			■	■	■	■	
Centrifugeur MGS Mozley				■	■	■	■
Centrifugeur Super Bowl			■	■	■	■	
Flottation en cellule		■	■	■	■		
Flottation en colonne		■	■	■	■	■	■

De plus, des essais avec les technologies ou réactifs suivants en appoint ont été réalisés :

- * Collecteurs
- * Surfactants
- * Agents moussants
- * Mélangeur statique
- * Sonde ultrasons
- * Attriteur Denver Sala
- * Tamis
- * Hydrocyclone
- * Coagulant
- * Flocculant

Les sections suivantes décrivent brièvement le fonctionnement des équipements utilisés ainsi que le rôle de certains réactifs.

- 1.5.1 et 1.5.2, description des équipements gravimétriques et des équipements de flottation;
- 1.5.3, description du conditionnement et des rôles des réactifs;
- 1.5.4, description des équipements d'attrition et des autres techniques utilisées pour le délogement des hydrocarbures pétroliers;
- 1.5.5, description des équipements de classification et description des réactifs de sédimentation.

1.5.1 Technologies gravimétriques

Les technologies gravimétriques sont des méthodes qui permettent de séparer des solides démontrant des différences de densité spécifique dans un médium fluide (l'eau ou l'air). Les mélanges de solides susceptibles de bien répondre aux méthodes gravimétriques sont ceux qui présentent des différences de densité spécifique généralement supérieures à 1g/cm^3 . La classification granulométrique de l'alimentation est également importante, car lorsque deux particules de même densité sont placées dans un fluide, la plus grosse particule sédimente plus rapidement. Ainsi, une petite particule de densité spécifique élevée peut avoir la même vitesse de sédimentation qu'une particule plus grosse de densité spécifique plus faible.

Spirale MG-4

Cet équipement est composé d'un conduit hélicoïdal dont la section est demi-circulaire. La pulpe, d'une densité de 15 à 45% solide, est introduite par le haut de la spirale et suit une trajectoire en forme de spirale jusqu'au bas, durant laquelle il se produit une stratification de la pulpe. Son principe de séparation est basé sur les effets combinés de la force centrifuge, des vitesses de sédimentation des particules variant selon le diamètre et la densité ainsi que du phénomène de percolation interstitiel au travers du lit de particules en écoulement. Ce type d'équipement s'applique essentiellement aux particules sablonneuses (diamètre d'environ $125\ \mu\text{m}$ à $1\ \text{mm}$).

Table à secousses Wilfley

Il s'agit d'une table légèrement inclinée et équipée d'un mécanisme qui lui communique longitudinalement un mouvement de va-et-vient. La surface de la table est couverte de rainures parallèles dont la profondeur diminue progressivement à partir du point d'alimentation de la pulpe jusqu'à la sortie qui est diamétralement opposée. L'eau de lavage qui s'écoule sur la table entraîne transversalement les particules légères. Sous l'action des secousses, les particules lourdes sont acheminées longitudinalement à l'autre extrémité de la table.

Table Bartles-Mozley

Cet équipement consiste en une large courroie tendue horizontalement par deux cylindres et dont la surface supérieure est inclinée à partir d'une arête longitudinale centrale vers les bordures de chaque côté. Son principe de fonctionnement est le même que celui de la table à secousses Wilfley, sauf qu'un mouvement orbital à faible turbulence remplace le mouvement de va-et-vient. Ce type d'appareil est conçu pour traiter des particules ayant un diamètre qui varie entre 10 et $100\ \mu\text{m}$. De plus, il s'applique uniquement à de petits volumes de matériel.

Classificateur hydraulique C.F.S.

Le principe de fonctionnement de cet appareil fait appel à la sédimentation entravée. La pulpe est séparée par différence de densité à l'aide d'un lit fluidisé. La densité du lit est ajustée selon les densités des particules à séparer. Cette technologie est principalement utilisée lorsque la tranche granulométrique du matériel à séparer est étroite. De plus, elle est applicable aux particules ayant un diamètre qui varie entre 100 µm et 5 mm.

Cône Knelson

Cet équipement est en fait une centrifugeuse opérant à haute vitesse. Il consiste en un récipient en forme d'entonnoir à double parois. La paroi extérieure forme l'enveloppe de l'appareil et la paroi intérieure est perforée afin de permettre au matériel léger d'être évacué par un courant d'eau. La paroi intérieure est aussi tapissée de bandes horizontales (environ 5) qui ont pour fonction de piéger les particules lourdes qui ont été projetées contre la paroi intérieure sous l'action de la force centrifuge (jusqu'à 60 G). Ce type d'appareil est performant pour les particules ayant un diamètre qui varie entre 10 et 100 µm.

Centrifugeur MGS Mozley

Il s'agit de deux équipements de séparation (la centrifugeuse et la table à secousses) combinés en un seul. La table à secousses constitue la surface intérieure d'un cylindre rotatif légèrement incliné. Le principe de séparation est le même que celui de la table à secousses Wilfley, sauf que la force gravitationnelle à laquelle sont soumises les particules est remplacée par la force centrifuge qui est environ 20 fois plus élevée. Cette technologie est applicable aux particules dont la différence de densité est supérieure à 1 et dont le diamètre varie entre 1 et 70 µm.

Centrifugeur Super Bowl

Cet appareil ressemble en plusieurs points au séparateur Knelson sauf qu'il développe une force centrifuge plus élevée, soit entre 150 et 200 G. De plus, les bandes horizontales servant à piéger les particules lourdes sont moins nombreuses (seulement 3) et localisées dans le haut du cône. La partie inférieure du cône est lisse afin de permettre aux particules lourdes de glisser jusqu'aux bandes horizontales. Cette technologie est applicable aux particules dont la différence de densité est supérieure à 1 et dont le diamètre varie entre 10 et 250 µm

1.5.2 Technologies de flottation

Le principe de la flottation est basé sur l'hydrophobicité des surfaces des solides (naturelle ou stimulée à l'aide d'un réactif approprié). En milieu aqueux, si une particule dont la surface est hydrophobe entre en contact avec une bulle d'air, elle aura tendance à s'y fixer et à être entraînée vers le haut par cette dernière. Deux équipements ont été utilisés lors du projet; la cellule Denver et la colonne de flottation.

Cellule Denver

Ce type d'équipement est constitué d'un réservoir muni d'une turbine entourée de chicanes. L'air est introduit à la base dans le système par l'axe de la turbine. Un concentré de matériel dont la surface est hydrophobe est récupéré sous forme de mousse par débordement et un rejet est retiré par le bas du réservoir.

Colonne

Il s'agit simplement d'une colonne cylindrique équipée d'un diffuseur d'air à son bas et d'un gicleur à son haut. Le matériel est alimenté par le milieu (plus précisément à 1/3 à partir du haut). Un concentré de matériel, dont la surface est hydrophobe, est récupéré sous forme de mousse par débordement en haut de la colonne et un rejet est récupéré en bas de la colonne.

1.5.3 Conditionnement et ajout de réactifs

Le conditionnement vise à homogénéiser le matériel avant le traitement; un simple réservoir agité accomplit cette fonction. Les réactifs requis pour le traitement sont ajoutés à cette étape. Il peut s'agir de collecteurs, de surfactants ou d'agents moussants.

Collecteurs

Les agents de flottation les plus importants sont sans contredit les collecteurs. Il s'agit de molécules organiques ou d'ions qui s'adsorbent sélectivement sur les surfaces des minéraux afin de les rendre hydrophobes. Les particules dont la surface est hydrophobe acquièrent par ce phénomène la capacité de s'attacher aux bulles d'air qui entrent en collision avec elles.

Surfactants

Les surfactants sont des produits qui ont la propriété de favoriser la formation de microémulsions o/w (huile dans l'eau), ce qui entraîne la dissolution des contaminants de nature organique.

Agents moussants

Les agents moussants sont généralement des agents tensioactifs hétéropolaires de nature organique qui sont adsorbés aux interfaces air/eau (bulles). Les deux principales fonctions des agents moussants sont d'assurer une dispersion de bulles fines dans la pulpe et de maintenir une stabilité adéquate de la mousse qui flotte à la surface de la pulpe. En effet, la mousse doit être assez stable pour éviter le relargage des particules hydrophobes dans la pulpe. Par contre, une mousse trop ferme aura pour effet de nuire au traitement subséquent du concentré.

1.5.4 Attrition et techniques de délogement des hydrocarbures pétroliers

L'attrition a pour fonction de détacher les particules fines qui adhèrent aux grosses particules et de nettoyer les particules de la couche de contaminants organiques qui les enrobe par friction des particules les unes contre les autres. L'attrition vise donc à libérer les composés organiques qui sont collés sur les particules solides. C'est le cas des hydrocarbures pétroliers pour certains sédiments. Quelques unes des technologies d'attrition ou de délogement sont présentées dans les paragraphes suivants.

Mélangeur statique

Ce type d'équipement est relativement récent. Il s'agit de chicanes fixes à l'intérieur d'une conduite qui forcent le matériel fluide à se mélanger à travers une progression de divisions et de recombinaisons, créant des perturbations qui favorisent l'homogénéité du matériel.

Sonde ultrasons

L'attrition peut aussi être réalisée à l'aide d'une sonde à ultrasons. Le matériel est introduit entre un tuyau et une tige qui est ultrasoniquement activée. Les perturbations engendrées par cette action entraînent la friction entre les particules.

Attriteur Denver Sala

Cet équipement qui permet d'attriter est constitué d'un réservoir muni de deux axes d'agitation sur lesquels sont fixées deux hélices. Pour que l'attrition soit efficace, la densité de solide de la pulpe doit être relativement élevée.

1.5.5 Équipements de classification et réactifs pour sédimentation

Tamis

Cet équipement, formé d'un réseau plus ou moins serré de toile et d'un cadre, sert à maintenir la substance et à laisser passer certains éléments d'un mélange, selon la dimension des particules.

Hydrocyclone

Cet équipement de forme conique utilise la force centrifuge afin de séparer les particules fines des grosses. Le matériel est introduit par le haut de l'hydrocyclone de façon tangentielle et emprunte une trajectoire en forme de spirale à l'intérieur de l'équipement. Les grosses particules sont entraînées vers les parois par la force centrifuge et sortent par le bas du cône. Pour leur part, les particules fines sont concentrées dans le centre de l'équipement. Lorsqu'elles atteignent le bas du cône, elles sont repoussées vers le haut et sortent par le dessus de l'appareil. Ce phénomène est dû à la présence d'un étranglement au bas du cône qui a pour fonction de repousser le courant de particules fines vers le haut où la sortie est plus large.

Coagulants

Les coagulants sont des électrolytes dont la charge est opposée à celle des particules à coaguler. Lorsque dispersés dans le milieu, les électrolytes ont pour effet de neutraliser la charge des particules. Il en résulte une réduction des forces de répulsion entre les particules qui peuvent ensuite entrer en contact et adhérer les unes aux autres. Parmi les coagulants les plus utilisés, on note les sels contenant des cations hautement chargés comme Al^{+3} , Fe^{+3} et Ca^{+2} .

Floculants

La floculation implique la formation d'agglomérats beaucoup moins denses que ceux résultant de la coagulation. Les floculants sont des polymères à poids moléculaire élevé et solubles dans l'eau. Ils agissent comme des ponts qui relient les particules entre elles afin de former des agglomérats plus communément appelés des floes. Les floculants les plus fréquemment employés font partie de la famille des polyacrylamides.

1.6 CARACTÈRE INNOVATEUR

Afin de mettre en évidence le caractère innovateur du projet, une revue de la littérature actuelle portant sur les technologies de traitement de sédiments existantes s'impose.

Averett et Francingues (1994) ont revu la littérature concernant la décontamination des sédiments. Plusieurs alternatives d'enlèvement des contaminants qui sont actuellement disponibles y sont présentées (méthodes d'enlèvement biologique, chimique, physique, thermique, par extraction et par immobilisation). La majorité des informations rapportées dans cette section est tirée de cette revue.

La première installation de traitement des sédiments portuaires à l'échelle industrielle a été construite en Allemagne, (projet METHA; Detzner et al, 1993) . Le procédé est basé sur l'utilisation d'hydrocyclones pour effectuer une réduction de volume, la fraction inférieure à 45 microns n'est pas traitée.

C. van Rijt (1993) présente des résultats de recherches effectuées en Hollande portant sur les aspects physiques du traitement des sédiments par réduction de volume. La technologie décrite est basée sur la séparation des particules en fonction de leur diamètre à l'aide d'hydrocyclones, la fraction fine des sédiments n'est également pas traitée.

Aux États-Unis, l'efficacité d'un procédé de lavage de sédiments contaminés par des métaux lourds qui a été développé par la compagnie Bergmann a été évaluée à l'échelle semi-industrielle (Galloway and Snitz, 1994) . Selon cette approche, les métaux lourds présents sont concentrés par réduction de volume dans la portion de matériel fin (< 45 µm) sans traitement supplémentaire. Selon Traver (1996), la technologie Bergman ne s'applique pas au traitement de sédiment contenant plus de 30% de matériel inférieur à 45 microns.

Finalement, l'Agence de Protection Environnementale des États-Unis (U.S. EPA, 1994) a évalué différentes technologies minéralurgiques (séparation basée sur le diamètre des particules, la gravité, l'attrition et la flottation de contaminants d'origines organique et inorganique à l'aide de cellules de flottation,) pour la décontamination des sédiments. Les résultats obtenus indiquent clairement que la capacité et l'efficacité de ces technologies diminuent avec le diamètre des particules à traiter. Des récupérations de l'ordre de 50 % sont rapportées pour le traitement de matériaux fin.

Il est à noter que les technologies étudiées par l'EPA ne couvraient pas l'utilisation de colonnes de flottation.

Le procédé développé par l'INRS-Géoressources et le CRM présente les avantages suivants sur la majorité des technologies existantes:

1. le procédé permet de traiter les deux classes de contaminants communément retrouvés dans les sédiments portuaires, soient les contaminants de type organiques et inorganiques;
2. le procédé permet de traiter des sédiments dont le diamètre des particules est inférieur à 45 µm;
3. le procédé permet le traitement d'une grande quantité de « fines » (plus de 60% du matériel - sur une base massique);
4. le procédé permet l'obtention de deux concentrés potentiellement revalorisables; l'un produit par la récupération des contaminants organiques, l'autre provenant de la concentration des contaminants inorganiques;
5. le procédé est basé sur l'utilisation de techniques minières versatiles et relativement faciles d'opération;
6. le procédé est modulaire, transportable et peut-être opéré soit sur terre ou sur mer;
7. le procédé permet un ajustement des niveaux de récupération en fonction des sites de dépôts existants, ce qui favorise une optimisation des coûts de traitement;
8. le procédé peut-être éventuellement utilisé comme étape de pré-concentration à une approche complémentaire de traitement, exemple biotechnologie, incinération, dissolution chimique, etc.,
9. le procédé peut-être modifié pour le rendre adaptable au traitement d'autres matériaux contaminés tel que: les sols contaminés, les étangs industriels de sédimentation, les parcs de rejets miniers, les boues industrielles.

ÉCHANTILLONNAGE ET CARACTÉRISATION MINÉRALURGIQUE

2.1 ÉCHANTILLONNAGE

La première étape du projet consistait en l'échantillonnage de sédiments contaminés de la zone portuaire de Québec et de la zone portuaire de Montréal. L'objectif spécifique était d'obtenir deux échantillons de 5 tonnes métriques permettant de procéder, dans les étapes ultérieures à la caractérisation, aux travaux et aux essais de décontamination et de récupération des contaminants. Cette étape s'est déroulée du 11 au 13 octobre 1995 dans la zone portuaire de Québec et du 27 au 30 novembre 1995 dans la zone portuaire de Montréal. L'INRS-Géoressources a supervisé les travaux principaux de cette première étape avec l'appui du CRM.

2.1.1 Zone portuaire de Québec

Une consultation du rapport *Plan d'intervention des secteurs aquatiques contaminés, port de Québec, secteur PIQ1, phase 2, estuaire de la rivière Saint-Charles, caractérisation détaillée*, rédigé par Procéan inc. (février 1992), a permis d'identifier les zones contaminées par les opérations de transbordement de minerais dans la zone portuaire de Québec. La carte de la zone portuaire de Québec est présentée à l'annexe I.

Plus de six tonnes métriques ont été échantillonnées devant les quais 50 à 53. Environ 1.6 tonne a été récupérée à l'aide d'un ponton flottant équipé d'une benne de type Van Venne, soit 43 chaudières en plastique d'environ 20 litres chacune et pesant environ 37 kilogrammes. Ces échantillons, nommés « Québec lot 2 », ont été recueillis jusqu'à une profondeur de 25 centimètres. Afin de procéder plus rapidement, une « grue 250 tonnes » a ensuite été utilisée. Quatre contenants de 180 litres et 87 chaudières de 20 litres ont été ainsi recueillis. La profondeur atteinte avec cet équipement était de plus de deux mètres. Ce second groupe d'échantillons est nommé « Québec lot 1 ». Voir photographies de l'échantillonnage à l'annexe I.

2.1.2 Zone portuaire de Montréal

Les sédiments ont été prélevés dans l'ellipse ayant aux extrémités les stations B22 et B28, près du quai 103. La figure 2.9, du rapport *Caractérisation et répartition spatiale des sédiments dans les baies situées de part et d'autre du quai 103 (port de Montréal)*, produit par Géophysique GPR International Inc. (février 1995), a permis de localiser les points d'échantillonnage. On retrouve à l'annexe I une section de la carte de la zone portuaire de Montréal ainsi que des photographies du site. Plus de cinq tonnes ont été recueillies à l'aide d'un ponton flottant équipé d'une pelle rétro-excavatrice. La firme GPR a été chargée de l'opération du ponton et de la rétro-excavatrice sous la supervision de l'INRS. 128 chaudières en plastique d'environ 39 kilogrammes ont été ainsi récupérées, puis séparées en quatre lots qui sont identifiés: B22, B27, F2 et B28.

2.2 CARACTÉRISATION MINÉRALURGIQUE

La deuxième étape du projet consistait en une série de manipulations permettant une caractérisation des sédiments. Ces manipulations visaient les sous-objectifs suivants:

- **déterminer l'importance des contaminants en fonction des classes granulométriques considérées;**
- **procéder à une analyse organique complète;**
- **déterminer les teneurs des métaux présents;**
- **identifier et quantifier les phases minéralogiques contenant les métaux toxiques;**
- **évaluer leur degré de libération.**

Après échantillonnage des zones portuaires de Québec et de Montréal, les échantillons ont été entreposés à la station d'essais semi-industriels du CRM. Afin de procéder à la caractérisation, six parties aliquotes des lots 1 et 2 de la zone portuaire de Québec et des lots B28, B27, F2 et B22 de la zone portuaire de Montréal, pesant environ 40 kilogrammes chacune, ont été amenées aux laboratoires de l'INRS et du CRM. Afin d'éviter les agglomérations des particules fines et une perte des hydrocarbures pétroliers et des organiques lors d'un tamisage à sec, on effectua la séparation par tamisage humide. Les sous-étapes suivantes ont permis une caractérisation détaillée (voir section 2.2.1 à 2.2.7).

On retrouve à l'annexe II la liste des substances à considérer ainsi que les critères d'évaluation spécifiques concernant la qualité des sédiments et des sols. Lorsque la concentration d'un contaminant donné dépasse le niveau SEN (seuil d'effet néfaste), d'éventuels travaux de dragage impliqueront la mise en place de technologies de traitement ou le rejet du sédiment dragué dans une cellule de confinement. Dans le présent projet, l'objectif de traitement visait l'atteinte de teneurs en contaminants se localisant sous le critère C de la Politique de réhabilitation des terrains contaminés du MEF. Des telles teneurs en contaminants autorisent l'accès des sédiments traités à des sites d'enfouissement à coût modique (exemple: carrière Miron, Ville de Montréal).

2.2.1 Analyse granulométrique

En minéralogie, une analyse granulométrique « standard » se fait normalement comme suit :

1. Tamisage humide (lavage à l'eau) de tout l'échantillon sur le tamis le plus fin (325 mailles/45 μm).
2. Séchage des fractions obtenues (+45 et -45 μm).
3. Tamisage à sec de la fraction supérieure à 45 μm . Le tamisage se fait sur les tamis 1700, 1180, 850, 600, 425, 300, 212, 150, 106, 75 et 53 μm .

On obtient ainsi le poids de solide sec retenu sur chaque tamis.

Dans le cas des sédiments, on ne peut pas procéder suivant la méthode « standard » car, en asséchant la fraction supérieure à 45 μm , il y a un risque d'éliminer les organiques présents dans les sédiments. La méthode par tamisage humide (lavage à l'eau) est donc plus appropriée. Les tranches granulométriques utilisées sont de 150, 75 et 45 μm . Des échantillons humides pour les fractions +150, -150/+75, -75/+45 et -45 μm ont ainsi été obtenus. Ces échantillons sont alors prêts pour l'analyse des organiques.

On peut aussi faire sécher une partie de chaque fraction pour mesurer les poids secs. L'annexe III présente le poids des fractions granulométriques pour chacun des lots. Afin d'accélérer le processus de caractérisation, il a été convenu de jumeler les échantillons des lots B22 et B28 de la zone portuaire de Montréal.

Les tamis réguliers ne permettent pas l'analyse granulométrique des particules de diamètre inférieure à 45 μm . Il faut donc recourir à une autre méthode pour analyser les fractions inférieures à 45 μm . Un « cyclosizer » a été utilisé pour extraire les particules inférieures à 12 μm de la fraction - 45 μm . Le « cyclosizer » est simplement une batterie d'hydrocyclones ayant chacun une coupe granulométrique particulière. Des images des équipements pour le tamisage et la classification sont aussi présentées à l'annexe III.

2.2.2 Analyse des composés organiques

Dans un premier temps, un litre « souche » (non-traité) de chaque échantillon a été prélevé. Une analyse organique complète des échantillons « souches » B27 et Lot-1 a été réalisée en sous-traitance par Enviro-Lab³ et l'analyse du carbone organique total a été réalisée par l'INRS-EAU⁴. Les techniques d'analyse des huiles et graisses totales et minérales, des hydrocarbures pétroliers C₁₀ à C₅₀, des produits pétroliers, des huiles et graisses totales et minérales (échantillons liquides), des hydrocarbures aromatiques polycycliques, des BPC et pesticides organochlorés et du carbone organique total sont listées au tableau 1 à la page suivante et elles sont expliquées à l'annexe IV. Les échantillons ont été livrés sous forme liquide et analysés sur base humide. Les résultats sont présentés sur une base sèche. On retrouve aussi à l'annexe VI, une discussion sur les techniques d'analyses des huiles et graisses et/ou des hydrocarbures pétroliers.

2.2.3 Analyse des composés inorganiques

La mesure des concentrations des éléments a été obtenue par différentes techniques analytiques. Toutes les analyses des contaminants inorganiques représentent des concentrations totales et non pas des concentrations extractibles. Les éléments traces (Ba, Co, Cu, Ga, Nb, Ni, Pb, Rb, Sr, Sn, V, Y, Zn, Zr) et majeurs (Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, K₂O, CaO, TiO₂, MnO, Fe₂O₃) ont été analysés par fluorescence X. Les éléments (Ag, As, Au, Br, Ce, Cr, Cs, Eu, Hf, Ho, La, Lu, Mo, Sb, Sc, Se, Sm, Ta, Tb, Th, Tm, U, W, Yb,) ont été analysés par activation neutronique. Le mercure (Hg) a été mesuré par fluorescence atomique et le béryllium (Be) et le cadmium (Cd) ont été analysés par absorption atomique. Le soufre total a été mesuré avec un four à induction Leco. Les techniques analytiques utilisées sont listés au tableau 2. L'annexe V présente brièvement ces techniques d'analyses ainsi que les autres techniques (spectromètre de masse au plasma argon et spectrophotomètre d'émission atomique au plasma argon) qui ont été utilisées lors du projet.

³ EnviroLab, division de Roche Itée, 1818 route de l'Aéroport, Sainte-Foy, Québec, G2E 3L9

⁴ INRS-EAU, 2700 Einstein, Sainte-Foy, Québec, G1V 4C7

Tableau 1 : Liste des méthodes d'analyses des composés organiques

Paramètres	Méthode	Exécutant
<u>Sédiment</u>		
BPC Pesticides organochlorés	Extraction au soxlet avec acétone-hexane. Purification sur florisol. Dosage par GC/ECD.	EnviroLab
HAP	Extraction au soxlet avec dichlorométhane Purification sur silice. Dosage par GC/MS.	EnviroLab
Huiles et graisses minérales et totales	Extraction au soxlet avec fréon. Traitement au gel de silice. Dosage par infra-rouge.	EnviroLab Biogénie
Hydrocarbures pétroliers C ₁₀ -C ₅₀	Extraction à l'hexane. Traitement au gel de silice. Dosage par GC/FID.	EnviroLab
Produits pétroliers	Extraction au bain ultrasonique avec pentane. Dosage par GC/FID.	EnviroLab
Carbone total	Dosage au four oxydant LECO.	CRM
Carbone organique total	Traitement avec HCl. Dosage au four oxydant LECO.	CRM INRS-Eau
<u>Eaux</u>		
Huiles et graisses minérales et totales	Filtration sur terre diatomée. Extraction du filtre au soxlet avec le fréon. Extraction au Rollacell à pH<2 avec fréon. Traitement au gel de silice. Dosage par infra-rouge.	EnviroLab

Tableau 2 : Liste des méthodes d'analyses des composés inorganiques

Paramètres	Méthode	Exécutant
Sédiment		
Métaux traces (Ba, Co, Cu, Ga, Nb, Ni, Pb, Rb, Sr, V, Y, Zn, Zr)	Fluorescence par rayons X.	INRS-Géoressources
Majeurs (Na ₂ O, MgO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , P ₂ O ₅ , K ₂ O, CaO, TiO ₂ , MnO, Fe ₂ O ₃)	Fluorescence par rayons X.	INRS-Géoressources
Métaux traces (Ag, As, Au, Br, Ce, Cr, Cs, Eu, Hf, Ho, La, Lu, Mo, Nd, Sb, Sc, Se, Sm, Ta, Tb, Th, Tm, U, W, Yb)	Activitation neutronique.	INRS-Géoressources CRM
Métaux traces extractibles (Al, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Zn)	Spectrométrie d'émission atomique au plasma.	CRM
Métaux traces (Au, Ar, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Sn, Zn)	Spectrophotométrie d'absorption atomique.	CRM
Métaux traces (Co, Cd)	Spetrométrie de masse au plasma argon (ICP-MS).	INRS-Géoressources
Mercuré (Hg)	Fluorescence atomique.	INRS-Géoressources
Beryllium (Be), Cadmium (Cd)	Absorption atomique.	INRS-Géoressources
Phosphore total	Digestion H ₂ SO ₄ /K ₂ SO ₄ /HgSO ₄ . Analyse colorimétrique à l'acide ascorbique sur Aquatec.	EnviroLab
Soufre total	Four oxydant LECO.	CRM
Fluor, Cyanures totaux	Électrode sélective.	CRM
Brome	Fluorescence X.	CRM
Eaux		
Métaux traces (Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Ba, Pb, Sn)	Spetrométrie de masse au plasma argon (ICP-MS).	INRS-Géoressources
Sulfures totaux (S)	Analyse colorimétrique au bleu de méthylène (auto-analyseur Technicon).	INRS-Eau
Fluorures totaux (F)	Électrode sélective.	INRS-Eau
Chlorures Totaux (Cl)	Chromatographie ionique.	INRS-Eau
Phosphore total (P)	Digestion à l'acide sulfurique et persulfate. Analyse colorimétrique à l'acide ascorbique.	INRS-Eau
Sulfates totaux (SO ₄)	Chromatographie ionique.	INRS-Eau

2.2.4 Résultats des analyses des composés inorganiques et organiques

Les tableaux 3, 4, 5, 6 et 7 des pages suivantes présentent les principaux résultats de la caractérisation granulo-chimique. Aux annexes VI et VII, on retrouve les certificats d'analyses brutes et le contrôle de la qualité. Il est à noter que les données, ainsi que leurs interprétations, portant sur la distribution massique des contaminants en fonction de la granulométrie sont présentées à la section 2.2.5.

Zone portuaire de Québec

Les concentrations en composés organiques pour le port de Québec sont inférieures au seuil d'effet néfaste (SEN). On remarque toutefois une forte contamination en cuivre (8 fois supérieure au SEN), en zinc (16 fois) et en cadmium (13 fois) pour les échantillons du lot-1 et du lot-2 (tableaux 3 et 4). Une contamination en chrome est aussi présente. On retrouve à l'occasion une contamination en nickel, en plomb et en arsenic selon la fraction granulométrique. Environ 22% (base massique) du matériel échantillonné est inférieur à 12 μm . Le tableau 13 et la figure 3, aux pages 64 et 65 respectivement, présentent les teneurs des principaux contaminants ainsi que les concentrations associées aux SEN et aux critères C.

Zone portuaire de Montréal

Les échantillons B27, B22-28 et F2 de la zone portuaire de Montréal sont fortement contaminés en cuivre (53 fois le SEN), en nickel (3 fois), en arsenic (6 fois) et en chrome (9 fois). Des contaminations en plomb, en mercure, en zinc et en cadmium sont aussi présentes selon la granulométrie. Environ 50% du matériel échantillonné est inférieur à 12 µm (basse massique) (tableaux 5 et 7). Le tableau 13 et les figures 4 A et 4 B, aux pages 64, 66 et 67 respectivement, présentent les concentrations des principaux contaminants ainsi que les teneurs respectives des SEN et des critères C de ces contaminants.

On retrouve une forte contamination en hydrocarbures pétroliers dans le secteur étudié de la zone portuaire de Montréal. En effet, des concentrations de plus de 24 000 ppm y sont présentes (tableau 6). Le produit pétrolier majeur est le diesel. En dépit du fait que les caractéristiques d'un diesel semblent bien définies, il demeure que, concrètement, le mélange diesel contient plus de 200 composés. Sa composition peut varier de façon significative en fonction de la source. À l'exception du phénanthrène, on ne retrouve pas d'autres contaminants organiques présents à des quantités supérieures au seuil d'effet néfaste (SEN). La littérature indiquant que la majorité des composants organiques est enlevée de façon proportionnelle aux hydrocarbures pétroliers, nous avons présumé que le phénanthrène ne dérogeait pas à cette règle. Donc, lors des caractérisations subséquentes, seuls les hydrocarbures pétroliers ont été analysés afin de minimiser les coûts d'analyses.

Tableau 4 : Résultats d'analyses des composés organiques et inorganiques des sédiments de la zone portuaire de Québec —Lot-2 (basse Van Veen)

Types d'analyse : Fluorescence X (ppm)

Fluorescence X (%)

Echantillon	%sec	Ba	Co	Cu	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	Sr	V	Y	Zn	Zr	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	K2O	CaO	TiO2	MnO	Fe2O3	PTF	TFe2O3
Limite		50	2	4	2	2	3	5	3	3	5	4	5	3	0.1	0.05	0.02	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.1	1100°C	
<12µ	23.7%	920	31	233	21	10	71	131	102	282	121	26	1274	157												
>12µ	11.0%	809	14	440	13	16	35	210	56	382	92	42	441	703												
<325M / 45µ	34.7%	533	22	177	18	11	48	63	87	298	98	30	1430	320	2.3	2.93	14.10	56.44	0.32	2.62	3.65	1.18	0.12	7.7	8.34	100.06
<200M / 75µ	12.7%	471	<5	307	10	9	30	55	64	375	63	31	3384	534	2.9	1.71	12.77	63.45	0.29	2.40	3.68	0.98	0.08	5.7	3.72	98.25
<100M / 150µ	19.4%	566	7	442	14	14	48	73	68	384	51	27	3788	361	2.9	1.44	12.86	63.84	0.22	2.53	3.26	0.87	0.08	6.4	3.02	98.05
>100M / 150µ	33.2%	416	8	346	16	7	61	43	62	350	36	13	519	82	2.6	0.95	11.18	62.77	0.10	2.41	3.50	0.35	0.05	4.6	11.26	99.94
Total	100.0%	493	12	301	16	10	50	57	72	342	64	24	1829	276	2.6	1.83	12.72	60.87	0.22	2.50	3.53	0.82	0.08	6.2		

Critères SEN 50 86 61 170 540

Activation neutronique (ppm)

Fluorescence atomique (ppm)

Absorption atomique (ppm)

Soufre Organiques

Echantillon	%sec	As	As	As	Br	Co	Cu	Cr	Eu	Hf	Hg	La	Li	Mn	Nb	Ni	Os	Pb	Se	Sr	Ta	Tb	Ti	Tm	U	V	Zn	Zr	Hg	Barite	%	COY %
Limite		5	1	0.005	1	2	5	0.5	0.1	0.2	0.5	0.5	0.05	5	5	0.2	0.1	2	0.05	0.3	0.1	0.2	0.2	0.5	2	0.2	0.005	5	3	0.01		
<325M / 45µ	34.7%	<5	13	0.021	12	100	111	3.3	1.9	10.0	1.1	46.4	0.44	<5	51	4.3	14.1	<2	8.31	1.0	1.1	9.5	0.3	2.2	4	3	0.4	<5	11	0.49	2.31	
<200M / 75µ	12.7%	<5	16	0.009	4	67	112	1.1	1.8	16.5	0.9	30.0	0.43	<5	38	1.6	9.4	<2	7.23	0.7	1.0	4.9	0.5	1.4	<2	3.5	0.34	<5	18	0.46	1.01	
<100M / 150µ	19.4%	<5	18	0.019	3	55	113	1.2	1.7	11.5	0.8	26.1	0.40	<5	29	2.0	8.8	<2	5.96	0.7	0.8	3.8	0.3	1.2	<2	2.5	0.44	<5	18	0.48	0.97	
>100M / 150µ	33.2%	<5	6	<0.005	3	34	114	1.3	1.2	2.6	<5	17.4	0.16	<5	16	1.2	5.2	<2	3.15	0.4	0.4	2.6	<2	1.0	<2	1.3	0.11	<5	<3	0.43	6.05	
Total	100.0%	<5	12	0.014	6	65	115	1.9	1.6	8.7	0.8	30.8	0.34	<5	33	2.5	9.5	<2	6.00	0.7	0.8	5.5	0.3	1.5	<2	2.4	0.3	<5	18	0.46	3.13	

Critères SEN 17 100 1 3 10

Tableau 5 : Résultats d'analyses des composés organiques et inorganiques des sédiments de la zone portuaire de Montréal —F-2

Types d'analyse : Fluorescence X (ppm)

Fluorescence X (ppm)

Echantillon	%sec	Ba	Co	Cu	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	Sn	Sr	V	Y	Zn	Zr	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	K2O	CaO	TiO2	MnO	Fe2O3	PTF	TFe2O3
Limite		50	2	4	2	2	3	5	3	10	3	5	4	5	3	0.1	0.05	0.02	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.1	1100°C	
<12µ	55.3%	2754	19	1992	12	5	149	164	80	351	100	22	737	137													
>12µ	11.0%	8849	12	1288	13	9	81	64	42	542	78	24	1009	412													
<325M / 45µ	66.3%	2769	17	1714	15	9	156	115	72	<10	359	94	23	819	190	1.4	2.71	11.14	45.31	0.62	2.17	6.39	0.69	0.09	5.9	20.73	97.85
<200M / 75µ	12.0%	1549	13	2165	14	12	129	83	60	<10	383	79	20	550	257	1.8	2.49	10.15	50.18	0.65	2.00	7.50	0.64	0.09	5.4	16.70	98.17
<100M / 150µ	11.2%	676	12	3438	12	15	117	82	63	<10	399	77	19	324	184	2.0	2.04	11.18	55.28	0.47	2.19	7.25	0.63	0.09	5.9	12.26	99.85
>100M / 150µ	10.5%	359	12	3442	13	10	121	143	61	<10	418	70	13	198	86	1.4	1.66	9.69	49.94	0.37	1.78	9.64	0.48	0.07	4.6	17.21	97.41
Total	100.0%	2135	15	2143	14	10	145	110	68	<10	373	88	21	533	186	1.5	2.50	10.87	47.50	0.58	2.11	6.96	0.66	0.09	5.7		

Critères SEN

50 86

61 170

540

Activation neutronique (ppm)

Fluorescence atomique (ppm)

Absorption atomique (ppm)

Soufre Organiques

Echantillon	%sec	Ag	As	Au	Bt	Ca	Cr	Cs	Eu	Hf	Hg	Li	Lv	Mn	Nd	Pb	Sc	Se	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tm	Tl	W	Yb	Hg	Ba	Pb	%	COT %
Limite		5	1	0.005	1	2	5	0.5	0.1	0	0.5	0.5	0.05	5	5	0.2	0.1	2	10	0.05	0.3	0.1	0.2	0.2	0.5	2	0.2	0.005	5	3	0.01	
<325M / 45µ	66.3%	41	59	1.370	32	92	725	3.1	1.4	6	1.5	46.7	0.37	5	42	25.6	10.8	138	<10	7.08	0.7	0.7	8.0	<2	1.5	3	2.1	1.48	<5	7	0.80	7.55
<200M / 75µ	12.0%	35	78	1.254	24	73	491	2.0	1.4	8.5	1.0	37.4	0.34	<5	35	14.1	8.8	87	<10	6.15	0.8	0.6	6.0	0.2	2.1	2	2.1	0.88	<5	7	0.72	4.75
<100M / 150µ	11.2%	13	41	0.375	21	54	318	1.9	1.3	5.9	0.8	27.0	0.29	<5	25	7.7	8.5	70	<10	4.88	0.8	0.5	4.8	0.2	1.5	2	1.9	0.65	<5	<3	0.68	3.53
>100M / 150µ	10.5%	6	45	0.245	16	46	273	2.2	1.1	3	0.5	23.6	0.21	<5	20	7.2	7.1	48	<10	3.74	0.8	0.8	4.7	0.2	1.8	3	1.5	0.71	<5	<3	0.75	5.29
Total	100.0%	33	69	1.127	28	81	502	2.7	1.4	6	1.3	41.0	0.3	<5	37	20.3	9.9	115	<10	6.37	0.7	0.7	7.1	0.2	1.6	2	2.0	1.23	<5	4	0.77	6.53

Critères SEN

17

100

1

3

10

Tableau 6 : Résultats d'analyses des composés organiques et inorganiques des sédiments de la zone portuaire de Montréal — B-27

Types d'analyse : Fluorescence X (ppm)

Fluorescence X (µg)

Echantillon	%sec	Ba	Co	Cu	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	Sr	Y	Y	Zn	Zr	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	K2O	CaO	TiO2	MnO	Fe2O3	PTF	TFe2O3
Limite		50	2	4	2	2	3	5	3	3	5	4	5	3	0.1	0.05	0.02	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.1	1100°C	
<325M / 45µ	60.5%	1725	17	1490	10	9	152	107	80	314	92	22	803	206	1.5	2.76	11.54	46.08	0.68	2.28	5.93	0.72	0.09	6.1	20.80	98.95
<200M / 75µ	10.5%	1462	14	2690	15	224	128	87	57	373	75	22	799	336	1.9	2.29	10.37	51.44	0.86	2.04	7.47	0.68	0.10	5.6	15.35	98.51
<100M / 150µ	13.1%	764	13	3957	12	24	105	71	60	402	76	23	331	245	2.1	2.03	11.22	55.36	0.44	2.24	7.17	0.72	0.09	5.8	10.37	98.17
>100M / 150µ	15.9%	381	8	4125	14	6	98	95	59	412	63	11	213	96	1.7	1.73	10.21	53.43	0.33	2.10	9.52	0.52	0.07	4.5	13.89	98.58
Total	100.0%	1358	15	2382	11	33	138	98	72	347	84	20	646	207	1.6	2.45	11.16	49.03	0.59	2.21	6.82	0.68	0.09	5.7		

Critères SEN 50 86 61 170 540

Activation neutronique (ppm)

Fluorescence atomique (ppm)

Absorption atomique (ppm)

Soufre Organiques

Echantillon	%sec	Ag	As	Au	Bt	Ce	Cr	Cu	Hf	Hg	Ir	La	Li	Mn	Nb	Ni	Pb	Sb	Se	Sm	Ti	Tl	Tm	V	Zn	Zr	%	COT %			
Limite		5	1	0.005	1	2	5	0.5	0.1	0.2	0.5	0.5	0.05	5	5	0.2	0.1	2	0.05	0.3	0.1	0.2	0.2	0.5	2	0.2	0.05	5	3	0.01	
<325M / 45µ	60.5%	17	15	0.685	42	96	718	3.6	1.4	6.2	1.2	47.3	0.36	<5	42	25.0	11	91	7.27	1.0	0.8	8.6	<2	2.3	3	2.0	1.48	<5	0.73	7.94	
<200M / 75µ	10.5%	14	13	0.482	26	67	414	1.8	1.4	10.9	0.9	33.9	0.38	<5	34	12.3	8.8	75	6.03	2.0	0.7	5.6	0.4	1.9	2	2.1	0.96	<5	0.68	4.58	
<100M / 150µ	13.1%	8	12	0.218	17	56	231	1.8	1.3	7.6	0.8	27.4	0.36	<5	28	5.9	8.7	79	5.09	0.8	0.7	4.9	0.2	1.5	<2	2.2	0.53	<5	0.67	2.93	
>100M / 150µ	15.9%	6	12	0.081	13	46	222	2.0	1.0	3.1	<5	23.0	0.24	<5	26	5.6	7.2	69	3.76	0.7	0.5	4.7	<2	1.3	2	1.5	0.75	<5	0.74	4.28	
Total	100.0%	14	15.5	0.507	32	80	378	2.9	1.3	6.4	1.0	39.4	0.34	<5	37	18.1	10.1	84	6.30	1.0	0.7	7.2	<2	2.0	3	2.0	1.19	<5	0.72	6.35	

Critères SEN 17 100 1 3 10

Organiques	SEN et SEL*	Critères
Hydrocarbures pétroliers (ppm)	24000	
Produits pétroliers présents	Diesel	
Phénanthrène (ppm)	6.2	2.3 (0.8*2.93)
Carbone total (ppm c)	84000	
Carbone organique total (ppm c)	59000	100000*
Phosphore total (ppm p)	870	2000*

Organiques		
H & G minérales (mg/kg) <325M/45µ		33000
H & G minérales (mg/kg) >325M/45µ		20000
H & G minérales (mg/kg) >200M/75µ		5300
H & G minérales (mg/kg) >100M/150µ		14800
H & G minérales (mg/kg) >30M/600µ		62300
H & G minérales (mg/L) eau bas <325M/45µ		0.8
H & G minérales (mg/L) eau haut <325M/45µ		<0.2

Certains résultats d'analyses des huiles et graisses présentés sont issus de l'ancienne méthode qui a été remplacée par la méthode hydrocarbures pétroliers C10-C50

* SEL : Severe Effect Level. Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario

Tableau 7 : Résultats d'analyses des composés organiques et inorganiques des sédiments de la zone portuaire de Montréal —B-22-28

Types d'analyse : Fluorescence X (ppm) Fluorescence X (%)

Echantillon	%sec	Ba	Co	Cu	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	Sr	V	Y	Zn	Zr	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	K2O	CaO	TiO2	MnO	Fe2O3	PTF	TFe2O3
Limite		50	2	4	2	2	3	5	3	3	5	4	5	3	0.1	0.05	0.02	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.1	1100°C	
<12µ	52.9%	880	24	1377	11	23	135	252	89	301	107	25	926	125												
>12µ	6.5%	8849	12	1288	13	9	61	64	42	542	78	24	1009	412												
<325M / 45µ	59.4%	1652	16	1241	16	33	116	108	87	318	92	27	753	221	1.5	2.87	11.78	46.89	0.64	2.36	5.87	0.71	0.09	6.2	19.17	98.59
<200M / 75µ	11.0%	1281	13	2409	7	6	108	86	57	363	76	15	723	340	1.8	2.39	10.22	50.38	0.66	2.05	7.29	0.67	0.09	5.6	16.14	97.92
<100M / 150µ	12.9%	772	14	3706	14	15	99	72	63	407	75	22	334	238	1.8	1.74	10.09	50.50	0.36	2.01	6.20	0.66	0.08	5.3	9.93	89.19
>100M / 150µ	16.7%	346	14	4540	9	11	104	105	57	388	67	15	191	88	1.5	1.64	9.93	52.46	0.29	1.77	8.97	0.51	0.06	4.9	13.91	96.54
Total	100.0%	1280	15	2238	14	24	111	100	76	346	84	23	602	214	1.6	2.47	11.08	48.67	0.55	2.18	6.59	0.67	0.08	5.8		

Critères SEN 50 86 81 170 540

Activation neutronique (ppm) Fluorescence atomique (ppm) Absorption atomique (ppm) Soufre Organiques

Echantillon	%sec	Ag	As	Au	Br	Ce	Cl	Cr	Cu	Eu	Hf	Ho	Ia	Iu	Mo	Nd	Sb	Se	Sn	Ta	Tb	Ti	Tm	V	Vb	Hg	Pb	Pt	%	COT %	
Limite		5	1	0.005	0.5	2	5	0.5	0.1	0.2	0.5	0.5	0.05	5	5	0.2	0.1	2	0.05	0.3	0.1	0.2	0.2	0.5	2	0.2	0.005	5	3	0.01	
<325M / 45µ	59.4%	16	38	0.523	41	97	538	3.4	1.5	6.6	1.1	46.4	0.36	<5	41	20.9	11.5	76	7.15	0.9	0.7	8.6	0.3	1.8	3	1.9	1.41	<5	7	0.66	7.10
<200M / 75µ	11.0%	13	48	0.449	29	67	361	2.0	1.4	10.3	0.9	34.2	0.39	<5	34	12.9	8.7	69	6.10	0.8	0.7	5.3	<2	2.0	3	2.2	1.12	<5	6	0.68	5.17
<100M / 150µ	12.9%	8	45	0.183	17	54	271	1.7	1.3	7.7	0.5	26.5	0.36	<5	27	5.8	8.7	74	4.96	0.8	0.7	4.5	0.3	1.6	2	2.3	0.45	<5	<3	0.64	2.71
>100M / 150µ	16.7%	<5	37	0.098	13	43	234	2.1	1.1	2.7	<5	22.6	0.23	18	21	5.0	7.0	46	3.60	0.8	0.4	4.6	<2	2.2	<2	1.3	0.55	<5	<3	1.01	4.65
Total	100.0%	13	48	0.400	32	79	434	2.8	1.4	6.5	0.9	38.5	0.34	<5	35	15.4	10.1	70	6.16	0.9	0.6	7.0	0.3	1.9	3	1.9	1.11	<5	7	0.72	5.91

Critères SEN 17 100 1 3 10

2.2.5 Analyse modale

L'interprétation modale effectuée à partir des résultats soumis consiste en la conciliation des résultats d'analyse par diffraction des rayons X (qui permettent d'identifier les phases cristallines présentes) et les divers résultats des analyses chimiques. On peut alors calculer les proportions probables de chaque minéral dans le sédiment analysé. Posé sous forme d'un bilan granulométrique, on peut alors évaluer si les contaminations métalliques peuvent être associées à « l'apparition » d'un minéral plus commun, ce qui aurait été le cas lors d'une contamination systématique due à des déversements par exemple lors de transbordement de minerais.

Les tableaux 8, 9, 10, 11 et 12, présentés aux pages suivantes, sont divisés en six parties. Les portions de gauche présentent les résultats « bruts » :

1. Analyse chimique des sédiments (seuls les oxydes essentiels à l'interprétation modale ont été retenus, c'est pourquoi les totaux sont toujours loin de 100%. Généralement, le reste est occupé par l'alumine et la chaux).
2. Interprétation modale où sont inscrites les proportions probables de chaque minéral identifié.
3. Les dosages des contaminants métalliques les plus importants.

La portion de droite de ces tableaux présente :

4. La distribution en % des oxydes en fonction des tranches granulométriques;
5. la distribution en % des minéraux dont les proportions ont été établies par l'analyse modale
6. la distribution en % des contaminants en fonction des tranches granulométriques.

La contamination est pour l'essentiel répartie parmi toutes les fractions granulométriques, ce qui devrait impliquer le traitement de l'ensemble du matériel dragué pour les zones portuaires de Québec et de Montréal (voir figure 2 A et 2 B). Il y a plusieurs familles de contaminants. Ainsi, en prenant exemple sur « Montréal F 2 », on note aisément que l'antimoine, le cadmium et l'or constituent une famille particulièrement importante dans la portion fine des sédiments. À l'inverse, le cuivre et le plomb dominant dans la fraction grossière et pourraient donc être le fait de la sédimentation de poussières minéralisées en chalcopryrite et/ou galène.

Tableau 8 : Résultats de l'analyse modale et rappel du bilan métallurgique du Lot-1 (Grue) de la zone portuaire de Québec

Produit	Poids (%)	Analyses chimiques											
		Na ₂ O (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	PAF (%)	CO _T (%)	CO ₂ (%)	S (%)	TOT (%)
-45 µm	25.2	2.0	2.8	54.2	0.3	2.6	1.1	7.9	10.2	3.0	6.00	1.2	81.1
-75 µm	8.9	2.7	1.6	63.8	0.3	2.5	1.0	6.7	3.8	1.3	1.60	0.9	82.4
-150 µm	15.8	2.9	1.4	64.3	0.2	2.5	0.8	7.5	2.9	1.4	0.80	0.7	82.5
+150 µm	50.0	2.4	0.8	60.2	0.1	2.2	0.3	3.9	13.9	10.6	2.90	0.4	83.8
Souche	99.9	2.4	1.5	59.7	0.2	2.4	0.6	5.7	10.3	6.4	3.23	0.7	82.8

Distribution des oxydes						
Na ₂ O (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
21.0	48.0	22.9	41.1	27.6	43.1	34.8
10.0	9.7	9.5	14.5	9.4	13.8	10.4
19.1	15.1	17.0	17.2	16.6	19.7	20.7
49.9	27.2	50.5	27.2	46.4	23.3	34.1
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Produit	Poids (%)	Interprétation modale											
		QTZ (%)	PLA (%)	KFE (%)	DOL (%)	CAL (%)	APA (%)	ILM (%)	MAG (%)	SUL (%)	ORG (%)	ACM (%)	Total (%)
-45 µm	25.2	27.5	16.7	13.0	1.6	11.9	0.7	2.1	4.1	2.6	3.0	16.8	100.0
-75 µm	8.9	32.3	22.5	12.5	0.9	2.6	0.7	1.9	3.6	2.0	1.3	19.7	100.0
-150 µm	15.8	31.8	24.2	12.5	0.8	1.0	0.5	1.5	4.5	1.5	1.4	20.4	100.0
+150 µm	50.0	31.6	20.0	11.0	0.5	6.1	0.2	0.6	2.4	0.9	10.6	16.2	100.0
Souche	99.9	30.6	20.0	11.9	0.8	6.4	0.4	1.2	3.3	1.5	6.4	17.3	100.0

Distribution minérale						
QTZ (%)	PLA (%)	KFE (%)	DOL (%)	CAL (%)	APA (%)	ILM (%)
22.7	21.0	27.6	48.0	46.6	41.1	43.1
9.4	10.0	9.4	9.7	3.7	14.5	13.8
16.4	19.1	16.6	15.1	2.3	17.2	19.7
51.5	49.9	46.4	27.2	47.4	27.2	23.3
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Produit	Poids (%)	Principaux métaux contaminants											
		Co (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Ag (ppm)	Zn (ppm)	As (ppm)	Au (ppm)	Cr (ppm)	Sb (ppm)	Hg (ppm)	Cd (ppm)
-45 µm	25.2	26	322	49	117	<5	2629	20	0.0	134	4	0.5	22
-75 µm	8.9	0	682	15	79	<5	6681	31	0.0	124	3	0.5	38
-150 µm	15.8	8	645	25	70	<5	5072	20	0.0	128	2	0.5	26
+150 µm	50.0	6	627	32	38	<5	387	6	0.0	137	1	0.1	0
Souche	99.9	11	558	34	67	<5	2254	14	0.0	134	2	0.3	13

Distribution des métaux contaminants						
Cu (%)	Ni (%)	Pb (%)	Ag (%)	Zn (%)	As (%)	Au (%)
14.6	36.7	44.3	n.a	29.4	36.1	6.3
10.9	4.0	10.6	n.a	26.4	19.8	11.2
18.3	11.7	16.6	n.a	35.6	22.6	19.8
56.3	47.6	28.5	n.a	8.6	21.5	62.7
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Légende QTZ: Quartz ; PLA: Feldspath plagioclase ; KFE: Feldspath potassique ; DOL: Dolomite ; CAL: Calcite ; APA: Apatite ; ILM: Ilménite
MAG: Magnétite ; SUL: Sulfures (essentiellement la pyrite) ; ACM: ensemble des Amphiboles, Chlorites et Micas

Tableau 9 : Résultats de l'analyse modale et rappel du bilan métallurgique du Lot-2 (benne Van Veen) de la zone portuaire de Québec

Produit	Poids (%)	Analyses chimiques											
		Na2O (%)	MgO (%)	SiO2 (%)	P2O5 (%)	K2O (%)	TiO2 (%)	Fe2O3 (%)	PAF (%)	COT (%)	CO2 (%)	S (%)	TOT (%)
-45 µm	34.7	2.3	2.9	56.4	0.3	2.6	1.2	7.7	8.3	2.3	5.50	0.5	81.7
-75 µm	12.7	2.9	1.7	63.5	0.3	2.4	1.0	5.7	3.7	1.0	2.20	0.5	81.2
-150 µm	19.4	2.9	1.4	63.8	0.2	2.5	0.9	6.4	3.0	1.0	1.50	0.5	81.1
+150 µm	33.2	2.6	1.0	62.8	0.1	2.4	0.4	4.6	11.3	6.1	4.80	0.4	85.2
Souche	100.0	2.6	1.8	60.9	0.2	2.5	0.9	6.2	7.7	3.1	4.07	0.5	82.7

Distribution des oxydes						
Na2O (%)	MgO (%)	SiO2 (%)	P2O5 (%)	K2O (%)	TiO2 (%)	Fe2O3 (%)
30.8	55.1	32.2	48.6	36.3	48.9	43.3
14.2	11.8	13.3	17.8	12.2	14.9	11.7
21.7	14.9	20.3	18.1	19.5	20.5	20.1
33.3	18.2	34.3	15.5	32.0	15.6	24.8
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Produit	Poids (%)	Interprétation modale											
		QTZ (%)	PLA (%)	KFE (%)	DOL (%)	CAL (%)	APA (%)	ILM (%)	MAG (%)	SUL (%)	ORG (%)	ACM (%)	Total (%)
-45 µm	34.7	27.9	19.2	13.0	1.6	10.7	0.7	2.3	4.5	1.1	2.3	16.6	100.0
-75 µm	12.7	31.4	24.2	12.0	1.0	3.9	0.7	1.9	3.2	1.1	1.0	19.7	100.0
-150 µm	19.4	31.4	24.2	12.5	0.8	2.5	0.5	1.7	3.8	1.1	1.0	20.6	100.0
+150 µm	33.2	32.2	21.7	12.0	0.6	10.3	0.2	0.8	2.9	0.9	6.1	12.4	100.0
Souche	100.0	30.5	21.6	12.4	1.0	8.1	0.5	1.6	3.7	1.0	3.1	16.4	100.0

Distribution minérale						
QTZ (%)	PLA (%)	KFE (%)	DOL (%)	CAL (%)	APA (%)	ILM (%)
31.8	30.8	36.3	55.1	45.7	48.6	48.9
13.1	14.2	12.2	11.8	6.2	17.8	14.9
20.0	21.7	19.5	14.9	6.1	18.1	20.5
35.1	33.3	32.0	18.2	42.0	15.5	15.6
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Produit	Poids (%)	Principaux métaux contaminants											
		Co (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Ag (ppm)	Zn (ppm)	As (ppm)	Au (ppm)	Cr (ppm)	Sb (ppm)	Hg (ppm)	Cd (ppm)
-45 µm	34.7	22	177	48	63	<5	1430	13	0.0	131	4.3	0.4	11
-75 µm	12.7	<5	307	30	55	<5	3384	16	0.0	110	1.6	0.3	19
-150 µm	19.4	7	442	48	73	<5	3768	19	0.0	133	2.0	0.4	19
+150 µm	33.2	8	346	61	43	<5	519	6	0.0	132	1.2	0.1	<3
Souche	100.0	12	301	50	57	<5	1829	12	0.0	129	2.5	0.3	11

Distribution des métaux contaminants						
Cu (%)	Ni (%)	Pb (%)	Ag (%)	Zn (%)	As (%)	Au (%)
20.4	33.3	38.2	34.7	27.1	36.9	41.3
13.0	7.6	12.2	12.7	23.5	16.6	7.6
28.5	18.6	24.7	19.4	40.0	30.2	11.6
38.2	40.5	24.9	33.2	9.4	16.3	39.5
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Légende QTZ: Quartz ; PLA: Feldspath plagioclase ; KFE: Feldspath potassique ; DOL: Dolomite ; CAL: Calcite ; APA: Apatite ; ILM: Ilménite
MAG: Magnétite ; SUL: Sulfures (essentiellement la pyrite) ; ACM: ensemble des Amphiboles, Chlorites et Micas

Tableau 10 : Résultats de l'analyse modale et rappel du bilan métallurgique de l'échantillon B-27 de la zone portuaire de Montréal

Produit	Poids (%)	Analyses chimiques											
		Na ₂ O (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	PAF (%)	COT (%)	CO ₂ (%)	S (%)	TOT (%)
-45 µm	60.5	1.5	2.8	46.1	0.7	2.3	0.7	6.1	20.8	7.9	12.24	0.7	81.0
-75 µm	10.5	1.9	2.3	51.4	0.7	2.0	0.7	5.6	15.4	4.6	10.10	0.7	80.0
-150 µm	13.1	2.1	2.0	55.4	0.4	2.2	0.7	5.8	10.4	2.9	6.80	0.7	79.0
+150 µm	15.9	1.7	1.7	53.4	0.3	2.1	0.5	4.5	13.9	4.3	8.91	0.7	78.1
Souche	100.0	1.7	2.5	49.0	0.6	2.2	0.7	5.8	17.8	6.3	10.77	0.7	80.2

Distribution des oxydes						
Na ₂ O (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
54.9	68.6	56.9	70.9	62.6	63.7	64.1
12.1	9.8	11.0	12.3	9.4	10.9	10.2
16.6	10.6	14.8	8.8	13.0	13.6	13.2
16.4	11.0	17.3	8.0	15.0	11.8	12.4
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Produit	Poids (%)	Interprétation modale											
		QTZ (%)	PLA (%)	KFE (%)	DOL (%)	CAL (%)	APA (%)	ILM (%)	MAG (%)	SUL (%)	ORG (%)	ACM (%)	Total (%)
-45 µm	60.5	24.1	12.5	11.5	1.6	26.1	1.7	1.3	3.6	1.4	7.9	8.3	100.0
-75 µm	10.5	27.3	15.8	10.0	1.3	21.5	1.7	1.3	3.1	1.5	4.6	11.8	100.0
-150 µm	13.1	29.1	17.5	11.0	1.1	14.2	1.0	1.3	3.3	1.5	2.9	17.1	100.0
+150 µm	15.9	29.6	14.2	10.5	1.0	19.2	0.7	0.9	2.4	1.5	4.3	15.7	100.0
Souche	100.0	26.0	13.8	11.1	1.4	23.0	1.4	1.3	3.3	1.5	6.3	11.0	100.0

Distribution minérale						
QTZ (%)	PLA (%)	KFE (%)	DOL (%)	CAL (%)	APA (%)	ILM (%)
56.2	54.9	62.6	68.6	68.7	70.9	63.7
11.0	12.1	9.4	9.8	9.8	12.3	10.9
14.7	16.6	13.0	10.6	8.1	8.8	13.6
18.1	16.4	15.0	11.0	13.3	8.0	11.8
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Produit	Poids (%)	Principaux métaux contaminants											
		Co (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Ag (ppm)	Zn (ppm)	As (ppm)	Au (ppm)	Cr (ppm)	Sb (ppm)	Hg (ppm)	Cd (ppm)
-45 µm	60.5	17	1480	152	107	17	803	49	0.7	745	25.0	1.5	5
-75 µm	10.5	14	2690	128	87	14	789	42	0.5	424	12.3	1.0	6
-150 µm	13.1	13	3957	105	71	8	331	47	0.2	281	5.9	0.5	<3
+150 µm	15.9	8	4125	98	95	6	213	42	0.1	272	5.6	0.8	<3
Souche	100.0	15	2352	135	98	14	646	47	0.5	575	18.1	1.2	5

Distribution des métaux contaminants						
Cu (%)	Ni (%)	Pb (%)	Ag (%)	Zn (%)	As (%)	Au (%)
38.1	68.3	65.9	74.8	75.2	63.2	82.0
12.0	10.0	9.3	10.7	12.8	9.4	9.9
22.0	10.2	9.5	7.6	6.7	13.1	5.7
27.9	11.6	15.4	6.9	5.2	14.2	2.5
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Légende QTZ: Quartz ; PLA: Feldspath plagioclase ; KFE: Feldspath potassique ; DOL: Dolomite ; CAL: Calcite ; APA: Apatite ; ILM: Ilménite
MAG: Magnétite ; SUL: Sulfures (essentiellement la pyrite) ; ACM: ensemble des Amphiboles, Chlorites et Micas

Tableau 11 : Résultats de l'analyse modale et rappel du bilan métallurgique de l'échantillon F-2 de la zone portuaire de Montréal

Produit	Poids (%)	Analyses chimiques											
		Na2O (%)	MgO (%)	SiO2 (%)	P2O5 (%)	K2O (%)	TiO2 (%)	Fe2O3 (%)	PAF (%)	COT (%)	CO2 (%)	S (%)	TOT (%)
-45 µm	66.3	1.4	2.7	45.3	0.6	2.2	0.7	5.9	20.7	7.6	12.30	0.8	79.5
-75 µm	12.0	1.8	2.5	50.2	0.7	2.0	0.6	5.4	16.7	4.8	11.20	0.7	79.9
-150 µm	11.2	2.0	2.0	55.3	0.5	2.2	0.6	5.9	12.3	3.5	8.10	0.7	80.8
+150 µm	10.5	1.4	1.7	49.9	0.4	1.8	0.5	4.6	17.2	5.3	11.10	0.8	77.5
Souche	100.0	1.5	2.5	47.5	0.6	2.1	0.7	5.7	18.9	6.6	11.57	0.8	79.5

Distribution des oxydes						
Na2O (%)	MgO (%)	SiO2 (%)	P2O5 (%)	K2O (%)	TiO2 (%)	Fe2O3 (%)
61.3	71.8	63.2	68.6	68.4	70.8	68.6
14.3	12.0	12.7	14.5	11.2	11.0	11.4
14.8	9.0	13.0	9.7	11.5	10.2	11.6
9.7	7.2	11.0	7.2	8.9	8.0	8.5
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Produit	Poids (%)	Interprétation modale											
		QTZ (%)	PLA (%)	KFE (%)	DOL (%)	CAL (%)	APA (%)	ILM (%)	MAG (%)	SUL (%)	ORG (%)	ACM (%)	Total (%)
-45 µm	66.3	24.2	11.7	11.0	1.5	26.3	1.4	1.3	3.3	1.7	7.6	10.0	100.0
-75 µm	12.0	26.8	15.0	10.0	1.4	23.9	1.7	1.1	3.1	1.5	4.8	10.7	100.0
-150 µm	11.2	29.5	16.7	11.0	1.1	17.2	1.2	1.1	3.4	1.5	3.5	13.8	100.0
+150 µm	10.5	28.9	11.7	9.0	1.0	24.2	1.0	0.9	2.4	1.7	5.3	13.9	100.0
Souche	100.0	25.6	12.6	10.7	1.4	24.8	1.4	1.2	3.2	1.7	6.6	10.9	100.0

Distribution minérale						
QTZ (%)	PLA (%)	KFE (%)	DOL (%)	CAL (%)	APA (%)	ILM (%)
62.7	61.3	68.4	71.8	70.4	68.6	70.8
12.6	14.3	11.2	12.0	11.6	14.5	11.0
12.9	14.8	11.5	9.0	7.8	9.7	10.2
11.9	9.7	8.9	7.2	10.3	7.2	8.0
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Produit	Poids (%)	Principaux métaux contaminants											
		Co (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Ag (ppm)	Zn (ppm)	As (ppm)	Au (ppm)	Cr (ppm)	Sb (ppm)	Hg (ppm)	Cd (ppm)
-45 µm	66.3	17	1714	156	115	41	619	98	1.4	724	25.6	1.5	7
-75 µm	12.0	13	2165	129	83	35	550	78	1.3	491	14.1	0.9	7
-150 µm	11.2	12	3438	117	82	13	324	81	0.4	310	7.7	0.7	<3
+150 µm	10.5	12	3442	121	143	6	198	65	0.2	273	7.2	0.7	<3
Souche	100.0	15	2143	145	110	33	533	90	1.1	602	20.3	1.2	6

Distribution des métaux contaminants						
Cu (%)	Ni (%)	Pb (%)	Ag (%)	Zn (%)	As (%)	Au (%)
53.0	71.5	69.1	81.2	76.9	72.0	81.0
12.1	10.7	9.0	12.5	12.4	10.4	13.4
18.0	9.1	8.3	4.4	6.8	10.1	3.7
16.9	8.8	13.6	1.9	3.9	7.6	1.9
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Légende QTZ: Quartz ; PLA: Feldspath plagioclase ; KFE: Feldspath potassique ; DOL: Dolomite ; CAL: Calcite ; APA: Apatite ; ILM: Ilménite
MAG: Magnétite ; SUL: Sulfures (essentiellement la pyrite) ; ACM: ensemble des Amphiboles, Chlorites et Micas

Tableau 12 : Résultats de l'analyse modale et rappel du bilan métallurgique de l'échantillon B-22-28 de la zone portuaire de Montréal

Produit	Poids	Analyses chimiques											
		Na ₂ O	MgO	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	PAF	CO _T	CO ₂	S	TOT
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
-45 µm	59.8	1.5	2.9	46.9	0.6	2.4	0.7	6.2	19.2	7.1	11.41	0.7	80.4
-75 µm	11.1	1.8	2.4	50.4	0.7	2.1	0.7	5.6	16.1	5.2	10.29	0.7	79.8
-150 µm	12.4	1.8	1.7	50.5	0.4	2.0	0.7	5.3	9.9	2.7	6.58	0.6	72.2
+150 µm	16.8	1.5	1.6	52.5	0.3	1.8	0.5	4.9	13.9	4.7	8.25	1.0	77.0
Souche	100.0	1.6	2.5	48.7	0.5	2.2	0.7	5.8	16.8	5.9	10.16	0.7	78.7

Distribution des oxydes						
Na ₂ O	MgO	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
56.7	69.4	57.6	69.7	64.6	63.7	64.0
12.9	10.7	11.5	13.3	10.4	11.1	10.7
14.0	8.7	12.8	8.1	11.4	12.3	11.2
16.4	11.2	18.1	8.9	13.6	12.9	14.1
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Produit	Poids	Interprétation modale											
		QTZ	PLA	KFE	DOL	CAL	APA	ILM	MAG	SUL	ORG	ACM	Total
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
-45 µm	59.8	24.6	12.4	11.8	1.6	24.2	1.5	1.3	3.6	1.4	7.1	10.3	100.0
-75 µm	11.1	26.7	15.3	10.3	1.4	21.9	1.6	1.3	3.2	1.5	5.2	11.9	100.0
-150 µm	12.4	27.2	14.8	10.1	1.0	13.9	0.9	1.2	3.0	1.4	2.7	24.0	100.0
+150 µm	16.8	30.4	12.8	8.9	0.9	17.7	0.7	1.0	2.4	2.2	4.7	18.4	100.0
Souche	100.0	26.1	13.1	10.9	1.4	21.6	1.3	1.3	3.3	1.6	5.9	13.6	100.0

Distribution minérale						
QTZ	PLA	KFE	DOL	CAL	APA	ILM
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
56.3	56.7	64.6	69.4	67.0	69.7	63.7
11.3	12.9	10.4	10.7	11.2	13.3	11.1
12.9	14.0	11.4	8.7	8.0	8.1	12.3
19.6	16.4	13.6	11.2	13.8	8.9	12.9
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Produit	Poids	Principaux métaux contaminants											
		Co	Cu	Ni	Pb	Ag	Zn	As	Au	Cr	Sb	Hg	Cd
	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
-45 µm	59.8	16	1241	116	108	16	753	39	0.5	536	20.9	1.4	7
-75 µm	11.1	13	2409	108	86	13	723	40	0.5	363	12.9	1.1	6
-150 µm	12.4	14	3706	99	72	8	334	45	0.2	271	5.8	0.5	<3
+150 µm	16.8	14	4540	104	105	<5	191	37	0.1	244	5.0	0.6	<3
Souche	100.0	15	2230	111	101	13	603	40	0.4	435	15.5	1.1	6

Distribution des métaux contaminants						
Cu	Ni	Pb	Ag	Zn	As	Au
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
33.3	62.5	64.2	74.5	74.6	59.0	77.8
12.0	10.8	9.5	11.2	13.3	11.2	12.5
20.6	11.0	8.9	7.7	6.8	14.1	5.6
34.2	15.7	17.5	6.5	5.3	15.7	4.2
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Légende QTZ: Quartz ; PLA: Feldspath plagioclase ; KFE: Feldspath potassique ; DOL: Dolomite ; CAL: Calcite ; APA: Apatite ; ILM: Ilménite
MAG: Magnétite ; SUL: Sulfures (essentiellement la pyrite) ; ACM: ensemble des Amphiboles, Chlorites et Micas

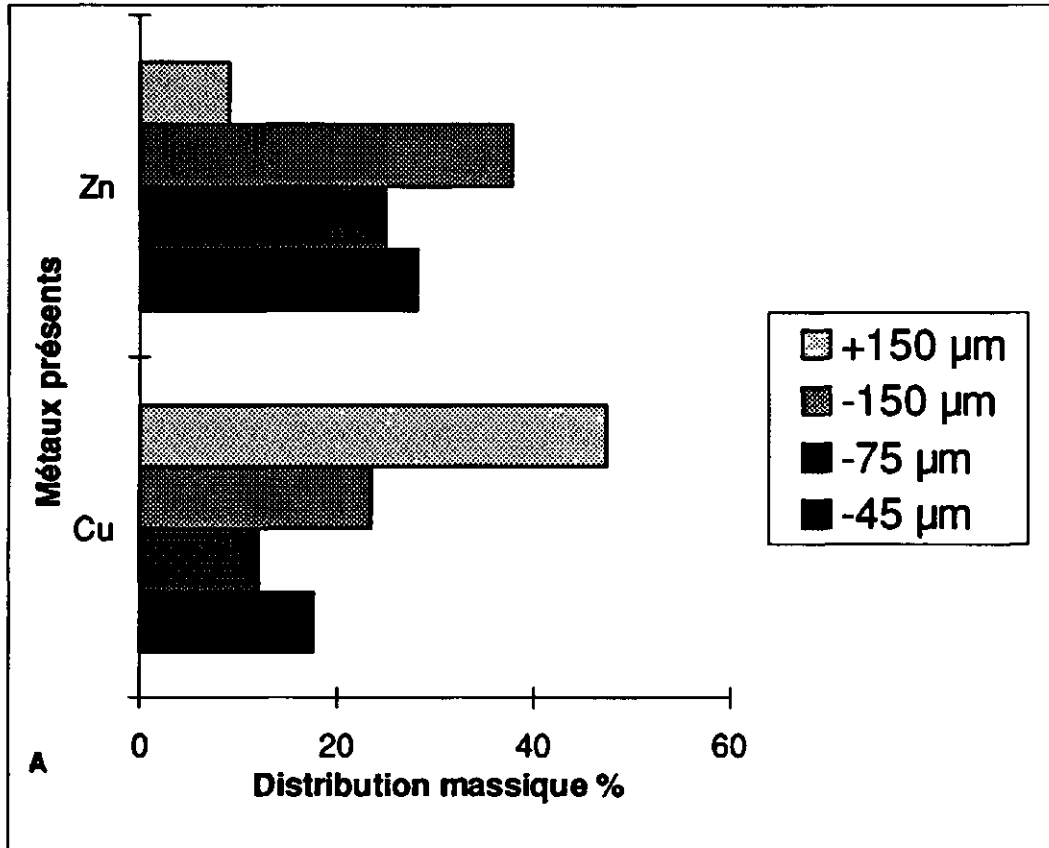


Figure 2 A: Distribution massique (%) des principaux contaminants par tranches granulométriques, A: zone portuaire de Québec.

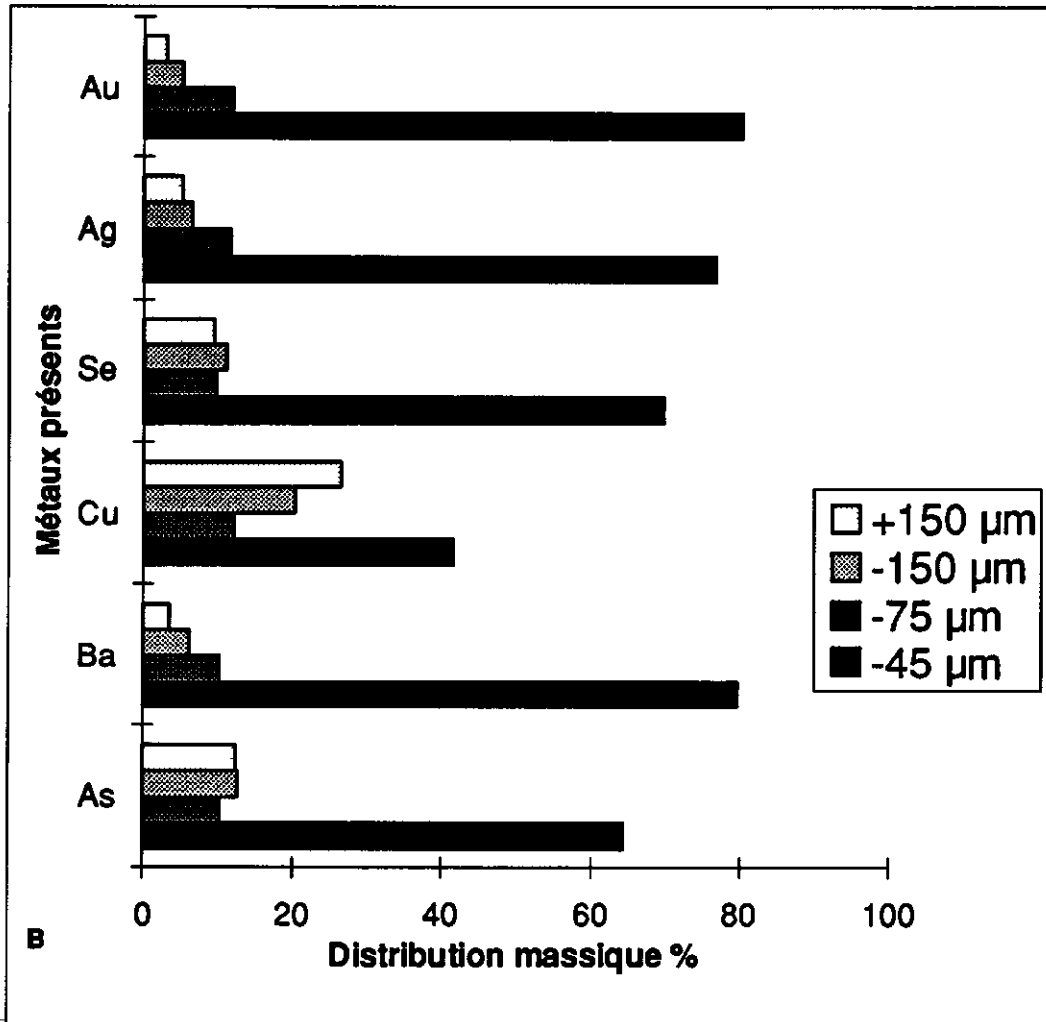


Figure 2 B: Distribution massique (%) des principaux contaminants inorganiques ainsi que de Au et Ag par tranches granulométriques, B : zone portuaire de Montréal.

2.2.6 Étude de l'état de libération

Les analyses modales faites sur les différentes fractions granulométriques n'ont pu déterminer la nature des différents contaminants inorganiques (sulfures, oxydes, hydroxydes...). Pour obtenir ces informations, il faut extraire les minéraux lourds contenant les contaminants des différentes fractions granulométriques (+150 μm , +75 μm , +45 μm).

La méthode utilisée pour faire cette extraction est appelée « liquide lourd ». Il s'agit simplement de mettre en contact du solide et un liquide de haute densité (iodure de méthylène, masse volumique = 3.30 g/cm^3). Les particules solides de masse volumique inférieure à 3.30 flottent alors sur le liquide et celles de masse volumique supérieure à 3.30 sédimentent au fond. On peut ainsi recueillir les minéraux lourds et identifier leur nature par diffraction X.

Trois sections polies furent fabriquées à partir de chacun des deux échantillons soumis (port de Québec lot-1 et port de Montréal B22-28). Ces sections furent étudiées en microscopie optique et microscopie électronique à balayage de façon à identifier les principaux minéraux porteurs de métaux et d'y reconnaître les principaux habitus (formes, textures) qui pourraient avoir un impact significatif sur les futurs travaux de concentration. Les photos 1 à 16 présentés dans cette section proviennent de l'examen des sections polies, elles montrent certains aspects des minéraux métalliques des fractions lourdes ($\rho > 3.3 \text{ g}/\text{cm}^3$). L'annexe VIII présente les photographies du montage utilisé pour l'extraction au liquide lourd.

Zone portuaire de Montréal

Tous les minéraux métalliques sont libres et potentiellement récupérables. Dans l'échantillon B22-28, l'essentiel du cuivre apparaît sous forme native ou sulfurée (artificielle) alors que les autres métaux semblent être essentiellement présents sous des formes naturelles. Ainsi, le zinc ne fut observé que dans la sphalérite (ZnS ; en gris neutre aux photos #7 et 8); le plomb dans la galène (PbS ; cubique et en blanc aux photos #7 et 8); le baryum dans la baryte (BaSO_4); le titane de l'hémo-ilménite (Fe_2O_3 et FeTiO_3 ; photos #1, 4, 5 et 8; en gris rose) et du rutile (TiO_2), et le chrome dans la chromite (FeCr_2O_4) ou dans l'eskolaïte (Cr_2O_3 ; il s'agit là d'une forme artificielle résultant du chauffage de la chromite; bulle ronde à la photo #4).

Le cuivre de cet échantillon présente tous les signes d'une précipitation in-situ, colloforme et certainement associée à des bactéries réductrices. Il s'ensuit toute une série de particules décorées où la chalcopryrite (CuFeS_2 ; en jaune), la covellite (CuS ; en bleu) et la bornite (Cu_5FeS_4 ; en rose plus ou moins orangé) se succèdent entre elles, avec divers espaces vides entre les "étages" (photos #2, 3, 4 et 8). Ces décorations partent aussi souvent d'autres particules solides, notamment des silicates (photo #3) ou de pyrite en cours d'oxydation (photos #1, 3 et 8).

Une étude supplémentaire (voir annexe IX) sur l'habitus du cuivre dans les sédiments confirme que le cuivre est essentiellement présent sous trois formes : la chalcopryrite (CuFeS_2), la bornite (Cu_5FeS_4) et la covellite (CuS). Ces sulfures peuvent être mélangés au sein d'une même particule, associés à des silicates ou, plus rarement, se présenter sous la forme d'une coquille vide. Dans ce dernier cas, les particules ont l'aspect d'une sphère creuse.

Bien qu'en faible quantité (115 ppm), le sélénium a été recherché en microscopie électronique à balayage (en utilisant la spectrométrie de dispersion de l'énergie). L'absence d'observation tend à démontrer que ce métal pourrait être en solution solide, en substitution avec le cuivre dans les sulfures.

On note aussi plusieurs particules de pyrite framboïdale (boule blanche à la photo #2). Ceci est nettement indicateur d'activité bactérienne anaérobie. On peut donc conclure que ces bactéries aient formé l'essentiel des particules de cuivre. L'alternance entre les minéraux s'expliquerait alors par les conditions dynamiques prévalant dans les sédiments (passage des conditions aérobiques où le cuivre se dépose sous des formes plus oxydées vers des conditions euxiniques où on peut atteindre la chalcopryrite).

Dans de telles conditions, il serait parfaitement normal de retrouver associés au cuivre les autres éléments chalcophiles (As, Sb, Hg etc.; excluant Ti, V et Cr) qui pourraient aussi être métabolisés par les bactéries. L'objectif de récupérer le cuivre devrait donc pouvoir permettre la récupération des autres métaux contaminants.

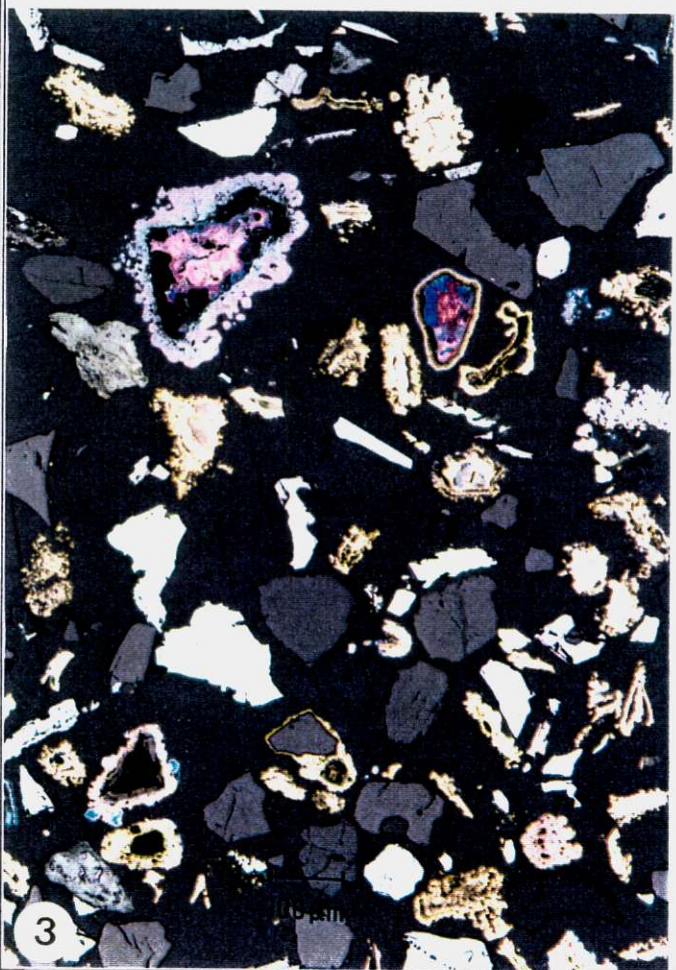
Notons finalement que la concentration de ces particules amène le problème de l'étalement de leur densité (parce qu'elles ne sont jamais massives). Cependant, il y a toujours en surface des liaisons "sulfures", que ce soit Zn-S, Fe-S ou Cu-S, c'est-à-dire que la surface de ces minéraux n'est pas oxydé.

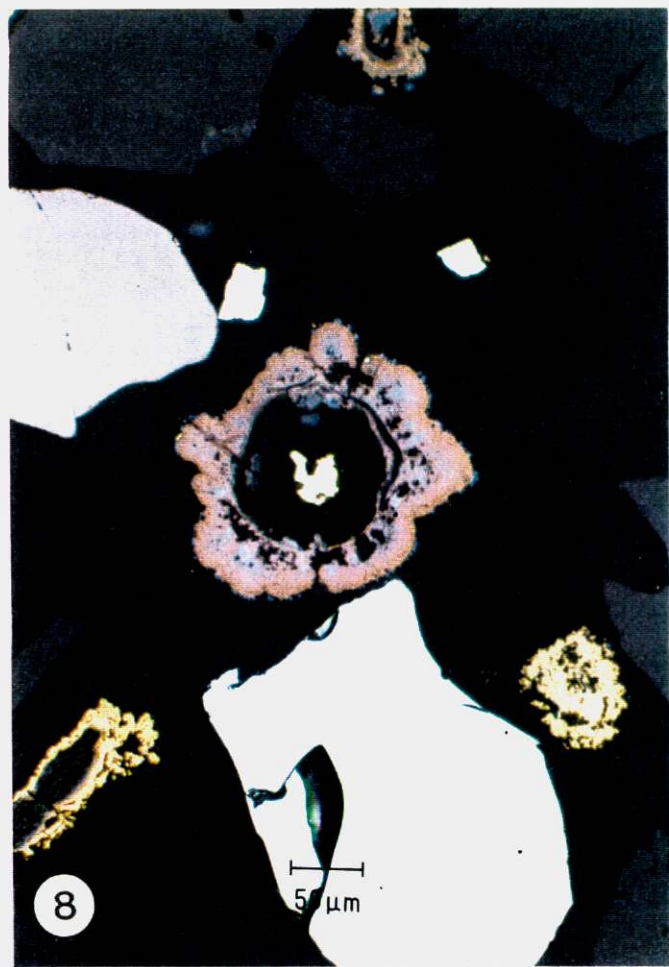
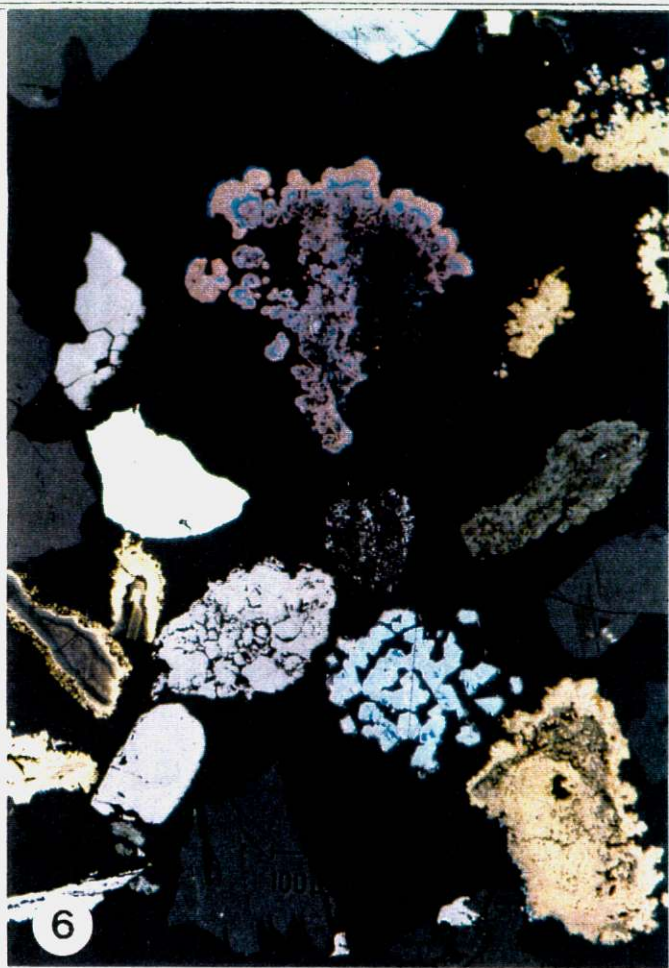
Zone portuaire de Québec

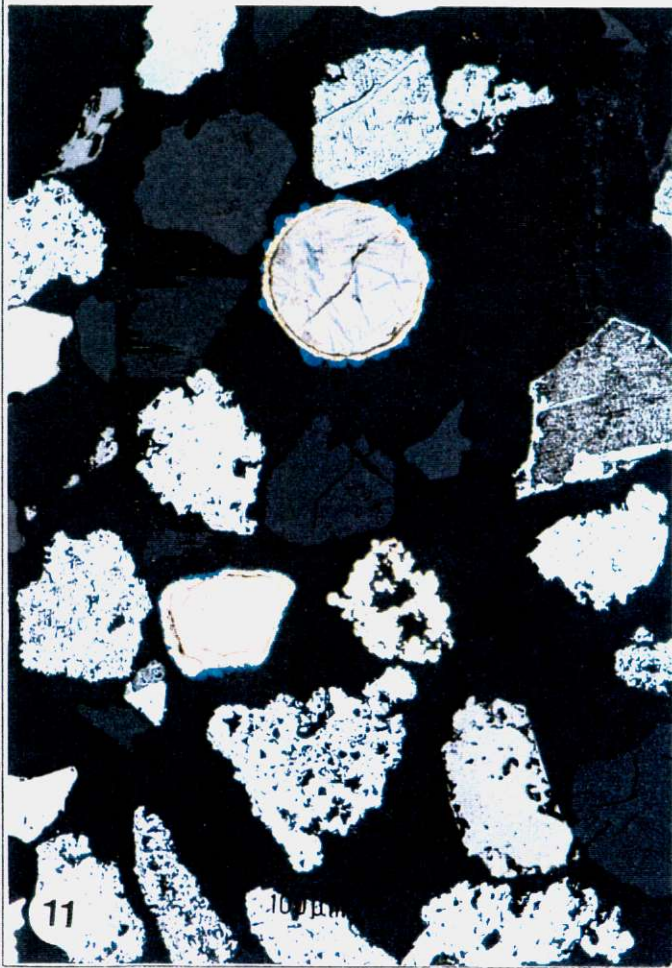
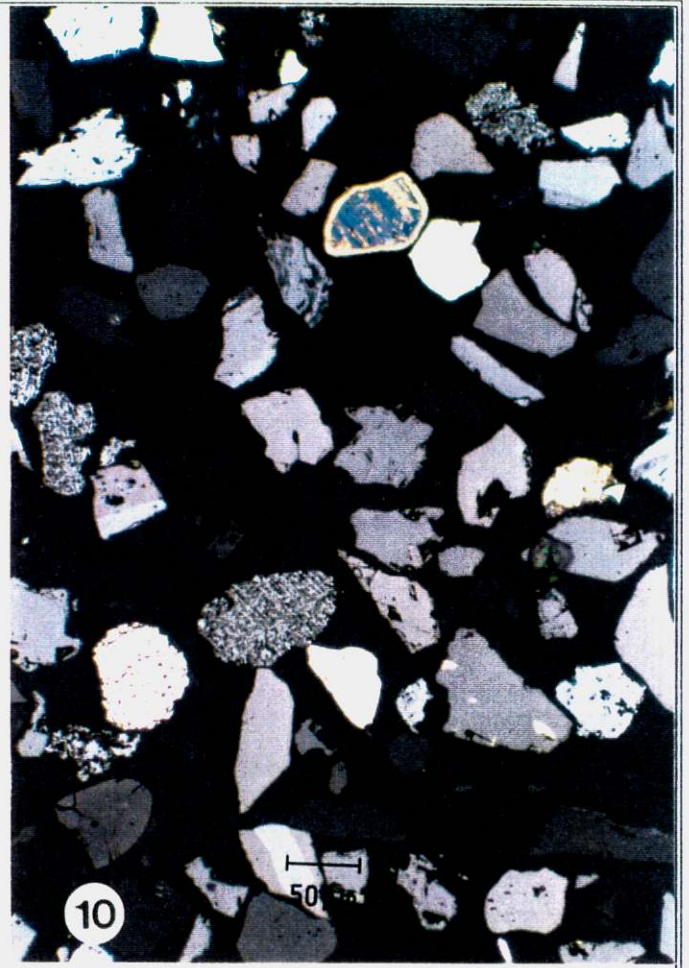
Tous les minéraux métalliques sont libres et potentiellement récupérables. À l'exception des sulfures de cuivre, les minéraux métalliques observés dans les échantillons de la zone portuaire de Québec s'apparentent à ceux de la zone portuaire de Montréal. On y note de plus une importance plus grande du transport des concentrés de minerais de fer manifestée par la présence de nombreuses particules d'hématite (Fe_2O_3 ; en gris clair "plein") et de martite (Fe_2O_3 ; en gris clair "texture en treillis"). Il s'agit là d'un matériel suffisamment poreux pour que sa densité ait été fortement affectée et souvent altérée (donc portant une bordure d'hydroxyde; gris sombre aux photos # 10, 13 et 15).

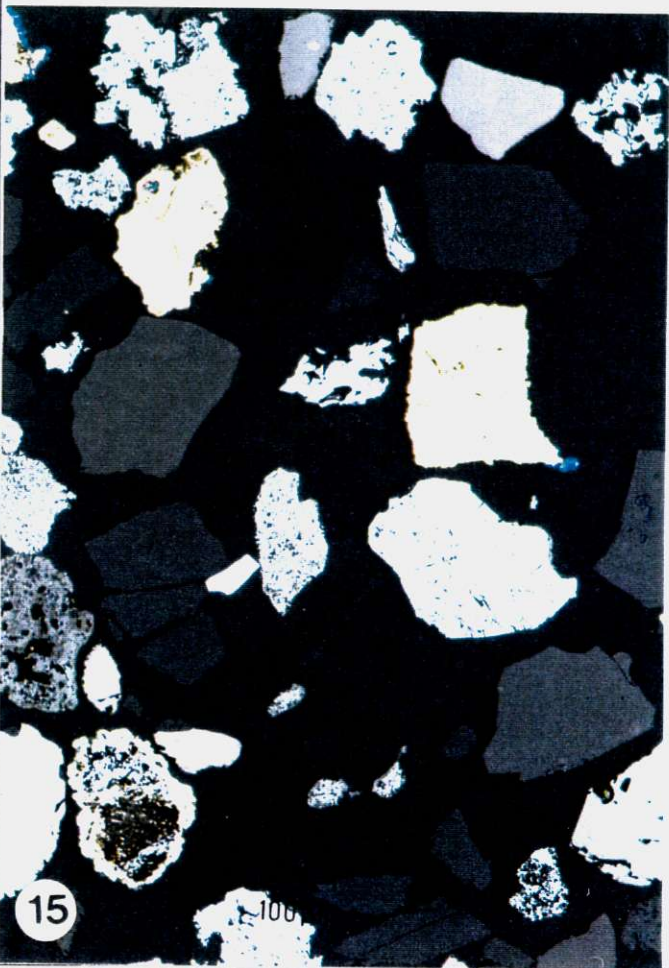
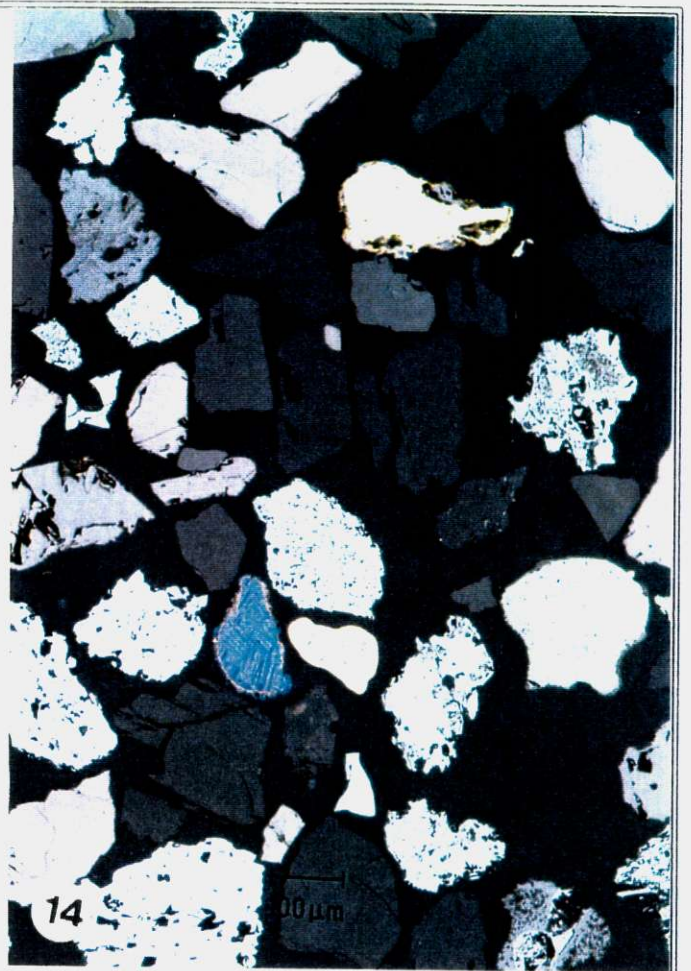
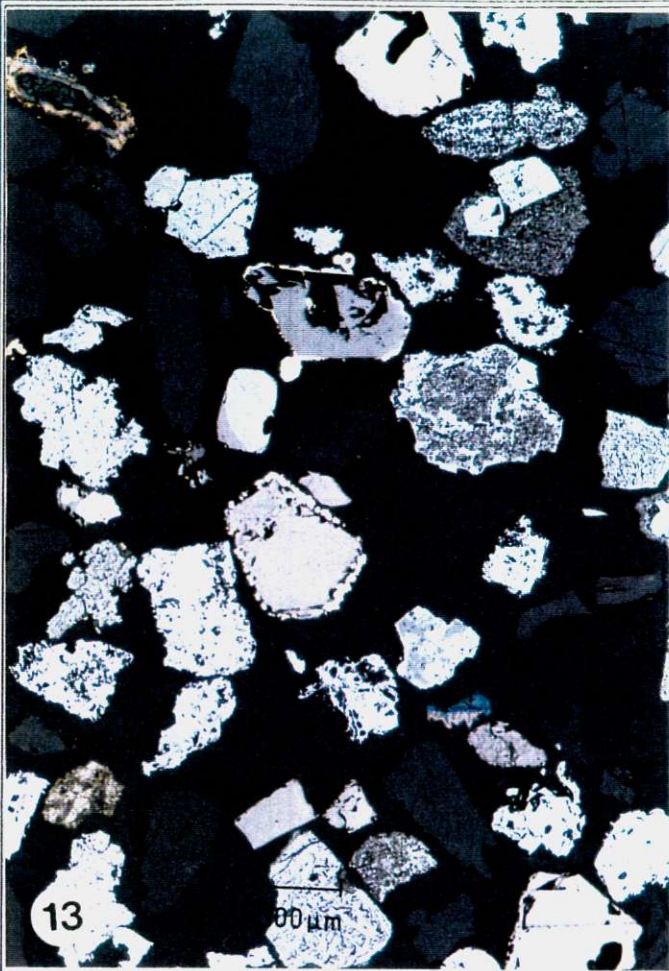
L'activité industrielle étant moins importante, les minéraux de cuivre trouvés sur ce site sont essentiellement la chalcopryrite naturelle (particules provenant de l'expédition de concentrés) et ses formes d'altération (vers la covellite). Ces dernières sont observées curieusement sur les arêtes aiguës des particules de chalcopryrite par de petites excroissances bleues. La chalcopryrite, comme tous les autres minéraux contaminants, est essentiellement libérée sur ce site. La cassitérite (SnO_2) fut aussi observée en microscopie électronique.

Finalement, notons simplement que des "plombs" de chasse furent observés dans les fractions les plus grossières. Étant donné les diamètres très importants de ces particules, il apparaît probable qu'un effet de pépité puisse apparaître lors des analyses. Ce plomb pourra cependant être simple à extraire vu sa taille et le contraste de densité qu'offriront ces particules par rapport au reste du matériel.









2.2.7 Résumé de la caractérisation minéralurgique

La caractérisation minéralurgique a permis d'établir la granulométrie de l'échantillon, la distribution granulométrique des contaminants, leur minéralogie et le degré de libération des phases minéralogiques.

Zone portuaire de Québec

Les concentrations en composés organiques pour le port de Québec sont inférieures au seuil d'effet néfaste (SEN). Les analyses des composés inorganiques révèlent une forte contamination en cuivre, en zinc et en cadmium (teneurs respectivement 8, 16 et 13 fois supérieures au SEN) pour les échantillons du lot-1 et du lot-2 de la zone portuaire de Québec. Une contamination en chrome est aussi présente. On retrouve à l'occasion une contamination en nickel, plomb et arsenic selon la fraction granulométrique. Tous les minéraux métalliques sont libres et potentiellement récupérables, c'est-à-dire que les métaux sont présents sous forme de phases minéralogiques qui ne sont pas incluses à l'intérieure d'autres composantes. On peut donc les séparer de la matrice minéralogique par utilisation de technologies appropriées. Environ 22% du matériel échantillonné est inférieur à 12 μm . Le tableau 13 et la figure 3 présentent les critères C de la Politique de réhabilitation des terrains contaminés du MEF, le SEN et le niveau de contamination des sédiments étudiés.

Zone portuaire de Montréal

On y retrouve des teneurs de 24 000 ppm d'hydrocarbures pétroliers. Les échantillons B27, B22-28 et F2 sont fortement contaminés en cuivre (53 fois le SEN), en chrome (9 fois), en arsenic (6 fois) et en nickel (3 fois). Des contaminations en plomb, mercure, zinc, cadmium et phénantrène sont aussi présentes selon la granulométrie. Tous les minéraux métalliques sont libres et potentiellement récupérables. Environ 50% du matériel échantillonné est inférieur à 12 μm . Le tableau 13 et les figures 4 A et 4 B présentent le niveau de contamination des sédiments étudiés en fonction du critère C.

L'objectif de restauration du procédé (voir section 1.1: Objectifs du projet) est d'obtenir un rejet dont les teneurs en métaux et en hydrocarbures pétroliers seraient sous le critère C de la Politique de réhabilitation des terrains contaminés du MEF.

Tableau 13 : Teneurs limites du critère C de la Politique de réhabilitation des terrains contaminés du MEF, du SEN et de la contamination actuellement présente dans les sédiments des zones portuaires de Québec et de Montréal.

	SEN (ppm) [°]	Critère C (ppm) [°]	Port de Québec (ppm) [*]	Port de Montréal (ppm) [*]
Argent (Ag)		40	< 5	33
Arsenic (As)	17	50	14	90
Baryum (Ba)		2000	493	2135
Cadmium (Cd)	3	20	15	6
Cobalt (Co)		300	12	15
Chrome (Cr)	100	800	134	602
Cuivre (Cu)	86	500	557	2352
Étain (Sn)		300	n.m.	< 10
Mercure (Hg)	1	10	0.3	1.23
Molybdène (Mo)		40	< 5	< 5
Nickel (Ni)	61	500	57	145
Plomb (Pb)	170	1000	67	110
Sélénium (Se)		10	< 2	115
Zinc (Zn)	540	1500	2252	646
Hydrocarbures pétroliers C ₁₀ à C ₅₀		3500	370	24 000

[°] extractible

^{*} valeur la plus élevée des moyennes (voir caractérisation), toutes ces analyses représentent des valeurs «totales».

Selon l'objectif:

- les teneurs en zinc et en cuivre de la zone portuaire de Québec dépassent le critère C;
- les teneurs en hydrocarbures pétroliers, en sélénium, en cuivre, en baryum et en arsenic dépassent le critère C pour la zone portuaire de Montréal.

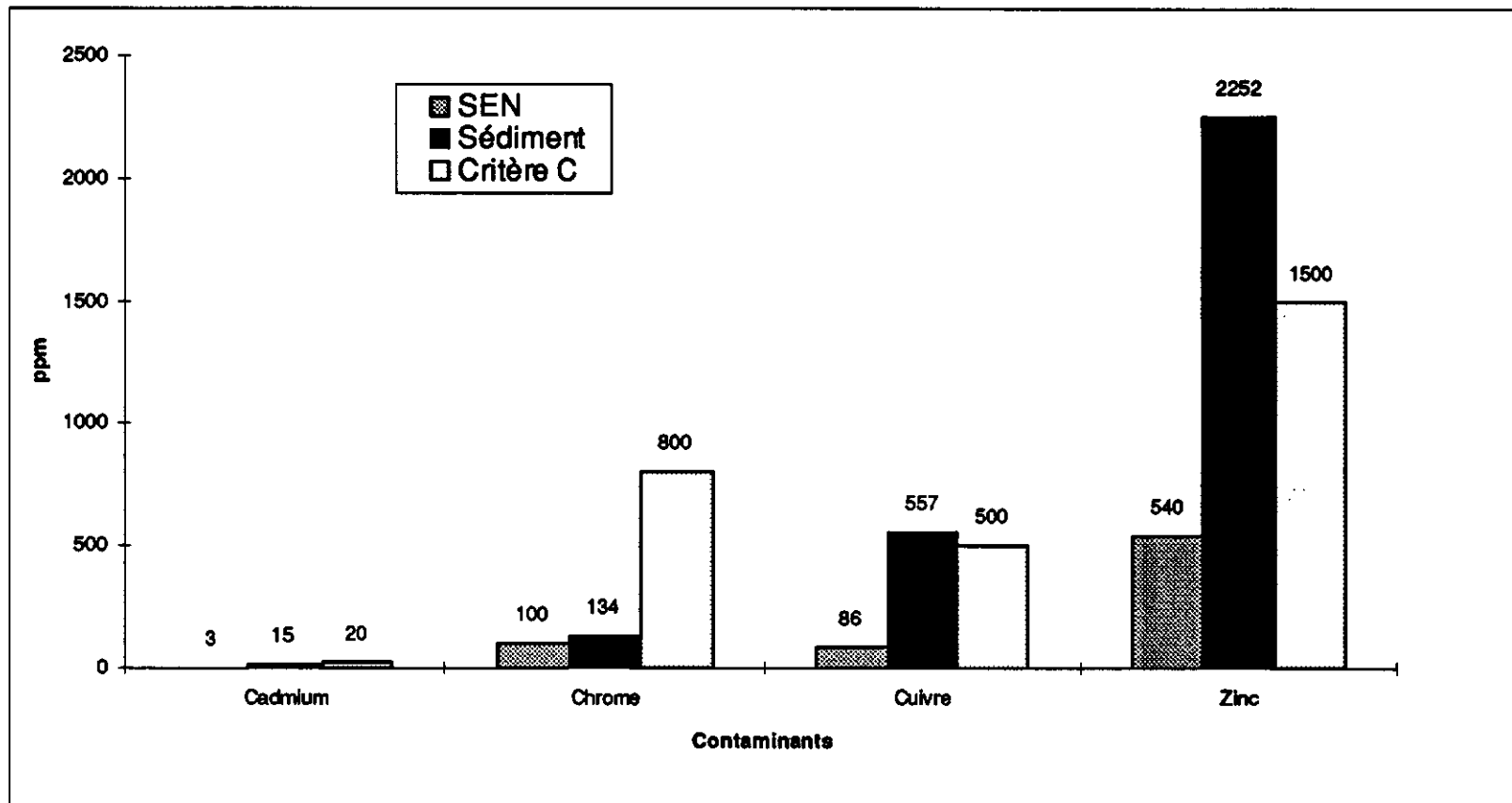


Figure 3 : Concentrations, Critères C, SEN, des principaux contaminants, zone portuaire de Québec

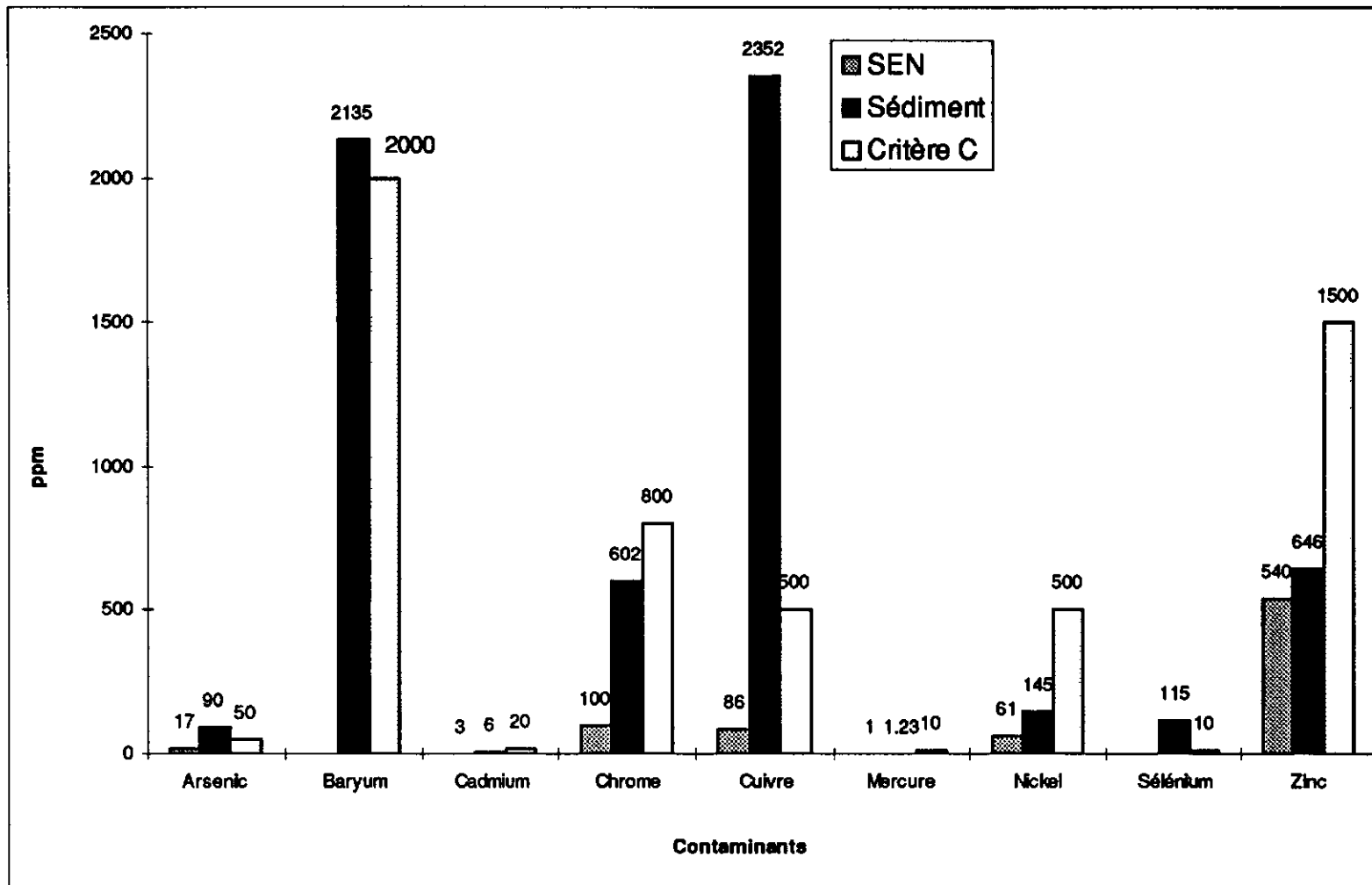


Figure 4 A : Concentrations, Critères C, SEN, principaux contaminants inorganiques, zone portuaire de Montréal;

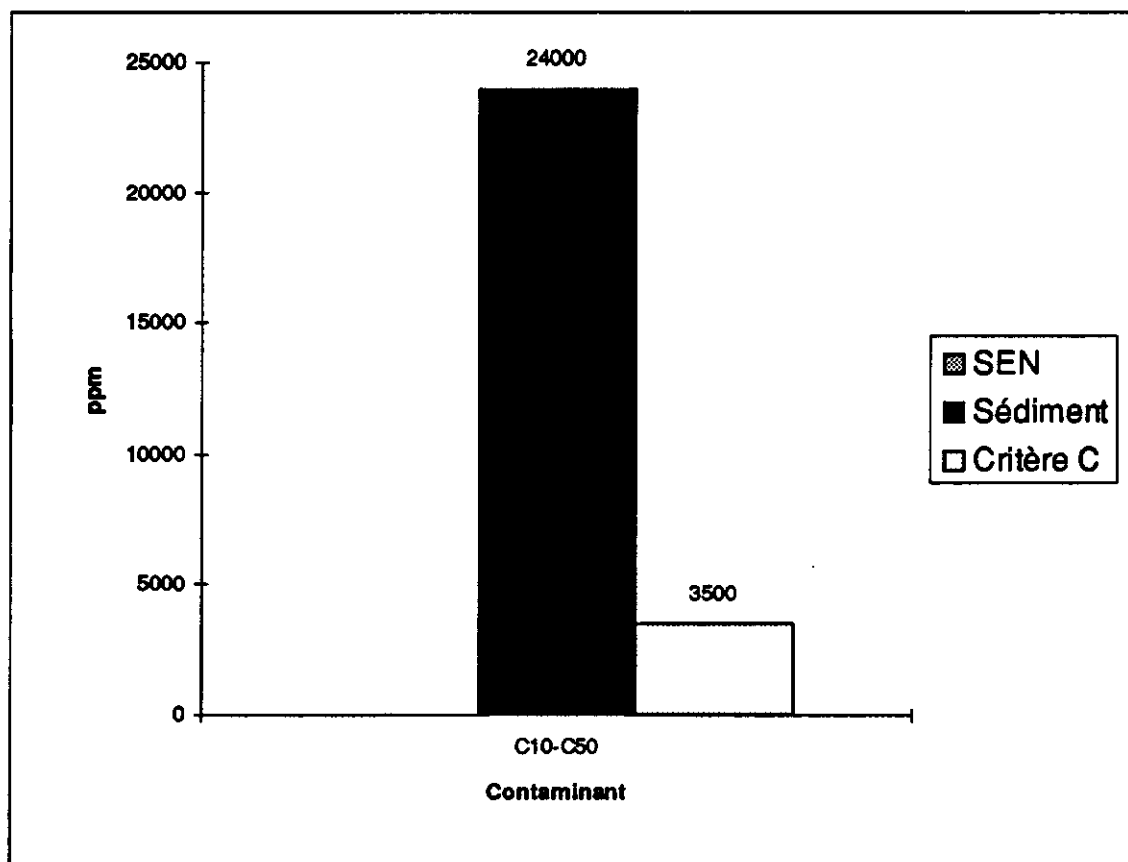


Figure 4 B : Concentration et critère C des hydrocarbures pétroliers, zone portuaire de Montréal; il n'y a pas de critère SEN pour les hydrocarbures pétroliers.

3. TRAITEMENT

3.1 OBJECTIFS

À partir des données de caractérisation minéralurgique, les essais de traitement visaient l'atteinte de 5 objectifs:

1. La réalisation d'un programme d'essais préliminaires permettant d'identifier rapidement les équipements les plus prometteurs en regard de la récupération des contaminants inorganiques et organiques pour les zones portuaires de Québec et de Montréal.
2. L'élaboration d'un diagramme de procédé préliminaire applicable à la zone portuaire de Québec.
3. Le développement, l'optimisation et la vérification, à l'échelle pilote, d'un diagramme de procédé applicable à la zone portuaire de Montréal et dont l'objectif de traitement avait été fixé à l'atteinte de teneurs en contaminants inférieures à celles du critère C. Le pilotage du procédé a été complété par des travaux portant sur:
 - le bilan de masse de procédé;
 - la formulation de scénarios de disposition des produits obtenus;
 - l'étude des possibilités de revalorisation des concentrés inorganiques et organiques obtenus;
 - une étude technico-économique du pilotage du procédé;
 - son applicabilité sur d'autres sites.
4. L'établissement des limites technologiques des approches de traitement utilisant les technologies gravimétriques et de flottation.
5. L'élaboration du potentiel de commercialisation du procédé développé.

3.2 PROGRAMME D'ESSAIS PRÉLIMINAIRES

Zone portuaire de Québec

Au départ, divers essais de traitement gravimétriques ont été effectués sur les échantillons de la zone portuaire de Québec. Le traitement gravimétrique apparaissait plus prometteur pour les sédiments contaminés de cette zone car ceux-ci présentaient une contamination inorganique généralement localisée dans les fractions granulométriques supérieures à 20 microns. De plus, ceux-ci contenaient peu de contaminants organiques par rapport aux échantillons provenant de la zone portuaire de Montréal.

Les performances des équipements gravimétriques (Spirale MG-4, Table à secousses Wilfley, Table Bartles-Mozley, Classificateur hydraulique C.F.S., Cône Knelson, Centrifugeur MGS Mozley) ont donc été vérifiées avec les échantillons Lot-1 et Lot-2. Des essais de flottation ont également été effectués avec ces échantillons.

Zone portuaire de Montréal

Pour la zone portuaire de Montréal, il était impératif de réduire la contamination en hydrocarbures pétroliers à son plus faible niveau avant d'effectuer des essais de séparation des métaux. Différentes techniques de délogement des hydrocarbures pétroliers (attrition) furent testées. Le délogement des hydrocarbures pétroliers (Attriteur Dever Sala ou sonde à ultrasons ou mélangeur statique ou surfactants) devait toujours être suivi d'une flottation afin d'enlever ces contaminants. Des essais de flottation ont été réalisés en cellule Denver et en colonne.

Afin d'obtenir une séparation maximale des hydrocarbures pétroliers, des essais en laboratoire avec différents surfactants ont aussi été effectués. Ces essais avaient pour but de maximiser le délogement de ce type de contaminant adsorbé sur les surfaces des particules sédimentaires. Le choix des surfactants qui ont fait l'objet d'essais en laboratoire a été effectué selon leur performance, leur densité, leur toxicité et leur biodégradabilité. À partir de la littérature scientifique, les surfactants identifiés comme étant les plus performants ont été sélectionnés. Parmi ces derniers, seuls ceux dont la densité est inférieure ou environ égale à celle de l'eau ont été retenus. En effet, un surfactant d'une telle densité aura pour effet de faciliter la flottation des complexes hydrocarbures pétroliers/surfactant. Finalement, le caractère biodégradable et le faible niveau de toxicité du surfactant ont été pris en considération.

On retrouve à l'annexe X tous les tableaux présentant les essais effectués à l'aide des équipements gravimétriques et des équipements de flottation. L'annexe XI présente les coefficients indicateurs utiles découlant des essais de traitement. Les tableaux de ces annexes contiennent généralement les mêmes informations soient :

- ⇒ Pourcentage d'enlèvement d'un contaminant ciblé: $(1 - \text{rejet/alimentation}) * 100$.
- ⇒ Coefficient d'efficacité du procédé : $(\text{fraction massique du rejet} - ((\text{teneur du contaminant dans le rejet} * \text{fraction massique du rejet}) / \text{teneur du contaminant dans l'alimentation})) * 100$. Ce coefficient présente donc l'efficacité à obtenir un pourcentage massique élevé dans le rejet, tout en minimisant l'importance massique du contaminant dans ce même rejet.
- ⇒ Coefficient d'enrichissement : teneur dans le concentré / teneur dans l'alimentation. (Avec graphique histobarre)
- ⇒ Coefficient de nettoyage : teneur dans le rejet / teneur dans l'alimentation.
- ⇒ Coefficient de réussite : $(\text{Critère C} / \text{teneur dans le rejet}) * 100$. C'est la mesure de l'atteinte de l'objectif de décontamination. On vérifie ainsi si le rejet est sous le critère C.
- ◇ Paramètres d'opération : type d'équipement utilisé et conditions d'opération.
- ◇ Paramètres : éléments dont la teneur a été mesurée. La teneur mesurée à l'alimentation est parfois indiqué entre parenthèses.
- ◇ Alimentation calculée : cette alimentation découle des analyses du rejet et du concentré.
- ◇ Alimentation rapport : cette alimentation provient de la caractérisation initiale.
- ◇ Critère C : c'est la teneur cible. Le rejet doit en effet être inférieur à ce critère.
- ◇ Rejet : on retrouve la quantité en ppm du contaminant. On observe aussi le pourcentage massique.
- ◇ Concentré : on retrouve la quantité en ppm du contaminant. On observe aussi le pourcentage massique.

Les plages de distribution de ces paramètres lors des essais effectués avec différents équipements gravimétriques et de flottation sont résumés aux tableaux 14, 15 (zone portuaire de Québec) 16, 17 et 18 (zone portuaire de Montréal).

Tableau 14 : Plage de distribution des coefficients indicateurs découlant des essais de traitement pour le cuivre et le zinc, zone portuaire de Québec (>45µm).

Paramètres	Coefficient d'efficacité ↑**	Coefficient d'enrichissement ↑	Coefficient de nettoyage ↓	Pourcentage d'enlèvement (%) ↑	Coefficient de réussite ↑
Spirale	3/4*	3/4	3/4	3/4	3/4
<i>Cuivre</i>	31 - 55	2.0 - 3.5	0.29 - 0.57	43 - 71	148 - 166
<i>Zinc</i>	43 - 51	2.5 - 3.3	0.35 - 0.36	64 - 65	68 - 161
Table Wilflez	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
<i>Cuivre</i>	24 - 67	1.7 - 3.4	0.32 - 0.64	36 - 68	161 - 200
<i>Zinc</i>	44 - 75	2.3 - 3.7	0.26 - 0.38	62 - 74	88 - 789
Table Bartles-Mozley	3/9	3/9	3/9	3/9	3/9
<i>Cuivre</i>	17 - 65	4.3 - 7.6	0.28 - 0.79	21 - 72	69 - 287
<i>Zinc</i>	12 - 78	2.5 - 9.0	0.13 - 0.85	15 - 87	170 - 19
CFS	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3
<i>Cuivre</i>	22 - 23	2.0 - 2.2	0.43 - 0.70	30 - 57	174 - 200
<i>Zinc</i>	5 - 11	1.2 - 1.2	0.55 - 0.93	7 - 45	79 - 125
MGS	5/35	5/35	5/35	5/35	5/35
<i>Cuivre</i>	63 - 67	4.1 - 7.0	0.16 - 0.18	82 - 84	323 - 424
<i>Zinc</i>	72 - 77	4.5 - 7.6	0.06 - 0.07	93 - 94	231 - 273
Cellule de flottation	2/2	2/2	2/2	2/2	2/2
<i>Cuivre</i>	69 - 82	11.3 - 18.9	0.14 - 0.27	73 - 86	323 - 489
<i>Zinc</i>	74 - 92	12.2 - 21.1	0.03 - 0.20	80 - 97	575 - 1304

* Le rapport 3/4 indique que la plage indicatrice rapportée a été établie à partir des résultats provenant des trois meilleurs essais d'un total de quatre essais effectués; soit *essais rapportés/nombre d'essais totaux*.

**Les flèches inscrites sous les coefficients indicateurs indiquent aux lecteurs la tendance recherchée.

Tableau 15 : Plage de distribution des coefficients indicateurs découlant des essais de traitement pour le cuivre et le zinc, zone portuaire de Québec (<45µm).

Paramètres	Coefficient d'efficacité ↑**	Coefficient d'enrichissement ↑	Coefficient de nettoyage ↓	Pourcentage d'enlèvement (%) ↑	Coefficient de réussite ↑
Table Bartles-Mozley	3/19*	3/19	3/19	3/19	3/19
<i>Cuivre</i>	24 - 31	7.0 - 9.1	0.65 - 0.74	26 - 35	141 - 150
<i>Zinc</i>	41 - 48	12.2 - 14.8	0.46 - 0.54	46 - 54	71 - 75
MGS	3/10	3/10	3/10	3/10	3/10
<i>Cuivre</i>	27 - 28	8 - 10	0.64 - 0.71	29 - 36	134 - 147
<i>Zinc</i>	43 - 44	12 - 15	0.43 - 0.53	47 - 57	68 - 88
Cellule de flottation	3/22	3/22	3/22	3/22	3/22
<i>Cuivre</i>	48 - 56	3.2 - 4.9	0.24 - 0.30	70 - 76	329 - 485
<i>Zinc</i>	35 - 36	2.4 - 2.6	0.40 - 0.52	48 - 60	79 - 125
Colonne de flottation	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
<i>Cuivre</i>	1	1.1	0.93	7	93
<i>Zinc</i>	1	1.0	0.98	2	37

* Le rapport 3/19 indique que la plage indicatrice rapportée a été établie à partir des résultats provenant des trois meilleurs essais d'un total de dix-neuf essais effectués; soit *essais rapportés/nombre d'essais totaux*.

**Les flèches inscrites sous les coefficients indicateurs indiquent aux lecteurs la tendance recherchée.

Tableau 16: Plage de distribution des coefficients indicateurs découlant des essais de traitement pour le cuivre, l'arsenic, le baryum et le sélénium, zone portuaire de Montréal (>45µm).

Paramètres	Coefficient d'efficacité ↑**	Coefficient d'enrichissement ↑	Coefficient de nettoyage ↓	Pourcentage d'enlèvement (%) ↑	Coefficient de réussite ↑
Cellule de flottation	3/7*	3/7	3/7	3/7	3/7
<i>Cuivre</i>	71 - 73	4.1 - 12.8	0.05 - 0.11	89 - 95	291 - 350
<i>Arsenic</i>	n.m	n.m	n.m	n.m	n.m
<i>Baryum</i>	n.m	n.m	n.m	n.m	n.m
<i>Sélénium</i>	n.m	n.m	n.m	n.m	n.m
Colonne de flottation	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
<i>Cuivre</i>	84	12.9	0.09	91	101
<i>Arsenic</i>	41	n.m	0.48	52	116
<i>Baryum</i>	31	n.m	0.61	39	155
<i>Sélénium</i>	78	n.m	0.01	99	1000

Tableau 17 : Plage de distribution des coefficients indicateurs découlant des essais de traitement pour le cuivre, l'arsenic, le baryum et le sélénium, zone portuaire de Montréal (<45µm).

Paramètres	Coefficient d'efficacité ↑**	Coefficient d'enrichissement ↑	Coefficient de nettoyage ↓	Pourcentage d'enlèvement ↑	Coefficient de réussite ↑
Cellule de flottation	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1
<i>Cuivre</i>	8	1.0	0.91	9	34
<i>Arsenic</i>	n.m	n.m	n.m	n.m	n.m
<i>Baryum</i>	n.m	n.m	n.m	n.m	n.m
<i>Sélénium</i>	n.m	n.m	n.m	n.m	n.m
Colonne de flottation	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
<i>Cuivre</i>	42	2.0	0.29	71	95
<i>Arsenic</i>	23	n.m	0.56	44	100
<i>Baryum</i>	36	n.m	0.31	69	300
<i>Sélénium</i>	52	n.m	0.01	99	1000

* Le rapport 3/7 indique que la plage indicatrice rapportée a été établie à partir des résultats provenant des trois meilleurs essais d'un total de sept essais effectués; soit *essais rapportés/nombre d'essais totaux*.

**Les flèches inscrites sous les coefficients indicateurs indiquent aux lecteurs la tendance recherchée.

n.m.: non-mesuré.

Tableau 18 : Plage de distribution des coefficients indicateurs découlant des essais de traitement pour les hydrocarbures pétroliers, zone portuaire de Montréal.

Paramètres	Coefficient d'efficacité ↑**	Coefficient d'enrichissement ↑	Coefficient de nettoyage ↓	Pourcentage d'enlèvement ↑	Coefficient de réussite ↑
Cellule de flottation	5/32* 64 - 92	2/4 3.8 - 4.8	5/35 0.01 - 0.11	5/35 89 - 99	5/35 159 - 1842
Colonne de flottation	3/17 81 - 86	3/11 22.1 - 38.0	3/18 0.01 - 0.11	3/18 89 - 99	3/18 194 - 2188

* Le rapport 5/32 indique que la plage indicatrice rapportée a été établie à partir des résultats provenant des cinq meilleurs essais d'un total de trente-deux essais effectués; soit *essais rapportés/nombre d'essais totaux*.

**Les flèches inscrites sous les coefficients indicateurs indiquent aux lecteurs la tendance recherchée.

La procédure expérimentale (inspirée de la littérature disponible pour le traitement des sols) ainsi que les résultats des essais visant à sélectionner le meilleur surfactant sont présentés à l'annexe XII. Ces derniers démontrent malheureusement que la procédure de centrifugation n'était pas appropriée. En effet, la centrifugation qui a eu pour effet de faire décanter les hydrocarbures pétroliers lourds présents dans l'échantillon en même temps que les solides. L'action du surfactant est alors grandement diminuée et impossible à quantifier. Ainsi, la bonne procédure expérimentale devrait inclure obligatoirement une étape de flottation qui permettrait une séparation plus efficace que la centrifugation dans le cas des hydrocarbures pétroliers lourds

D'autre part, quelques essais en laboratoire, explicités à l'annexe XIII, ont été réalisés afin de mieux comprendre les effets des ultrasons. Ces essais n'ont pas été concluants étant donné que l'étape de centrifugation ne permettait pas une séparation efficace des hydrocarbures pétroliers délogés et du sédiment.

Finalement, des essais complémentaires de séparation gravimétrique (Cône Knelson et Centrifugeur Super Bowl) visant à récupérer l'or et l'argent dans le rejet ont été effectués, étant donné la possibilité de revalorisation de ces métaux. L'annexe XV présente les paramètres, les résultats et les coefficients de traitement des essais de récupération de l'or dans la fraction décontaminée pauvre en or.

Tous les essais ont été réalisés aux laboratoires du CRM, aux laboratoires de l'INRS-Géoressources et à la station d'essais du CRM.

3.3 SCHÉMA DE TRAITEMENT PRÉLIMINAIRE, ZONE PORTUAIRE DE QUÉBEC

Il est à noter que les sédiments de la zone portuaire de Québec présentent seulement une contamination de type métallique. La plupart des zones portuaires et fluviales sont susceptibles d'être contaminées par des composantes organiques et inorganiques. Il a été décidé de ne pas procéder au pilotage complet de ce matériel étant donné sa représentativité limitée dans un cadre d'application plus générale.

Les principaux résultats obtenus des essais préliminaires de traitement des sédiments de la zone portuaire de Québec avec les équipements gravimétriques et les équipements de flottation ont été portés en graphiques (graphiques 1 et 2). On constate que la flottation et le MGS sont les équipements offrant la meilleure efficacité. Les performances de certains équipements (Table Wilfley, Spirale, CFS) avec le matériel de diamètre inférieur à 45 microns n'ont pas été évaluées car ces équipements ne sont pas recommandés par les fabricants pour ce type de matériel. La Table Bartles-Mozley n'a pas été retenue car elle est un équipement principalement dédié aux essais en laboratoire.

Un procédé efficace utilisant des MGS ou des équipements de flottation est donc envisageable pour le traitement des sédiments contaminés de la zone portuaire de Québec au niveau du secteur du quai 52. Les technologies vérifiées permettent un traitement des sédiments avec un abaissement des teneurs en métaux sous le critère C pour les métaux problématiques, soit le cuivre et le zinc.

Un schéma de traitement préliminaire est présentée à la figure 5. Les principales étapes de traitement impliquent:

1. le tamisage du sédiment sur une série de trois tamis; le premier tamis servant à protéger les équipements de bris éventuels provoqués par la présence de blocs ou de matériaux consolidés; les deux autres tamis servent à retirer les fractions grossières non contaminées;
2. la classification par hydrocyclones du sédiment en deux fractions, l'une étant inférieure à 45 μm , l'autre étant supérieure à 45 μm ;
3. la flottation (cellules ou colonnes) des deux courants; cette étape permet la récupération des contaminants métalliques; en fonction de la quantité de fines, des cellules ou des colonnes de flottation peuvent être utilisées; pour l'instant, il n'est pas possible de préciser le choix des équipements de flottation sans la réalisation de travaux supplémentaires;
4. la séparation solide/liquide des produits obtenus par utilisation de filtre à bandes.

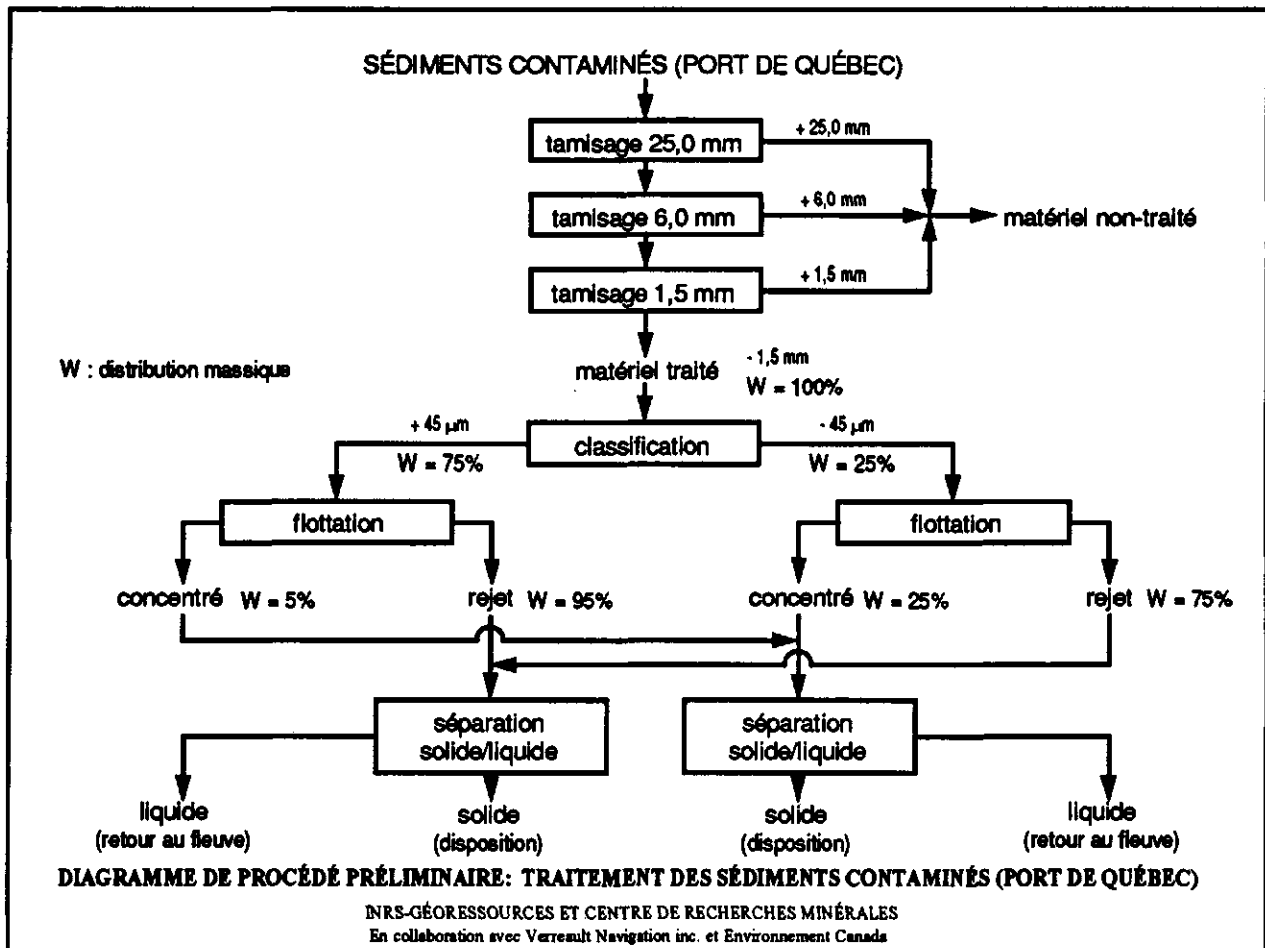


Figure 5 : Schéma de traitement préliminaire, sédiments contaminés, zone portuaire de Québec

Le tableau 19 présente le SEN, les teneurs en métaux et en organiques avant traitement, le critère C, le critère B et les teneurs en métaux et en composés organiques des sédiments traités pour la zone portuaire de Québec. À la figure 6 on retrouve: les teneurs en cuivre et en zinc des sédiments, les critères C de ces deux éléments, les teneurs en cuivre et en zinc après traitement.

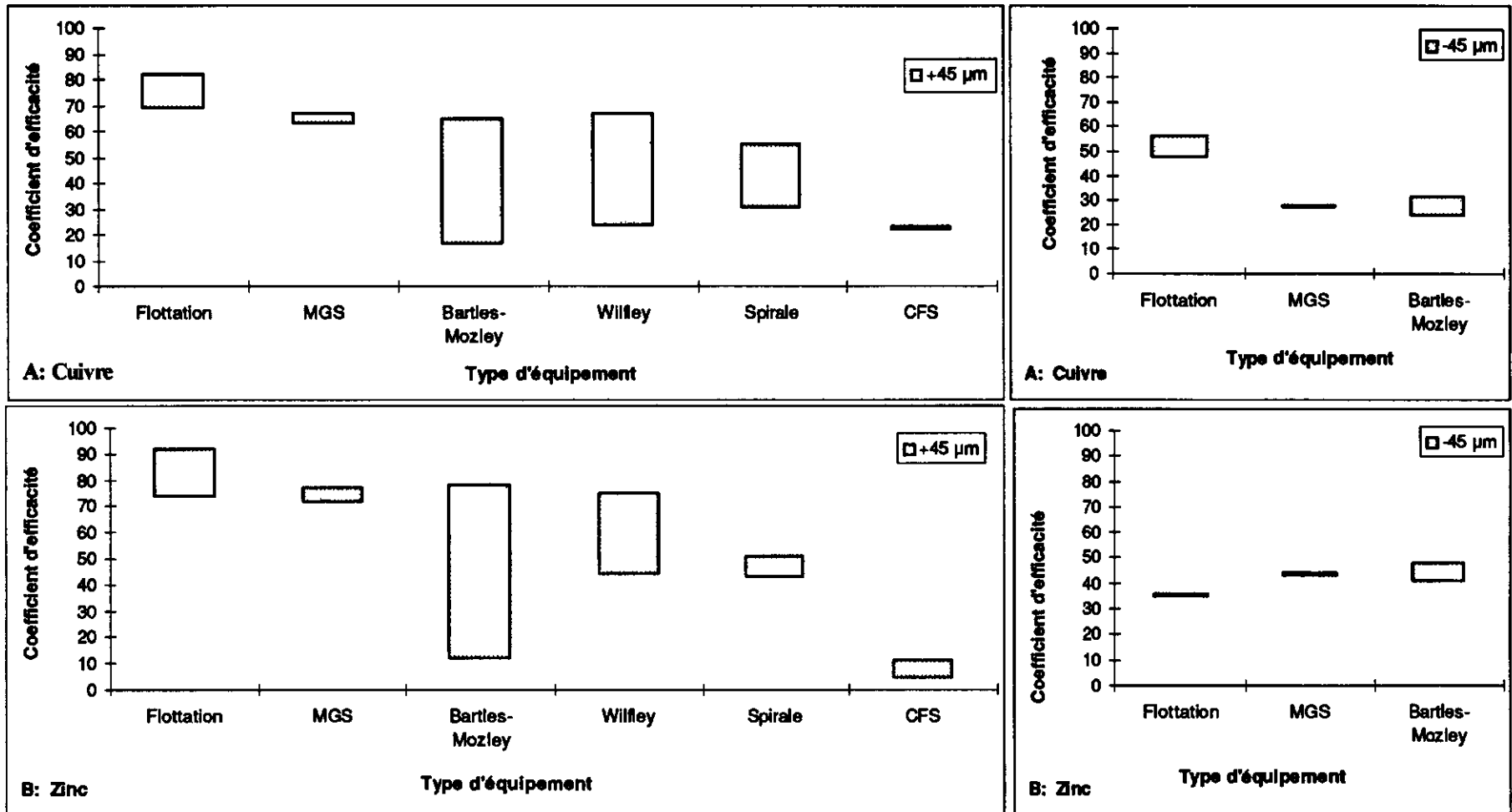
En utilisant la flottation, les teneurs en zinc sont réduites de 2252 à 620 ppm tandis que celles du cuivre passent de 557 à 140 ppm soit des % d'enlèvement respectif de 73% et 75%.

Dans le cas du MGS les teneurs en zinc sont abaissées à 940 ppm, celles du cuivre à 180 ppm soit des % d'enlèvement respectif de 58% et 68%.

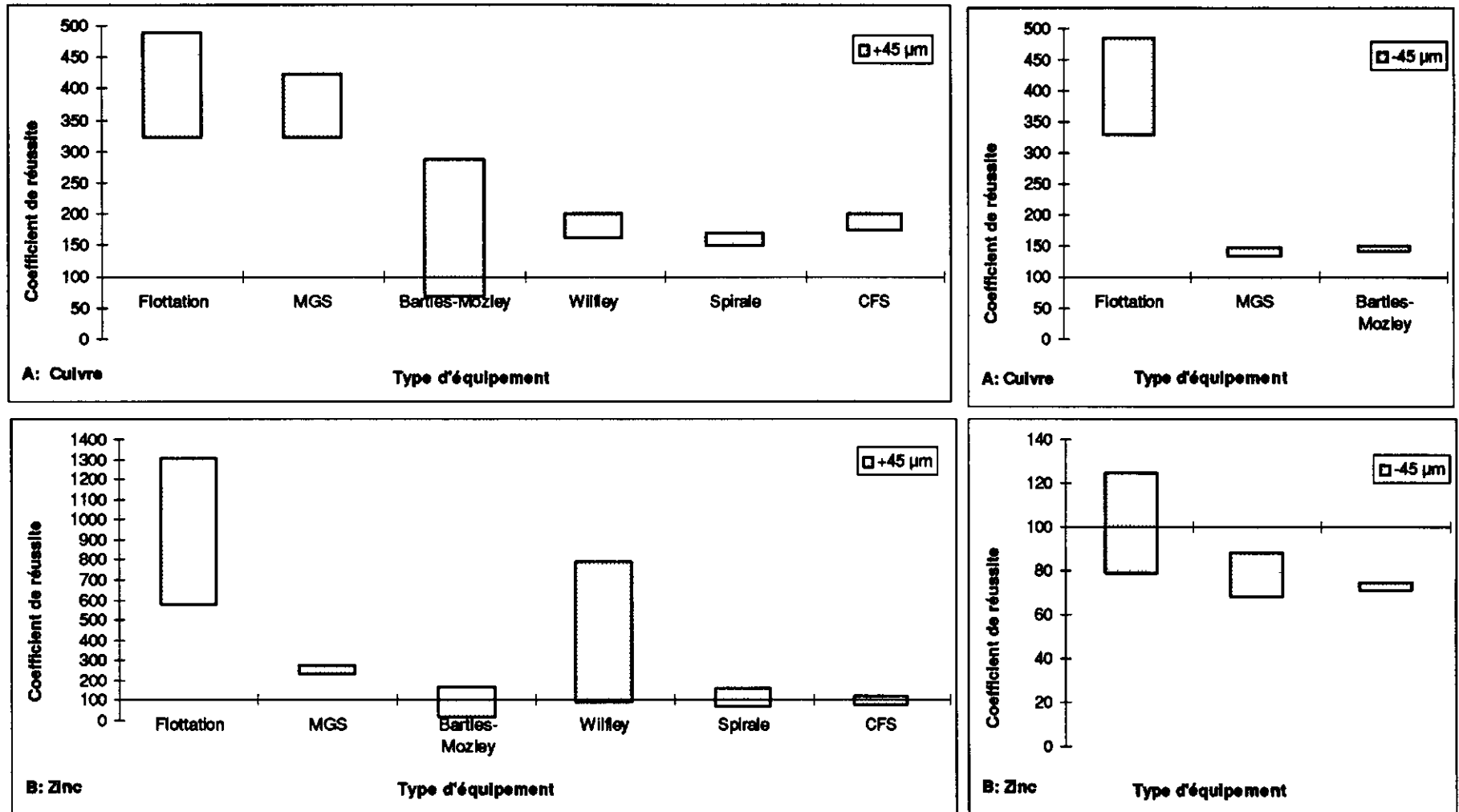
Deux types de produits sont obtenus du traitement: un sédiment traité (représentant 90 % de la masse volumique) dont les teneurs en contaminants se situent sous le critère C et un concentré métallique (10 % de la masse volumique). Le sédiment traité peut-être disposé à des coûts modiques (5\$/Tm) dans un site spécialisé.

Le concentré métallique obtenu du procédé est valorisable. Des teneurs de plus de 15 % Zn ont été retrouvées dans les concentrés obtenus. Ces teneurs sont normalement acceptables par un «smelter». La prochaine étape est de produire à une échelle industrielle un échantillon représentatif de la zone à traiter (un concentré) de plusieurs centaines de kilogrammes. Des sous échantillons de ce concentré seront acheminés vers différents acheteurs potentiels pour évaluation finale. Actuellement il n'est pas possible de poursuivre cette démarche de valorisation faute d'une quantité suffisante de matériel.

Le procédé pourrait techniquement permettre d'atteindre des seuils de décontamination sous le SEM (permettant alors un dépôt en milieu aquatique) et sous le critère B (permettant un dépôt non-restreint en milieu terrestre). Une discussion générale portant sur les seuils limites de décontamination ainsi que sur les limites technologiques des approches gravimétriques et des approches de flottation est présentée à la section 3.4.12.



Graphique 1 : Coefficient d'efficacité du procédé selon le type d'équipement, zone portuaire de Québec; A : cuivre; B : zinc



Graphique 2 : Coefficient de réussite du procédé selon le type d'équipement, zone portuaire de Québec; A : cuivre; B : zinc

3.3.1 Résumé des résultats de traitement, zone portuaire de Québec

Tableau 19 : Présentation du SEN, des teneurs en métaux et en composés organiques avant traitement, du critère B, du critère C et des teneurs en métaux et en composés organiques des sédiments traités de la zone portuaire de Québec.

Paramètres	SEN (ppm)	Z.P. de Québec Début (ppm)*	Critère B (ppm)	Objectif Critère C (ppm)	Z.P. de Québec après trai. Gravim. (ppm) ⁺	% d'enlè- vement	Z.P. de Québec après trai. Flottation (ppm) ⁺	% d'enlè- vement
Argent (Ag)		< 5	20	40				
Arsenic (As)	17	14	30	50				
Baryum (Ba)		493	500	2000				
Cadmium (Cd)	3	15	5	20				
Cobalt (Co)		12	50	300				
Chrome (Cr)	100	134	250	800				
Cuivre (Cu)	86	557	100	500	180	68 %	140	75 %
Étain (Sn)		n.m	50	300				
Mercure (Hg)	1	0.3	2	10				
Molybdène (Mo)		< 5	10	40				
Nickel (Ni)	61	50	100	500				
Plomb (Pb)	170	67	500	1000				
Sélénium (Se)		< 2	3					
Zinc (Zn)	540	2252	500	1500	940	58%	620	73 %
BPC	1	< 0,05	1	10				
C ₁₀ à C ₅₀ (hydrocarbures pétroliers)		370	700	3500				

Z.P. : zone portuaire

* : Valeur la plus élevée des moyennes (voir caractérisation)

+ : Valeur obtenue par combinaison des résultats selon coupe granulométrique (résultats en annexe)

note: seuls les contaminants montrant des teneurs supérieures au critère C ont été analysés.

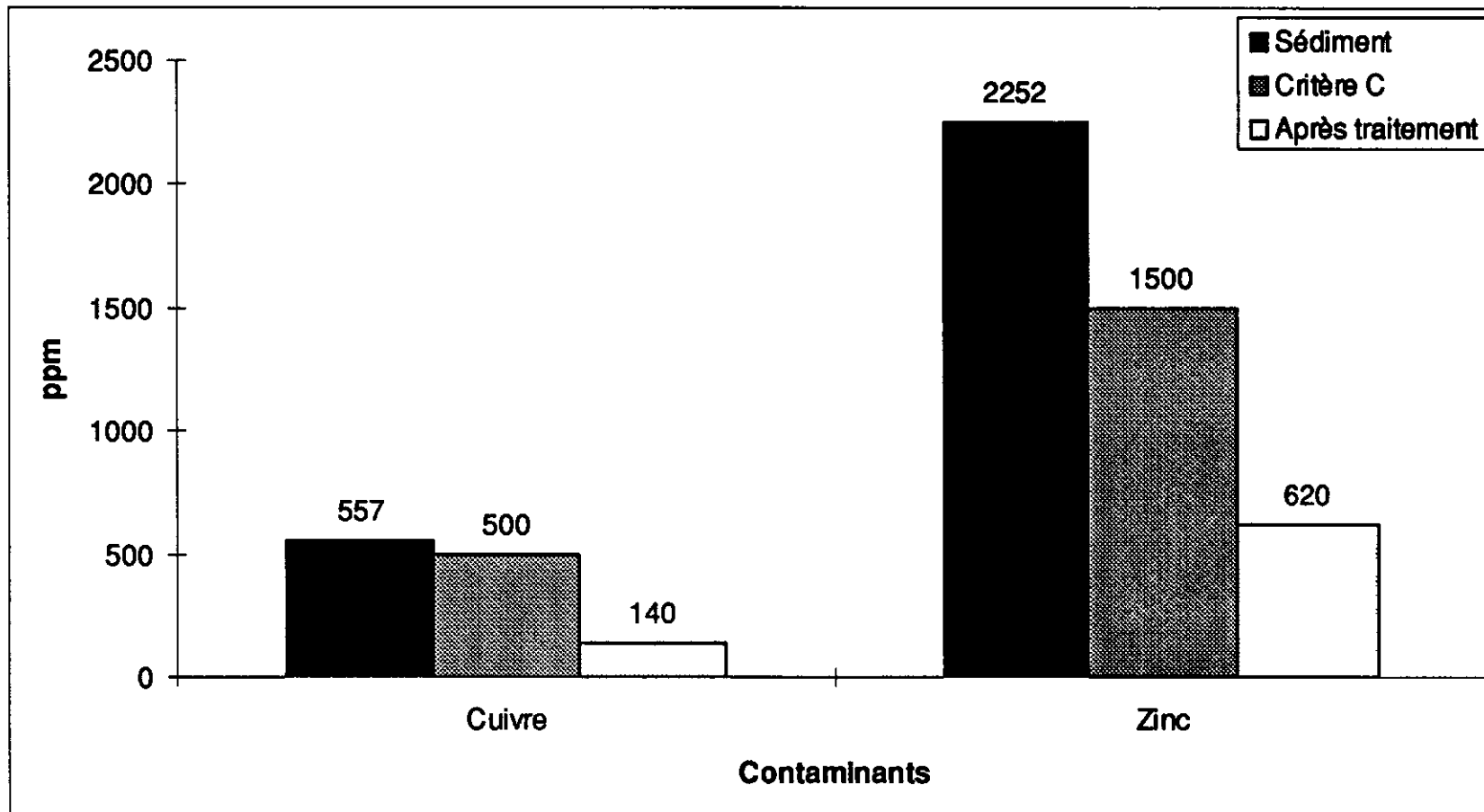


Figure 6 : Concentrations, Critères C, teneurs après traitement, du cuivre et du zinc, zone portuaire de Québec

3.4 ÉLABORATION D'UN DIAGRAMME DE PROCÉDÉ, ZONE PORTUAIRE DE MONTRÉAL

Il a été décidé d'étudier à l'échelle pilote, de façon détaillée, un procédé applicable aux échantillons provenant du secteur 103 (zone portuaire de Montréal) plutôt que ceux provenant de la zone portuaire de Québec. Les échantillons de ce secteur spécifique présentent les deux types de contaminants majeurs retrouvés généralement dans les zones portuaires et fluviales, soit les hydrocarbures pétroliers et les métaux. Ce choix nous a permis de développer un procédé qui, au départ, est d'un caractère plus général que celui associé à un développement axé essentiellement sur la récupération de phases métalliques.

Bien que pouvant être interprétées dans un sens plus large, ces informations sont relatives à la zone portuaire de Montréal. Le procédé a été élaboré à partir d'essais aux échelles laboratoires et pilotes. Le procédé a été vérifié de façon semi-continue en utilisant des échantillons de 1 tonne métrique.

3.4.1 Choix des technologies utilisées: gravimétrie versus flottation

Plusieurs combinaisons d'attriteur ou d'autres techniques de délogement des hydrocarbures pétroliers, de conditionneur et d'équipements de flottation différents, ont été utilisées. Au départ, des essais à l'échelle laboratoire ont indiqué que les colonnes de flottation permettaient un enlèvement supérieur de la composante organique par rapport au rendement obtenu à l'aide de cellules de flottation. Il a été noté que l'attrition et le conditionnement préalables à la flottation sont d'une importance extrême: plus on déloge les composés organiques des particules solides, par attrition, plus la flottation est facilitée et efficace.

La sélection de la technologie pour le traitement de la composante inorganique de la zone portuaire de Montréal a été basée sur des essais de traitement des particules fines (diamètre < 45 µm) de la zone portuaire de Québec. Ceci afin d'étudier le comportement du matériel fin lors de son traitement dans le MGS (le MGS est l'équipement gravimétrique le plus performant dans le traitement des particules fines; les échantillons du secteur 103 de la zone portuaire de Montréal contiennent une composante importante de fines) et dans les équipements de flottation et ce, en absence de contamination organique (hydrocarbures pétroliers). La figure 7 permet de comparer les résultats obtenus du MGS et ceux obtenus de la flottation, sur le matériel inférieur à 45 µm et ce pour le cuivre. Cet élément a servi à définir le choix final des équipements.

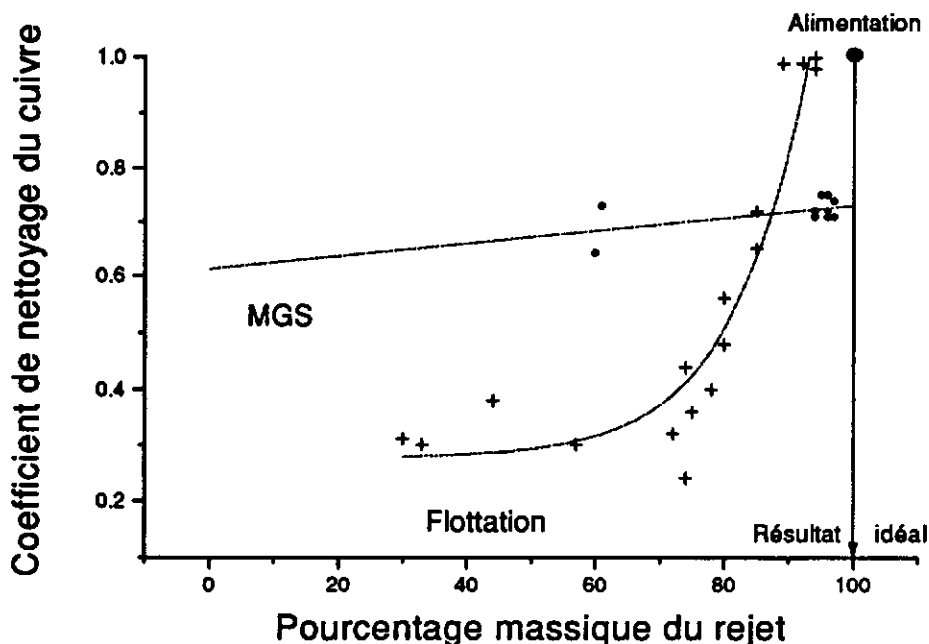


Figure 7 : Coefficient de nettoyage du cuivre en fonction du pourcentage massique du rapport rejet/alimentation. Les données pour le MGS et la flottation concernant des sédiments inférieure à 45 microns y sont présentées.

Notez que les résultats illustrés à la figure 7 découlent d'essais simples (en une seule étape). Il ne s'agit donc pas de résultats optimisés. Afin de clarifier l'utilisation de cette figure, il convient de rappeler ici les définitions de coefficient de nettoyage et du pourcentage massique.

Le coefficient de nettoyage d'un élément donné (à la figure 7 le cuivre) représente le rapport (teneur d'un contaminant dans le rejet)/(teneur d'un contaminant dans l'alimentation). Ainsi une décontamination idéale impliquerait un rejet ne contenant pas de contaminants pour une alimentation contaminée donnée, soit un rapport $0/1=0$.

Afin de compléter ce rapport il convient d'associer un bilan massique à un coefficient de nettoyage d'un élément donné, ce bilan est représenté ici sous la forme d'un rapport de la distribution massique rejet/alimentation. Ce rapport exprimé en % (masse du rejet/masse de l'alimentation x 100) est appelé le pourcentage massique du rejet. Idéalement, le pourcentage massique du rejet par rapport à l'alimentation doit tendre vers 100 %. Un pourcentage massique qui tend vers 100% implique que la masse du rejet est pratiquement identique à l'alimentation, ce qui conduit à l'obtention d'un concentré d'un contaminant donné de faible masse.

En d'autres termes les conditions idéales d'enlèvement que l'on vise pour un contaminant donné sont:

1. un coefficient de nettoyage qui tend vers 0; rejet très appauvri en un contaminant donné par rapport à une alimentation riche en un contaminant donné (ex., 5 ppm de cuivre/50 000 ppm de cuivre);
2. un pourcentage massique qui tend vers 100%; la masse du rejet est pratiquement identique à l'alimentation (ex., 0.98 Tm dans le rejet/1.00 Tm à l'alimentation $\times 100 = 98\%$, le concentré ayant alors une masse de 0.02 Tm);

Les données de la figure 7 proviennent de divers essais de séparation du cuivre qui ont été effectués en utilisant le MGS et des techniques de flottation (cellules et colonnes). En considérant que l'on recherche à obtenir une teneur en cuivre dans le rejet qui est inférieure au critère C (500 ppm) et que l'alimentation en contient en moyenne 2100 ppm, l'on vise donc l'obtention d'un coefficient de nettoyage qui tend vers 0.25 et ce pour un pourcentage massique qui tend vers 100%.

MGS. Les données obtenues en utilisant le MGS indique que le coefficient de nettoyage de cette approche est probablement limité par la taille des particules. C'est-à-dire que seulement les particules contaminées les plus grossières qui sont contenues dans la tranche inférieure à 45 microns sont séparées et se rapportent au concentré. Ce qui explique que le coefficient de nettoyage ne varie pratiquement pas même lorsque la masse du concentré augmente, les particules les plus fines se répartissant également entre le rejet et le concentré.

Ce résultat n'est pas surprenant lorsque l'on considère que pour le secteur 103 de la zone portuaire de Montréal plus de 50 % de la masse du sédiment est composée de particules inférieures à 15 microns. La courbe horizontale obtenue pour le MGS indique que cette technique ne permet pas de faire un épuisage. C'est-à-dire que l'on ne peut pas améliorer le coefficient de nettoyage et ceci même en acceptant une diminution du pourcentage massique du rejet. On ne peut pas utiliser le MGS pour arriver à notre objectif de restauration en ce qui concerne le secteur 103 de la zone portuaire de Montréal.

Flottation. Cette courbe indique que la flottation peut servir à épuiser (séparer) les sédiments de la contamination inorganique qu'ils contiennent. On peut donc obtenir un bien meilleur coefficient de nettoyage en ayant un plus faible pourcentage massique se retrouvant dans le matériel décontaminé, soit le rejet. Le coefficient de nettoyage du cuivre de la figure 7 pour des essais en flottation comprenant qu'une seule étape (0.25 pour un pourcentage massique de rejet de 73%) démontre clairement que l'objectif de restauration pour le cuivre est en pratique réalisable. En fait le coefficient de nettoyage du cuivre après optimisation (2 étapes de flottation) est de l'ordre de 0.20 pour un pourcentage massique de rejet de 75%.

Dans la zone portuaire de Montréal, près de 66% du matériel possède un diamètre inférieur à 45 µm. Cette fraction est très contaminée. Selon la figure 7, la flottation s'avère une technologie plus apte à séparer les métaux contenus dans les tranches granulométriques fines que l'approche gravimétrique. Selon les standards de l'industrie minière, la flottation permet aussi le traitement des particules ayant des diamètres plus grands. Tel qu'indiqué précédemment, la flottation est la technique qui a été retenue pour éliminer les hydrocarbures pétroliers de la zone portuaire de Montréal. Ainsi, le schéma de traitement développé pour le port de Montréal est basé essentiellement sur l'utilisation de la flottation.

3.4.2 Diagramme de procédé

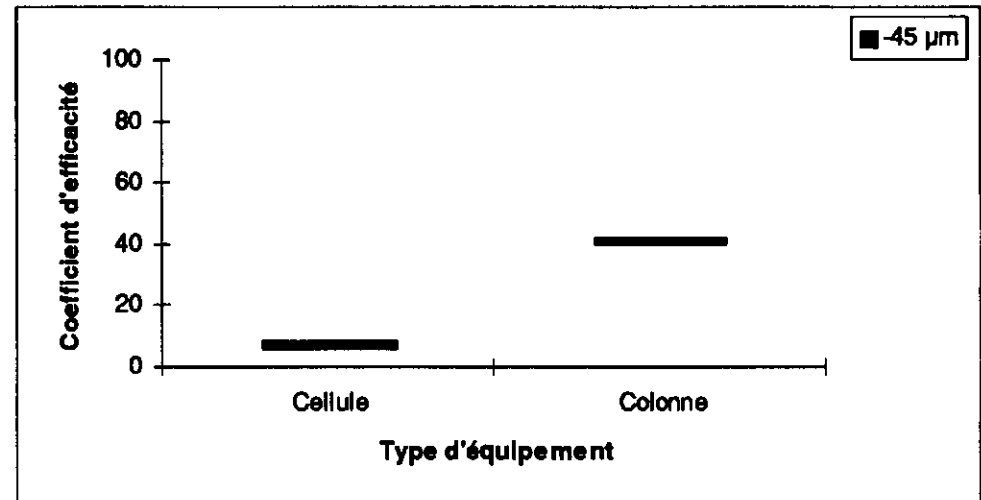
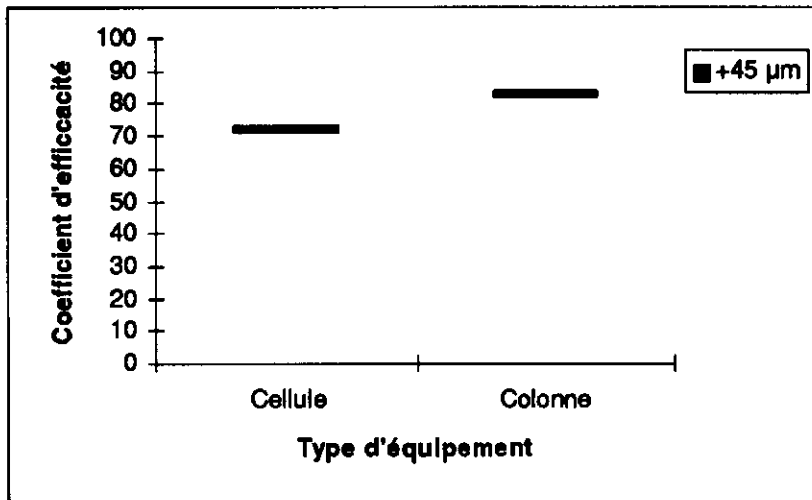
Le diagramme de procédé a été élaboré à partir d'essais de flottation en colonnes et en cellules aux échelles laboratoires et pilotes.

En ce qui concerne les contaminants inorganiques, il a été rapidement remarqué que les colonnes offraient un pourcentage d'enlèvement supérieur à celui généralement obtenu en cellule sur les fractions inférieures à 45 microns. Comme exemple, les graphiques 3 et 4 présentent les données pertinentes au cuivre.

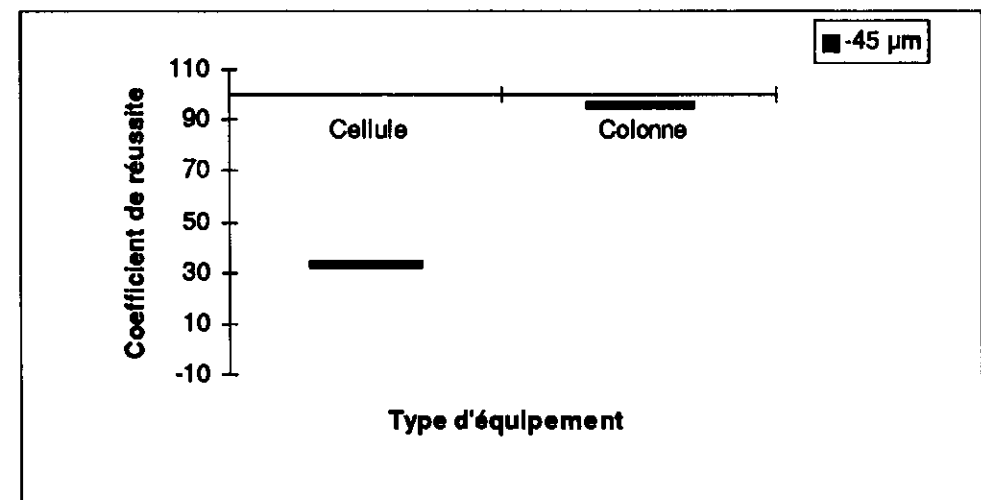
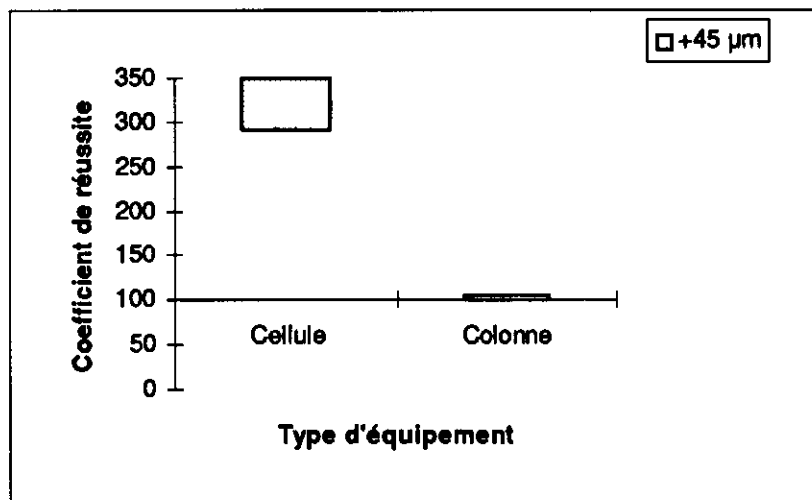
Le principe de l'alimentation à contre courant avec l'injection d'air de la flottation en colonnes favorise une meilleure séparation. Les probabilités de collision entre les bulles d'air et les particules sont plus élevées avec la colonne de flottation en raison de sa structure en hauteur. Cela offre donc une meilleure efficacité de traitement. Les équipements de flottation utilisés pour le pilotage des échantillons de Montréal ont donc été des colonnes.

Pour la récupération des hydrocarbures pétroliers, un circuit comprenant trois colonnes de flottation a été utilisé. Le procédé a été vérifié de façon semi-continue en utilisant des sous-échantillons d'une tonne métrique. La plupart des informations pertinentes à la compréhension du procédé sont rapportées aux figures 8 à 11. Pour des raisons liées à la diffusion d'informations confidentielles, l'ensemble des équipements utilisés de même que les informations détaillées sur les débits, les dimensions et le nombre exact d'unités utilisées ne sont pas rapportés dans le présent document.

En ce qui concerne la description, le rôle des équipements ainsi que des divers agents chimiques utilisés, le lecteur trouvera à la section 1.5 toutes les informations de bases nécessaires à une compréhension adéquate du procédé.



Graphique 3 : coefficient d'efficacité du procédé selon le type d'équipements - cuivre, zone portuaire de Montréal



Graphique 4 : Coefficient de réussite du procédé selon le type d'équipements - cuivre, zone portuaire de Montréal.

Une présentation sommaire du procédé apparaît à la figure 8. Un bilan de masse est présenté au tableau 21 (p. 96). Une alimentation hypothétique de 50 m³/h y est proposée. Dans un premier temps, les sédiments sont dirigés vers une série de trois tamis qui permettent l'enlèvement des fractions grossières non contaminées. Les deux premiers tamis (1 et ¼ po) servent à protéger les équipements. Le procédé n'a pas été conçu pour traiter des matériaux d'un diamètre supérieur à 6 mm. La finesse du troisième tamis, fixée actuellement à 1.7 mm, pourra varier en fonction des résultats de la démonstration technologique. La fonction du troisième tamis est d'éviter de traiter du matériel non contaminé.

Nous émettons comme hypothèse que le matériel supérieur à 1.7 mm n'est pas contaminé. Il pourrait être possible de retrouver du matériel inférieur à 1.7 mm non contaminé. Advenant que cette hypothèse se confirme, la taille du troisième tamis serait adaptée à l'alimentation, donc réduite.

Le matériel grossier non contaminé est recueilli dans un conteneur pour être éventuellement disposé à faible coût dans un site d'enfouissement sanitaire (Montréal, carrière Miron). Le sédiment tamisé (passant le tamis) est ensuite acheminé vers des équipements permettant l'enlèvement des contaminants organiques.

Le sédiment tamisé est dirigé vers un réservoir tampon permettant de régulariser le débit de la pulpe (figure 9). De ce réservoir, le sédiment est acheminé vers des équipements permettant l'enlèvement des contaminants organiques, soient pour le secteur 103 de la zone portuaire de Montréal, des hydrocarbures pétroliers. Ces équipements consistent en une cellule d'attrition reliée à une unité de flottation (conditionneur et colonne de flottation). La cellule d'attrition permet, après l'ajout d'agents chimiques appropriés, de décoller les hydrocarbures pétroliers adsorbés à la surface des particules sédimentaires. Les attriteurs mécaniques conventionnels permettent de détacher partiellement les hydrocarbures pétroliers des particules solides. Le diagramme de procédé préconise l'utilisation d'attriteurs conventionnels.

Le mélange comprenant les hydrocarbures pétroliers libres et le sédiment est ensuite dirigé vers le conditionneur. On procède à ce stade à l'ajout d'un collecteur et d'un agent moussant. La séparation des hydrocarbures pétroliers présents dans le mélange est effectuée dans une colonne de flottation. Le concentré organique obtenu, à la partie supérieure de la colonne, est dirigé vers un décanteur et un filtre à bande. À la base de la colonne on retrouve le sédiment partiellement décontaminé. Celui-ci est alors dirigé vers des équipements complémentaires (non présentés) qui permettent de finaliser l'enlèvement des organiques.

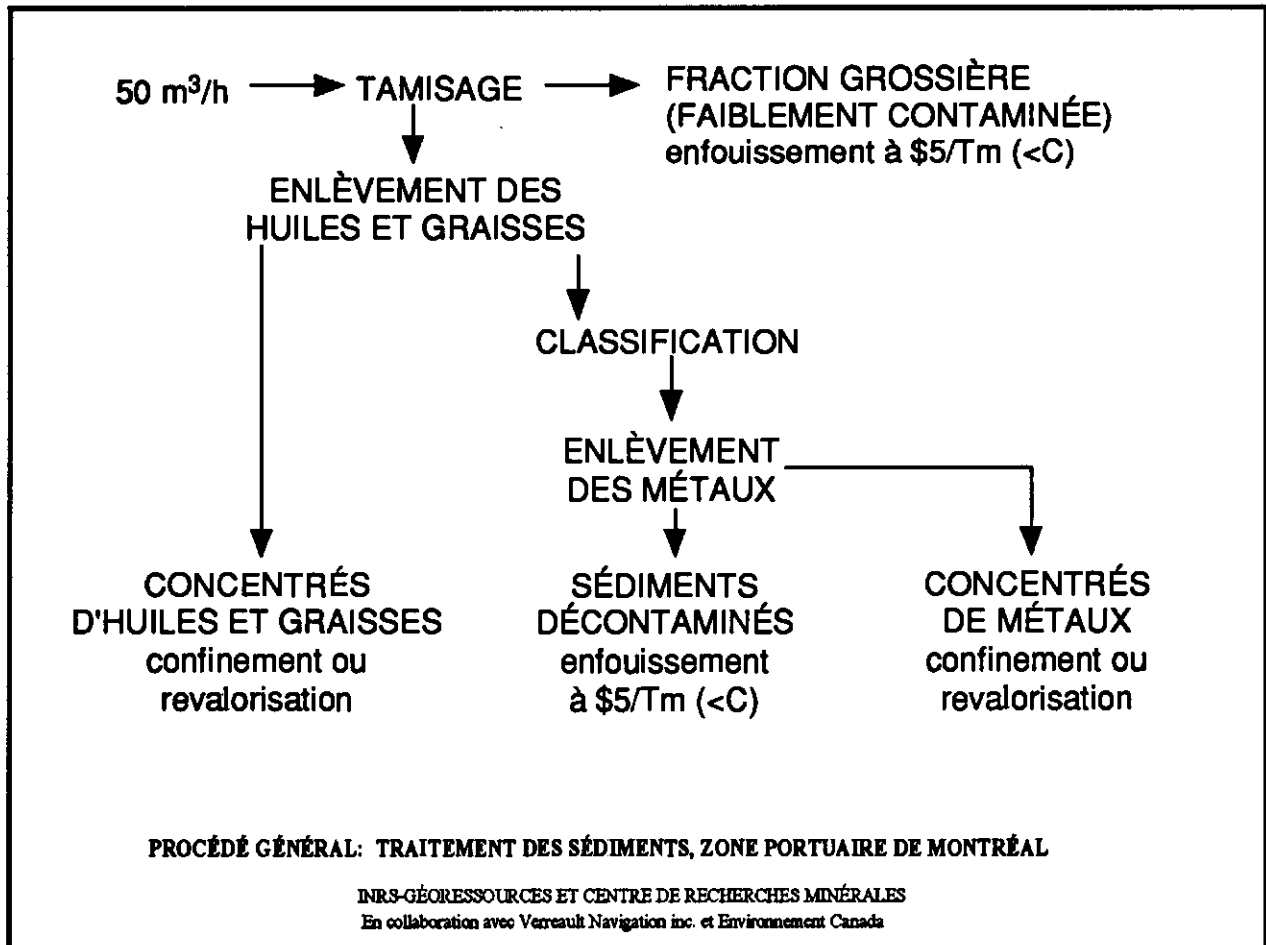


Figure 8 : Procédé général de traitement des sédiments contaminés : zone portuaire de Montréal

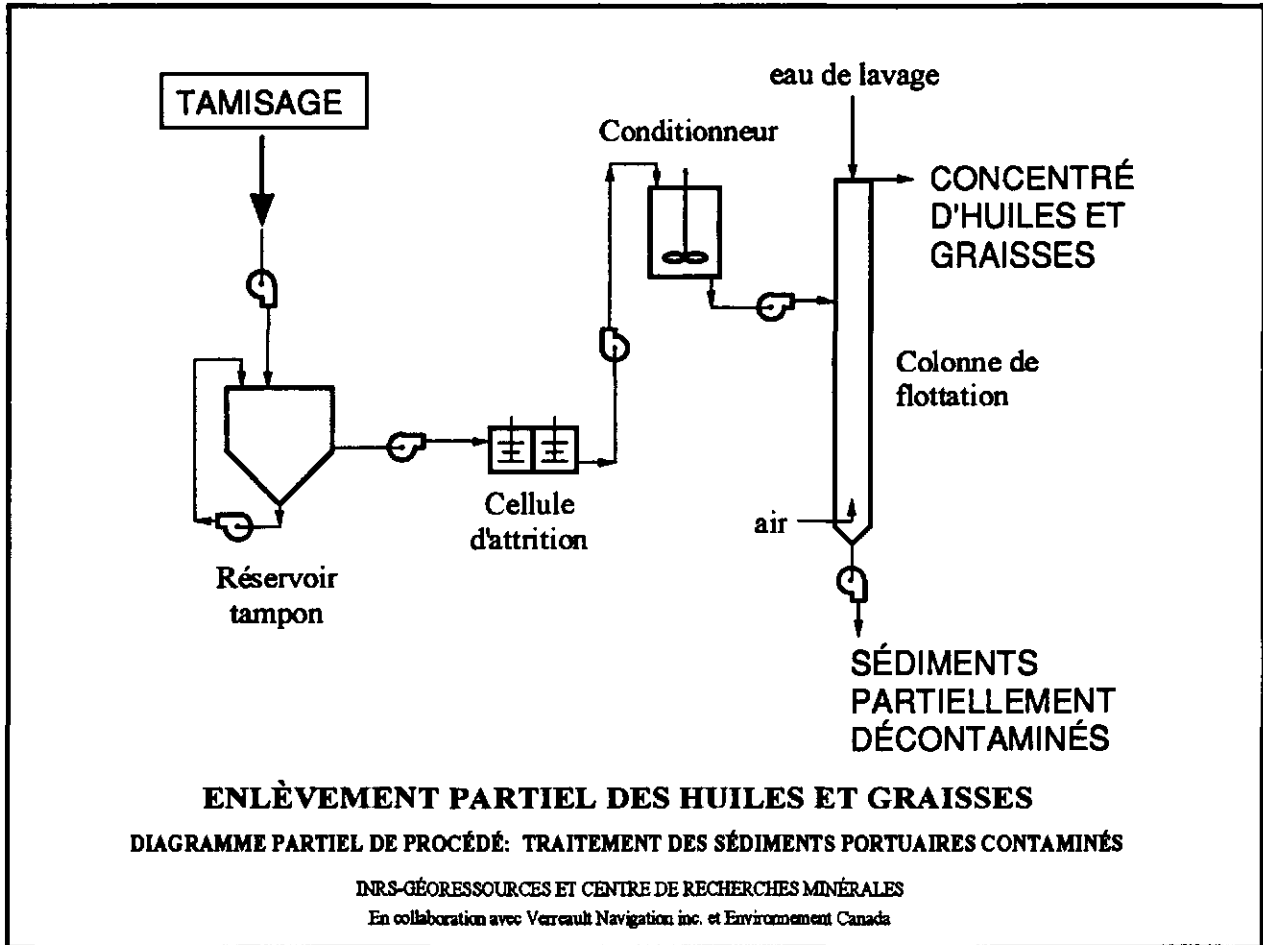


Figure 9 : Enlèvement partiel des huiles et graisses, zone portuaire de Montréal

À ce stage du traitement, la majorité des hydrocarbures pétroliers ont été enlevés du sédiment contaminé. La prochaine étape consiste en l'enlèvement des contaminants métalliques. Pour ce faire le sédiment est d'abord classifié pour être ensuite dirigé vers des équipements de récupération des contaminants métalliques (figure 8).

L'enlèvement des contaminants métalliques est plus facile à réaliser quand les particules solides sont préalablement classées en fonction de leur grosseur (les fines d'un côté, les grosses de l'autre). On a donc recours à une série d'hydrocyclones pour réaliser ce travail. Des hydrocyclones, disposés en séries, permettent de classer le sédiment en deux fractions, l'une inférieure à 20 microns l'autre supérieure à 20 microns (figure 10).

Après l'étape de classification les deux courants de sédiment sont dirigés par des circuits indépendants vers des unités de flottation. On procède à l'ajout de collecteurs et d'agents moussants appropriés au cours de l'étape de conditionnement (figure 11). Les contaminants métalliques sont isolés de la matrice sédimentaire dans une colonne de flottation. Le concentré métallique obtenu à la partie supérieure de la colonne de flottation est ensuite filtré sur un filtre à bande.

De façon similaire à la flottation des hydrocarbures pétroliers, on retrouve, à la base de la colonne, le sédiment partiellement décontaminé. Celui-ci est alors dirigé vers des équipements complémentaires (non présentés) qui permettent de finaliser l'enlèvement des contaminants métalliques. La dernière étape du traitement implique la filtration du sédiment sur un filtre à bande. Le sédiment traité se classifie sous le critère C.

3.4.3 Résultats de traitement

Les résultats des essais optimaux sont présentés au tableau 20 et aux figures 12 A et 12 B. Le procédé permet donc un abaissement des teneurs en métaux et en composés organiques sous le critère C.

Pour les hydrocarbures pétroliers dont les teneurs avant traitement sont de 24 000 ppm, le traitement par flottation abaisse cette valeur à 2500 ppm (pourcentage d'enlèvement de 89 %). Les composantes inorganiques présentent des pourcentages d'enlèvements de 56 % pour As, 79 % pour Cu, et de 99 % pour Se.

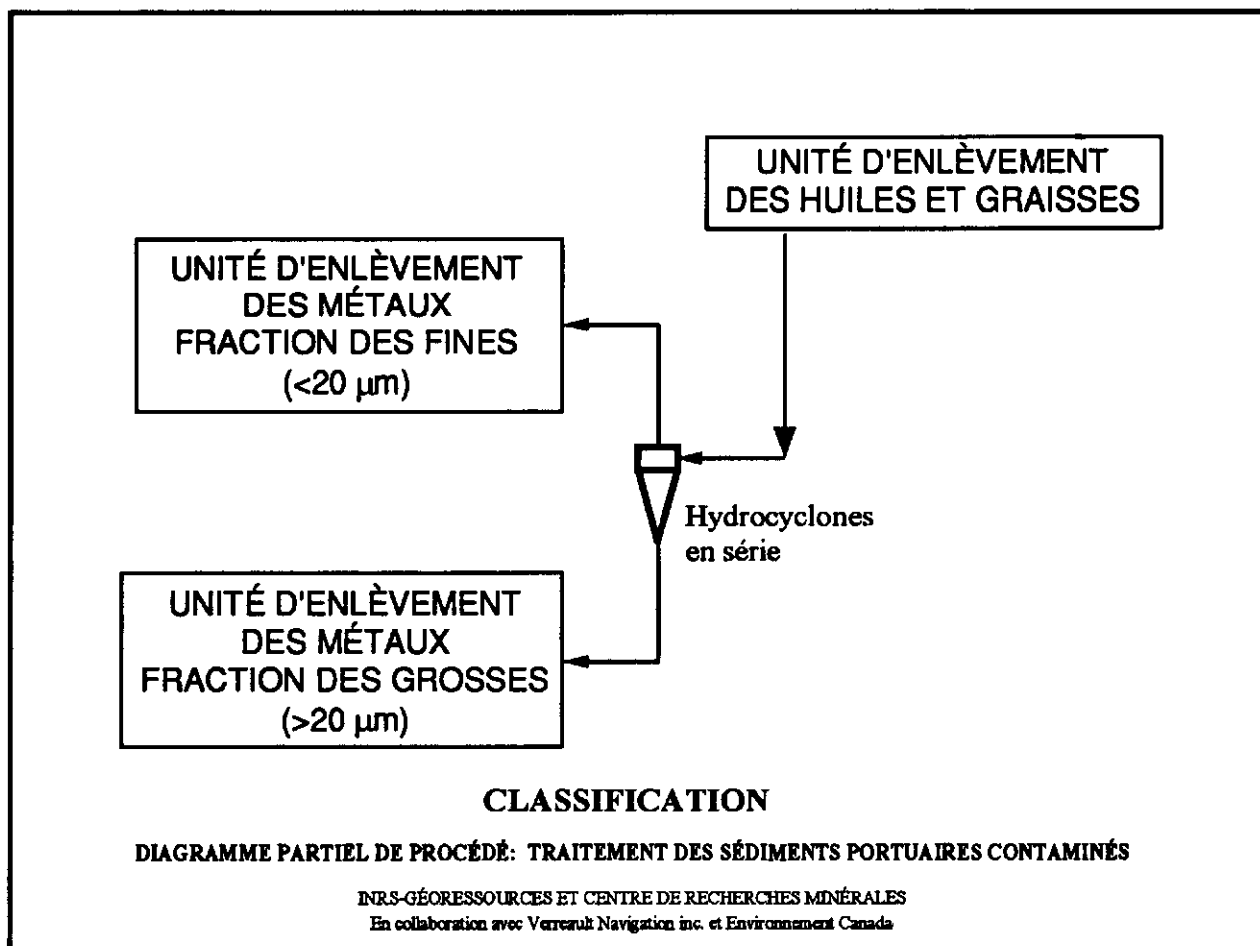


Figure 10 : Classification des sédiments, zone portuaire de Montréal

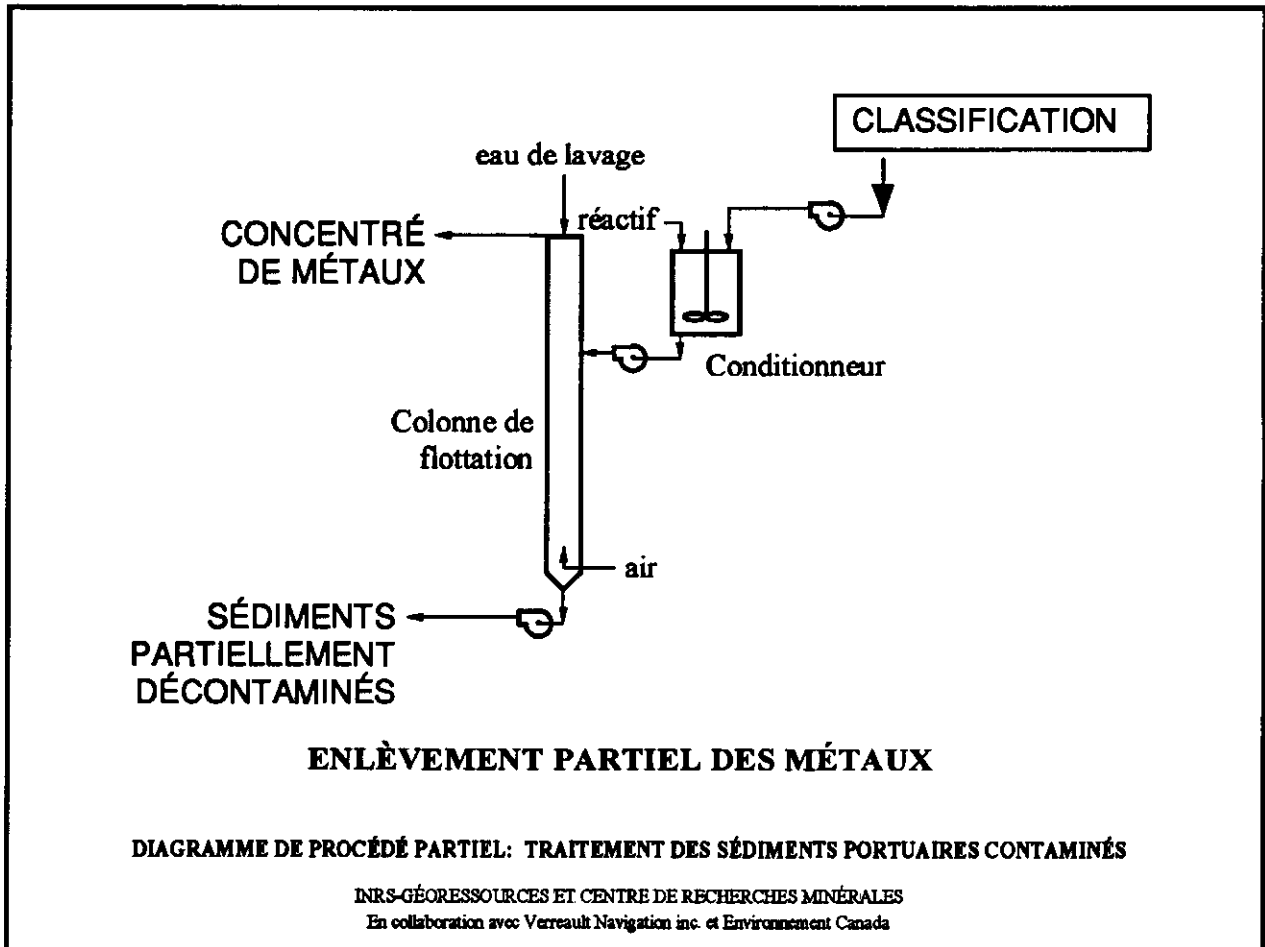


Figure 11 : Enlèvement partiel des métaux des sédiments, zone portuaire de Montréal

Tableau 20 : Présentation du SEN, des teneurs en métaux et en composés organiques avant traitement, du critère B, du critère C et des teneurs en métaux et en composés organiques des sédiments traités de la zone portuaire de Montréal

Paramètres	SEN	Z.P. de Montréal	Critère B	Objectif	Z.P. de Montréal	Enlèvement
	(ppm)	Début (ppm)*	(ppm)	Critère C	Fin (ppm)+	%
Argent (Ag)		33	20	40	20	
Arsenic (As)	17	90	30	50	40	56%
Baryum (Ba)		2135	500	2000	980	54%
Cadmium (Cd)	3	6	5	20	4.5	
Cobalt (Co)		15	50	300	n.m.	
Chrome (Cr)	100	602	250	800	434	
Cuivre (Cu)	86	2352	100	500	490	79%
Étain (Sn)		< 10	50	300	< 10	
Mercure (Hg)	1	1.23	2	10	1	
Molybdène (Mo)		< 5	10	40	< 5	
Nickel (Ni)	61	145	100	500	142	
Plomb (Pb)	170	110	500	1000	108	
Sélénium (Se)		115	3	10	< 1	99%
Zinc (Zn)	540	646	500	1500	442	
BPC	1	< 0,5	1	10	n.m.	
C10 à C50 (hydrocarbures pétroliers)		24 000	700	3500	2500	90%

Z.P. : zone portuaire

* : Valeur la plus élevée des moyennes (voir caractérisation)

+ : Valeur obtenue par combinaison des résultats selon coupe granulométrique (résultats en annexe)

n.m.: non-mesurée

Les % d'enlèvements ont été calculés seulement pour les contaminants dont les teneurs dans l'échantillon de départ se situaient au dessus du critère C.

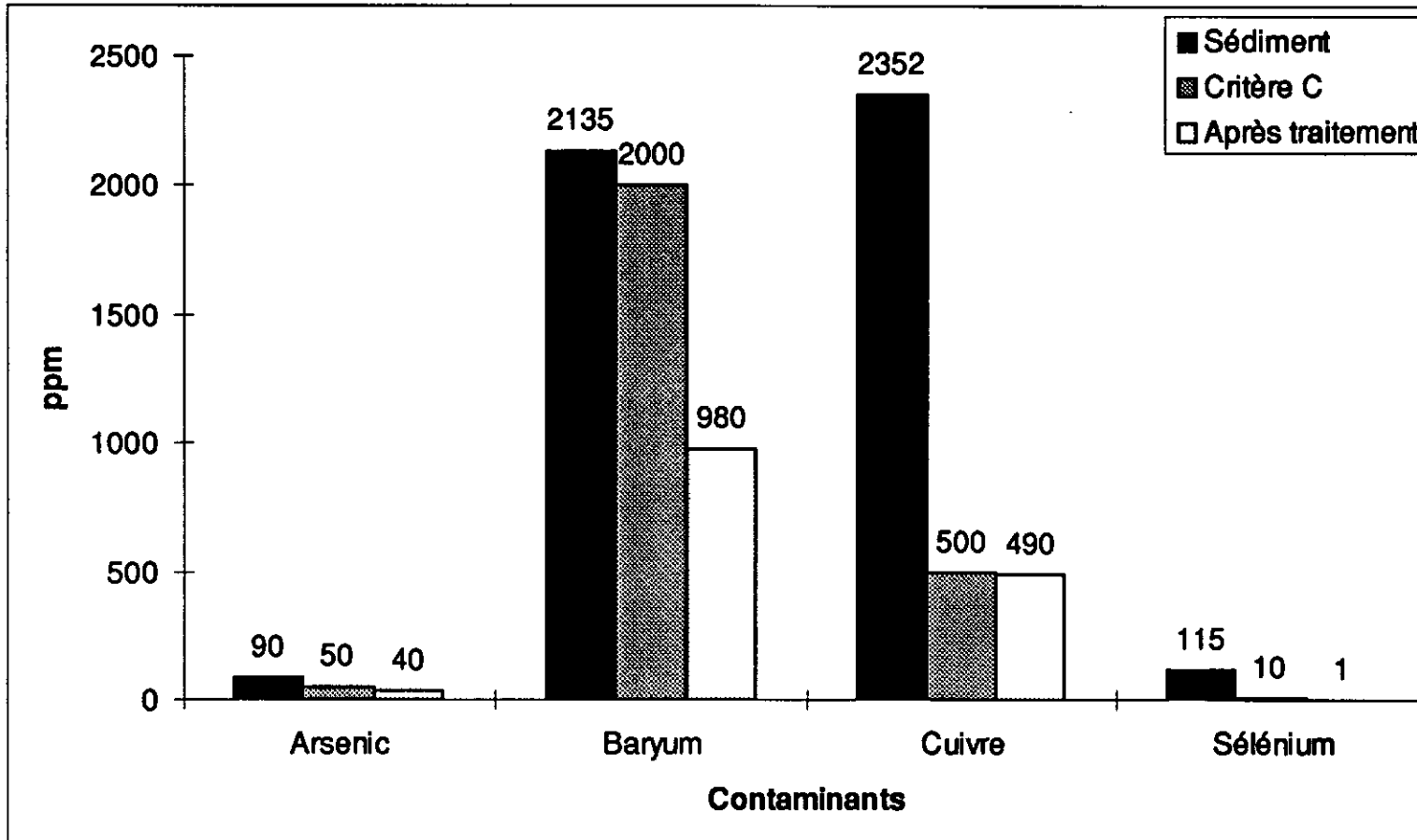


Figure 12 A : Concentrations, Critères C, teneurs après traitement, des principaux contaminants inorganiques, zone portuaire de Montréal.

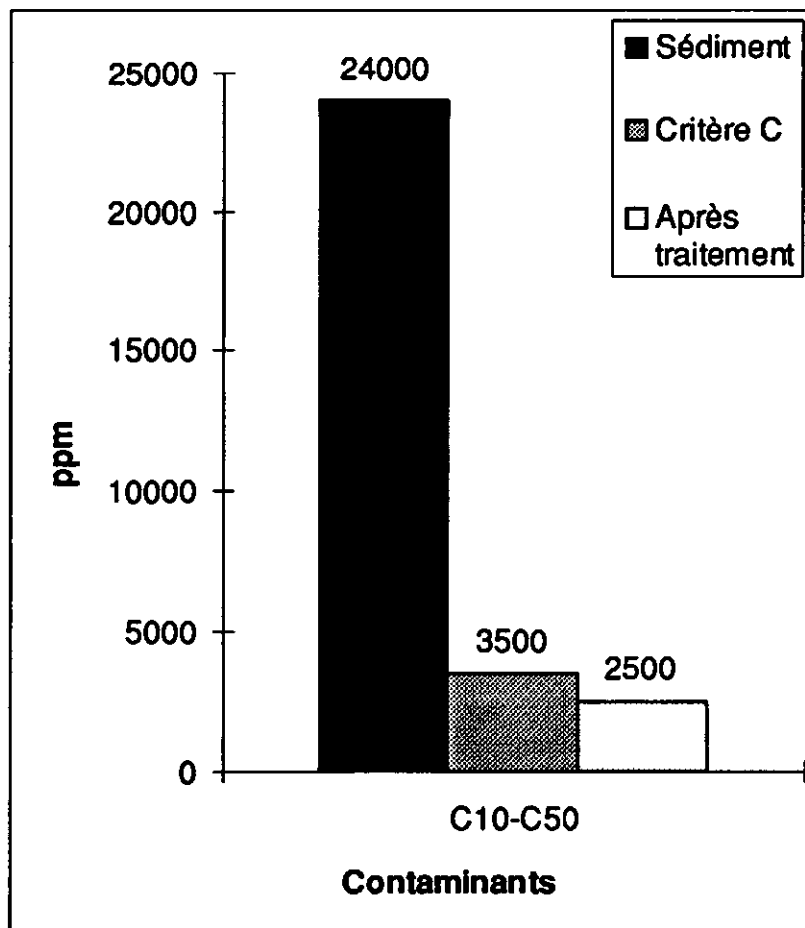


Figure 12 B : Concentrations, Critères C, teneurs après traitement, des hydrocarbures pétroliers, zone portuaire de Montréal.

3.4.4 Bilan de masse

Le bilan de masse pour le diagramme de procédé applicable à la zone portuaire de Montréal, section du quai 103, est présenté au tableau 21.

Tableau 21. Bilan de masse du procédé

Paramètres	Fraction grossière (%)	Concentré d'hydrocarbures pétroliers (%)	Concentré de métaux (%)	Sédiments traités (%)	Eau (%)
Distribution massique (Tm)	1 (100/0)*	5 (33/67)	11 (38/62)	15 (72/28)	68 (0/100)
Distribution massique sec (Tm)	5	10	23	62	0
Distribution volumique (m ³)	0.4	5	9	10	75.6

Distribution massique : distribution des masses des produits obtenus du traitement; les masses sont exprimées en pourcentage de la masse *in situ* contaminée (56 000 Tm).

Distribution volumique : distribution des volumes des produits obtenus du traitement; les volumes sont exprimés en pourcentage du volume *in situ* contaminé (40 000 m³).

*: (% solide / % eau)

Masse volumique des sédiments secs : 2.6 kg/m³

Masse volumique de l'eau : 1.0 kg/m³

3.4.5 Disposition des sédiments décontaminés

Les sédiments traités présentent des teneurs en contaminants inférieures au critère C, ce qui permet d'en disposer à faibles coûts. Le scénario envisagé pour disposer des sédiments décontaminés exige la filtration des sédiments traités (afin de les rendre «pelletable») et leur transport jusqu'à la carrière Miron.

3.4.6 Disposition des concentrés de métaux

Nous espérons produire un concentré de métaux attrayant pour l'industrie métallurgique (voir la section 3.4.8). Il se pourrait cependant que le concentré soit enfoui (en partie ou totalement) dans un site spécial. Le traitement du concentré sera tributaire de son site de disposition. L'option "enfouissement" exige une filtration du concentré afin d'en diminuer le volume et de permettre son transport sur une courte distance à plus faibles coûts.

3.4.7 Disposition des concentrés d'huiles et graisses

Présentement, il est prévu d'acheminer les concentrés d'hydrocarbures pétroliers chez un récupérateur spécialisé après une étape de filtration. Celle-ci servant à limiter le volume des concentrés. Une valorisation des concentrés est potentiellement envisageable.

3.4.8 Revalorisation des concentrés métalliques et des concentrés d'hydrocarbures pétroliers

Pour la zone portuaire de Montréal, des teneurs intéressantes en Au, Ag et Cu sont présentes dans les concentrés. Les teneurs les plus élevées retrouvées dans les concentrés sont de 1,5 % Cu, 4 g/T Au, 120 g/T Ag. Ces teneurs sont normalement traitables, selon les règles en vigueur dans l'industrie minière, par un concentrateur à forfait (usine de flottation). Ce concentré peut aussi être dirigé vers une fonderie (smelter). Dans les deux cas, la prochaine étape est de produire à une échelle industrielle un échantillon représentatif de la zone à traiter (un concentré) de plusieurs centaines de kilogrammes. Des sous échantillons de ce concentré seront acheminés vers différents acheteurs potentiels pour évaluation finale. Actuellement, il n'est pas possible de poursuivre cette démarche de revalorisation des concentrés métalliques, faute d'une quantité suffisante de matériel.

La possibilité de revalorisation des concentrés d'hydrocarbures pétroliers n'est envisageable que pour la zone portuaire de Montréal, celle de Québec n'en contenant peu ou pas. Les normes en vigueur dans l'industrie des cimenteries pour le brûlage des hydrocarbures pétroliers à des fins énergétiques requièrent une production moyenne de 30 000 BTU/l. Actuellement, le procédé ne permet pas d'atteindre cette capacité calorifique, étant donné la forte teneur en matériaux sédimentaires fins et en eau dans le concentré obtenu.

Des essais préliminaires non inclus dans le présent rapport indiquent qu'il est possible d'éliminer une forte proportion de l'eau associée au concentré d'hydrocarbures pétroliers, par simple décantation. Pour le nettoyage des matériaux sédimentaires fins contenus dans le concentré d'hydrocarbures pétroliers, il sera nécessaire de procéder à des travaux supplémentaires portant sur l'optimisation du délogement des hydrocarbures pétroliers du sédiment à une étape précédant la flottation.

3.4.9 Eaux de procédé

Le règlement 87 de la Communauté Urbaine de Montréal, relatif aux rejets des eaux usées dans les réseaux d'égout et les cours d'eau, s'applique à nos eaux de procédé. Les résultats d'analyses obtenus selon les méthodes recommandées par le *Standards methods for the examination of water and waste water*, sont présentés à la page suivante. Ces résultats ne laissent entrevoir aucune difficulté à répondre aux normes de rejets directs dans l'égout pluvial. L'eau de procédé servant aux analyses a été recueillie en fin de procédé et a été prélevée par une simple décantation sans ajout de coagulant et de floculant donc sans optimisation. Les résultats d'analyses brutes sont présentés à l'annexe XIV.

Tableau 22 : Résultats des analyses des eaux usées selon le règlement 87 de la Communauté Urbaine de Montréal relatif aux rejets des eaux usées dans les réseaux d'égout et les cours d'eau.

Réseau d'égout unitaire ou domestique ou sanitaire ou en réseau		Réseau d'égout pluvial ou hors-réseau	
Température < 65 °C	oui	Température < 65 °C	oui
pH entre 6.0 et 10.5	oui	pH entre 6.0 et 9.5	oui
< 30 mg / l d'huiles , graisses ou goudron d'origine minérale ou synthétique	0.5	< 15 mg / l d'huiles ou de graisses d'origine minérale, synthétique, animale ou végétale	0.7
< 150 mg / l de graisses ou d'huiles d'origine animale ou végétale	0.2	< 30 mg / l de matières en suspension et < à 6 mm.	37
< 3 mg / l (exprimés en CN) de cyanures oxydables par chloration	0.02	< 30 mg / l de DBO ₅	n.a.
		< 15 unités de couleur après extraction des matières en suspension et ajout de quatre parties d'eau distillée ou déminéralisée	105 N.A.
< 10 mg / l (exprimés en CN) de cyanures totaux	0.02	< 0.1 mg / l (exprimés en CN) de cyanures totaux	0.02
< 5 mg / l (exprimés en S) de sulfures totaux	< 0.5	< 1 mg / l (exprimés en S) de sulfures totaux	< 0.5
< 1 mg / l d'arsenic total As	0.04	< 1 mg / l d'arsenic total As	0.04
< 2 mg / l de cadmium total Cd	< 0.00	< 0.1 mg / l de cadmium total Cd	< 0.00
< 5 mg / l de cuivre total Cu	0.38	< 1 mg / l de cuivre total Cu	0.38
< 0.05 mg / l de mercure total Hg	n.m.	< 0.001 mg / l de mercure total Hg	n.m.
< 1 mg / l de composés phénoliques totaux	0.002	< 0.02 mg / l de composés phénoliques totaux	0.002
< 2 mg / l de plomb total Pb	0.08	< 0.1 mg / l de plomb total Pb	0.08
< 5 mg / l de chrome total Cr	1.22	< 1 mg / l de chrome total Cr	1.22
< 5 mg / l d'étain total Sn	0.18	< 1 mg / l d'étain total Sn	0.18
< 5 mg / l de nickel total Ni	0.61	< 1 mg / l de nickel total Ni	0.61
< 10 mg / l de zinc total Zn	0.04	< 1 mg / l de zinc total Zn	0.04
		< 2 mg / l de fluorures totaux F	2.9
		< 1 mg / l de chlore total Cl ₂	n.a.
		< 1500 mg / l de chlorures totaux Cl	30.2
		< 17 mg / l de fer total Fe	1.01
		< 1 mg / l de baryum total Ba	0.21
		< 1 mg / l de phosphore total P	1.4
		< 1500 mg / l de sulfates totaux SO ₄	126
< 12 kg / j de masse totale en arsenic, cadmium, chrome, cuivre, nickel, plomb et zinc	oui	< 2 kg / j de masse totale en arsenic, cadmium, chrome, cuivre, nickel, plomb et zinc	oui
< 15 mg / l de concentration totale en arsenic, cadmium, chrome, cuivre, nickel, plomb et zinc	oui		
		< 2400 bactéries coliformes / 100ml ou 400 coliformes fécaux / 100 ml	n.a.

n.a.: non-applicable car échantillonné et traité depuis trop longtemps

n.m. : non-mesuré

Analyse selon Standards methods for the examination of water and waste water

3.4.10 Coûts de traitement anticipés à l'échelle industrielle

Les coûts d'exploitation globaux d'une unité de traitement (incluant la location des équipements de traitement, le dragage, le traitement et la disposition et/ou la valorisation des matériaux traités et des concentrés métalliques ou d'hydrocarbures pétroliers) peuvent varier entre 55 \$/Tm à 220 \$/Tm selon du volume à traiter (tableau 23).

Tel que démontré au tableau 23, ces coûts sont comparables à ceux rapportés dans la littérature notamment à ceux de la technologie commerciale de traitement Bergmann applicable aux sols et sédiments contaminés et qui a été développée à partir de l'utilisation d'équipements miniers. L'efficacité de la technologie Bergmann a été démontrée dans le cadre de plusieurs projets de traitement de sédiments tant en Europe, qu'en Amérique du Nord. Les estimés de coûts d'application du procédé de traitement Bergmann qui ont été préparés par le US-EPA Superfund Innovative Technology Evaluation (SITE) Program sont tirés du Remediation Guidance Document (ARCS) Program⁵.

Il convient de noter aussi que les limites technologiques du procédé Bergmann ne permettraient pas normalement son application éventuelle aux sédiments du secteur du quai 103 de la zone portuaire de Montréal. Tel que rapporté à la section 1.6 du présent rapport, la technologie Bergmann ne s'applique pas au traitement de sédiments contenant plus de 30% de matériel inférieur à 45 microns (Traver, 1996). La section étudiée de la zone portuaire de Montréal est constituée de sédiments dont 60 % présentent des diamètres de particules inférieures à 45 microns et pour lesquels a priori, le traitement Bergmann serait non applicable.

⁵ U.S. Environmental Protection Agency. 1994. «ARCS Remediation guidance document» EPA 905-B94-003. Great Lakes National Program Office, Chicago, IL.

Tableau 23. Estimés de coûts en fonction de volumes à traiter.

Volume du site à traiter	Coûts globaux	
	\$ Can/Tm	
Tonne métrique	Bergmann	INRS/CRM
14 560	225 \$	220 \$
45 000	185 \$ ^(a)	160 \$
89 180	120 \$	100 \$
222 950	85 \$	70 \$
1 490 580	60 \$	55 \$

(a) estimé obtenu à partir d'une interpolation graphique.

Comme la plupart des technologies de traitement, les coûts d'exploitation varient principalement en fonction:

1. du type de contaminants en présence (contamination organique ou inorganique ou contamination mixte);
2. du niveau de contamination;
3. du volume à traiter ainsi que du type de matrices;
4. des critères de restauration recherchés;
5. des modes de disposition ou de traitement des concentrés métalliques et d'hydrocarbures pétroliers obtenus lors du traitement;

Les coûts précédents sont présentés à titre indicatif et ne pourront être validés qu'après la réalisation d'un projet de démonstration technologique sur le terrain portant sur toute la chaîne de traitement, depuis le dragage des sédiments jusqu'au traitement et à la disposition ou à la valorisation des résidus et des sédiments traités. En plus de valider la technologie aux plans technique, environnemental et économique, ce projet de démonstration est nécessaire pour préciser tous les autres coûts indirects liés à un projet de restauration des sédiments contaminés notamment ceux découlant des mesures de protection de l'environnement, des programmes de santé et sécurité au travail et des programmes de surveillances et de suivis environnementaux.

3.4.11 Applicabilité sur d'autres sites

Même si le procédé a été développé à partir de technologies minières connues et versatiles, il n'en demeure pas moins que son efficacité est spécifique à la zone portuaire de Montréal, quai 103.

Afin de juger de l'applicabilité du procédé sur d'autres sites, il faut:

- dans un premier temps, obtenir un échantillon représentatif du site visé et procéder à une caractérisation minéralurgique (granulométrie, chimie, minéralogie); cette étude permet de localiser les phases contaminantes en fonction de la granulométrie de l'échantillon, d'évaluer le degré de libération des phases minéralogiques transportant les métaux contaminants, de déterminer les types de contaminants organiques. Cette étape de caractérisation de type «go no-go» est déterminante pour les étapes subséquentes d'applicabilité;
- dans un deuxième temps, il est nécessaire de procéder à des essais préliminaires de récupération à l'échelle laboratoire sur des échantillons de quelques kg. Des essais de concentration par des méthodes physiques (gravimétrie, flottation, magnétisme) sont alors effectués;
- finalement, une série d'essais plus poussés (échelle laboratoire et/ou pilote) permet de déterminer les seuils optimaux de décontamination ainsi que les coûts de traitement.

À la suite de ces travaux, le procédé est ajusté, si nécessaire, en fonction des critères de décontamination recherchés.

3.4.12 Limite technologique du procédé

Le développement de ce procédé est basé sur la réalisation de plus de 200 essais de récupération des contaminants aux échelles laboratoire et pilote. Les résultats de ces essais et l'information disponible dans la littérature sur les plages maximales d'efficacité des technologies de flottation en colonne et en cellule ainsi que sur celles des équipements gravimétriques du type séparateur à gravité-multiples (MGS) et super Bowl permettent de discuter des limites technologiques du procédé.

Actuellement, le procédé développé permet de ramener les teneurs en contaminants sous celles du critère C applicable à la disposition terrestre.

Le procédé développé peut techniquement atteindre des seuils de décontamination:

1. sous le critère B en qui concernent les dépôts terrestres;
2. sous le critère SEM des dépôts aquatiques.

Deux types de limites technologiques sont apparents.

Un premier type de limite est lié à la récupération des métaux. Le pourcentage de récupération d'un métal spécifique est dépendant de son degré de libération et de sa distribution granulométrique dans la matrice à décontaminer. Les équipements utilisés dans la construction du schéma de procédé sont considérés comme actuellement les plus performants dans la récupération de particules fines. Techniquement, la flottation permet de traiter les sédiments composés de particules d'un diamètre supérieur à 1 micron. Le MGS et le Super Bowl permettent, quant à eux, des récupérations sur des matrices sédimentaires dont les grains présentent des diamètres supérieurs à 1 micron et 10 microns respectivement (voir figure 1). Ainsi, l'atteinte d'objectifs de décontamination sous les critères B et SEM est techniquement envisageable pour des matrices sédimentaires dont les grains ont des diamètres supérieurs à 1 micron et dont les contaminants métalliques sont libérés de la matrice.

Le deuxième type de limite est associé à la récupération des organiques. Ce facteur limitant est plus problématique à définir. En effet, il existe très peu de données sur le comportement de ces composés dans des colonnes de flottation. Les équipements gravimétriques ne peuvent être utilisés pour effectuer la récupération des composés organiques. En ce qui concerne l'utilisation de colonne de flottation, le délogement des composés organiques adsorbés sur les grains composant la matrice sédimentaire constitue l'étape déterminante. Ce délogement est effectué, dans le présent procédé, avant l'étape de flottation en tant que telle. La flottation des composés organiques après l'étape de délogement est simple à réaliser, ces composés étant hydrophobes. Actuellement, le procédé utilise des conditions de délogement des composés organiques qui ne sont pas optimales. Une étude d'optimisation permettrait, a priori, d'atteindre des teneurs inférieures à celles répertoriées par les critères B et SEM. Il est à noter que le degré de libération n'est pas, dans le cas des composés organiques, un facteur limitatif. La granulométrie du matériel de départ sera, de façon similaire aux contaminants métalliques, un facteur limitatif tel que discuté dans le paragraphe précédent.

Les travaux nécessaires à l'applicabilité du procédé sur d'autres sites ont déjà été présentés. Cependant, d'une manière générale il est possible d'identifier rapidement les zones portuaires et fluviales les plus susceptibles d'être traitées par le procédé. Ceci en combinant l'information tirée de cartes décrivant la géologie des formations superficielles d'une région donnée, à celle obtenue à partir de l'utilisation de cartes de caractérisation environnementales. Par exemple, ce type d'approche pour la région des Grands Lacs permettrait de discerner rapidement les zones portuaires susceptibles d'être traitées par le procédé. Ces informations devraient être complétées par un examen minéralogique de la zone à décontaminer tel que discuté en 3.4.11.

Finalement, l'utilisation de technologies minières de types hydro-métallurgiques et pyrométallurgiques n'a pas été examinée étant donné les coûts élevés de traitement et d'investissement associés aux déploiements de ces technologies. Ces technologies, indépendamment de leur coût d'utilisation, ne seront pas limitées par la granulométrie et le degré de libération. En théorie l'atteinte d'objectifs de décontamination à des seuils extrêmement faibles est possible.

La prochaine étape de vérification du procédé implique une démonstration technologique de traitement sur le site. En effet, bien que le procédé ait été développé par des essais aux échelles laboratoires et pilotes, son efficacité n'a pas été confirmée par un essai en continu. Cette vérification n'a pas été effectuée étant donné la quantité relativement importante de sédiments qu'il aurait fallu transporter de Montréal vers Québec.

Dans cette optique, une étape de démonstration technologique sur un site s'impose avant de procéder à un éventuel projet de traitement à l'échelle industrielle. Les objectifs principaux visés au cours de cette démonstration technologique sont de:

1. Vérifier en mode continu le schéma de traitement;
2. Certifier la technologie en fonction des critères de traitement visés; actuellement: atteinte de teneurs en contaminants inférieures à celles rapportées pour le critère C du MEF et production d'un concentré métallique revalorisable;
3. Confirmer les données technico-économiques obtenues au cours du pilotage en usine.

Actuellement il est prévu de procéder à la vérification en continu du schéma de traitement à l'échelle 1/100 de l'échelle industrielle. La raison principale de ce choix est basée sur la possibilité d'avoir un accès rapide à des équipements complémentaires ou non prévus initialement au schéma de procédé et qui sont disponibles à la station d'essais du Centre de Recherches Minérales.

Dans le cas où la démonstration technologique est effectuée à une échelle plus importante, l'accès rapide à des équipements complémentaires ne sera plus possible. Il faudrait alors louer ou acheter ces équipements à divers fournisseurs ce qui impliquerait des délais d'attente de plusieurs semaines.

Brièvement, les travaux prévus comprennent le prélèvement en continu des sédiments à l'aide d'une mini-drague drague, l'alimentation de l'unité de démonstration à un débit de 0.5m³/h pendant une période de 72 heures et le suivi temporel du procédé en regard des critères environnementaux.

Une attention particulière sera apportée à la fraction grossière supérieure à 1.7 mm. Ceci afin de s'assurer que cette fraction est peu ou pas contaminée. Une proposition d'un projet de démonstration technologique décrivant l'ensemble des activités prévues est actuellement disponible auprès de l'INRS-Géoressources.

3.4.13 Potentiel de commercialisation de la technologie

Les applications potentielles des procédés minéralurgiques aux domaines environnementaux sont nombreuses. Ces approches permettent de séparer des métaux, d'un mélange donné de solides, à condition que les solides à séparer montrent une différence de densité spécifique supérieure à 1g/cm^3 et/ou qu'ils soient libérés de la matrice et qu'ils s'agissent de particules de quelques micromètres de diamètre.

A première vue, les champs d'application les plus prometteurs en ce qui concerne la protection de l'environnement sont:

1. la décontamination des zones portuaires et fluviales des Grands Lacs et du fleuve St-Laurent;
2. la décontamination des cendres d'incinérateur des métaux qu'elles contiennent;
3. la séparation des sulfures du charbon;
4. la séparation des sulfures contenus dans des résidus miniers;
5. le traitement des effluents d'usines contenant des solides lourds, y compris les rejets d'usines de première transformation des substances métalliques
6. le traitement des étangs industriels de sédimentation.

Selon nous, il est très clair que notre procédé de décontamination a un excellent potentiel de réussite technique et de commercialisation car:

1. les techniques basées sur les approches gravimétriques et sur les approches en flottation sont à l'heure actuelle les moins dispendieuses de toutes celles qui sont disponibles en traitement de minerai;
2. le procédé proposé est supérieur aux techniques de confinement en raison de son coût d'opération moindre et de sa capacité à résoudre définitivement le problème; en effet les techniques de confinement:
 - a) engendrent des frais importants reliés à la construction de cellules de confinement étanches à l'eau et à l'oxygène, le contact de l'oxygène avec des minéraux provoquant souvent la génération d'eau acide et la solubilisation de métaux;
 - b) requièrent un monitoring à long terme des cellules de confinement afin de s'assurer de leur étanchéité;
3. le procédé que nous proposons ne génère pas de substances toxiques; les agents de flottation utilisés ont été choisis en fonction de leur non-toxicité.
4. tous les ingrédients essentiels à son utilisation sont présents en abondance dans la matrice à décontaminer:
 - a) l'eau, pour créer le milieu fluide assurant la séparation;
 - b) les sédiments sont déjà sous une forme acceptable pour les appareils;
5. le schéma de traitement contient une étape finale de concentration qui permet d'atteindre dans le concentré métallique des teneurs acceptables par les fonderies; ainsi le concentré toxique est finalement incorporé dans le cycle économique de la vente des métaux;

Le potentiel de commercialisation de la technologie apparaît, à première vue, important, étant donné le nombre de sites contaminés répertoriés jusqu'à présent. Bien que le procédé développé comporte des coûts d'opération faibles, les coûts globaux de décontamination demeurent cependant relativement importants lorsque l'on tient compte des coûts en investissement et de disposition des concentrés obtenus.

Actuellement, il est difficile de chiffrer le marché potentiel d'une telle technologie de décontamination, mais il est certainement supérieur à 100 millions de dollars.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Certains secteurs des zones portuaires de Montréal et de Québec sont contaminés au-dessus du seuil d'effet néfaste (SEN). Des échantillons provenant d'un secteur de la zone portuaire de Québec sont contaminés par des métaux. Les contaminations en cuivre, en zinc et en cadmium sont respectivement de 8, 13 et de 16 fois supérieures au SEN. Ces contaminants sont dispersés dans toutes les tranches granulométriques examinées (<12 µm <45 µm <75 µm < 150 µm > 150 µm). Des contaminations moins importantes en nickel, chrome, plomb et arsenic y sont aussi présentes selon la granulométrie. Près de 35% en masse de ces sédiments ont un diamètre inférieur à 45 µm.

Des sédiments provenant d'une section de la zone portuaire de Montréal sont fortement contaminés par les métaux et les hydrocarbures pétroliers. Les contaminants métalliques, pour toutes les tranches granulométriques examinées (<12 µm <45 µm <75 µm < 150 µm > 150 µm), sont le cuivre, le chrome, l'arsenic, le nickel lesquels présentent des teneurs respectivement de 53, 9, 6 et de 3 fois supérieures au SEN. Les concentrations en hydrocarbures pétroliers sont de 8 fois supérieures au SEN. Plus de 60% (en masse) de ces sédiments ont un diamètre inférieur à 45 µm. Tous les contaminants inorganiques sont libres et potentiellement récupérables par des procédés minéralurgiques.

Des essais de traitement de ces sédiments contaminés ont été effectués par utilisation de procédés minéralurgiques. Étant donné la présence importante de particules fines dans les échantillons (< 45 µm) les essais ont particulièrement visé l'utilisation d'équipements adaptés aux traitements des fines, soit le séparateur à gravité multiple de Mozley Inc., (MGS) et les technologies de flottation (cellules et colonnes).

En ce qui concerne les sédiments contaminés de la zone portuaire de Québec, les essais avec le MGS et les équipements de flottation permettent l'atteinte de teneurs sous le critère C. Un schéma de traitement préliminaire élaboré à partir de l'utilisation d'équipements de flottation a été proposé. Les essais de flottation indiquent pour le zinc que les teneurs passent de 2252 ppm (avant traitement) à 620 ppm (après traitement) ce qui correspond à un enlèvement de 73%. Un rendement similaire a été noté pour le cuivre avec un enlèvement de 75 % (de 557 à 140 ppm). Le concentré métallique obtenu contient 15 % zinc et est en principe revalorisable comme concentré d'alimentation à une fonderie.

Un procédé, vérifié et optimisé à l'échelle semi-industrielle sur une base semi-continue, a été mis au point à partir des échantillons de sédiment provenant d'un secteur de la zone portuaire de Montréal. Il a été décidé de procéder à des essais exhaustifs avec le matériel provenant de cette zone, celui-ci contenant les deux principaux types de contaminants (métalliques, hydrocarbures pétroliers) les plus retrouvés dans les zones portuaires et fluviales. Le procédé permet de récupérer les hydrocarbures pétroliers et les métaux.

Le procédé comprend trois étapes principales. Dans une première étape les hydrocarbures pétroliers sont séparés de la matrice sédimentaire. Cette étape comprend aussi un pré-traitement du sédiment dans une cellule d'attrition. La seconde étape implique une classification du matériel en deux fractions granulométriques. Au cours de la troisième étape les contaminants métalliques sont extraits de ces deux fractions. Les équipements utilisés comprennent entre autres choses des colonnes de flottation.

Trois sous-produits de traitement ont été obtenus. Premièrement, des sédiments traités dont les teneurs en contaminants ont été abaissées sous celles du critère C; deuxièmement, un concentré métallique; troisièmement, un concentré d'hydrocarbures pétroliers.

On note que le traitement abaisse les teneurs en cuivre de 2352 ppm à 490 ppm (enlèvement de 79%), tandis que celles du sélénium passent de 115 ppm à des teneurs inférieures à 1 ppm (enlèvement > 95%). Les concentrations en hydrocarbures pétroliers chutent de 24 000 ppm à 2 500 ppm (enlèvement de 89%). Le bilan de masse du procédé montre, qu'après filtration, le sédiment traité représente 15 % de la masse *in situ*, le concentré organique 2 % et le concentré métallique 4 %.

Il est prévu de disposer, à un coût modique, les sédiments traités dans un site d'enfouissement. Le concentré d'hydrocarbures pétroliers sera dirigé chez un récupérateur spécialisé. Le concentré métallique contenant 1.5% cuivre, 4 g/T or, 120 g/T argent est revalorisable comme alimentation à une fonderie.

Actuellement le procédé ne permet pas d'atteindre les critères B et SEM. Cependant, l'atteinte d'objectifs de décontamination sous les critères B et SEM est techniquement envisageable pour des matrices sédimentaires dont les grains ont des diamètres supérieurs à 1 micron et dont les contaminants métalliques sont libérés de la matrice. Pour définir les limites technologiques du procédé des travaux supplémentaires s'imposent.

Les principales recommandations de ce rapport sont les suivantes. Une démonstration technologique du procédé de traitement développé devrait être effectuée à l'échelle 1/100, cette échelle nous permettant d'avoir accès rapidement à des équipements complémentaires ou non prévus.

Pour le port de Montréal, des essais supplémentaires d'attrition ou de délogement des hydrocarbures pétroliers avant la flottation devraient être effectués afin d'améliorer l'efficacité du procédé et, par le fait même, de diminuer les coûts d'achat d'équipements.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Abdul, A. S. and Gibson, T. L. (1991) *Laboratory Studies of Surfactant-Enhanced Washing of Polychlorinated Biphenyl from Sandy Material*. Environ. Sci. Technol. 25(4):665-671.
- Abdul A.S.; Gibson, T. L.; Ang C.C.; Smith, J. C., and Sobczynski, R. E. (1992) *In Situ Surfactant Washing of Polychlorinated Biphenyls and Oils from a Contaminated Site*. Ground Water. 30(2):219-231.
- Abdul, A. S.; Gibson, T. L., and Rai, D. N. (1990) *Selection of Surfactants for the Removal of Petroleum Products from Shallow Sandy Aquifers*. Ground Water. 28(6):920-926.
- American Public Health Association, American Water Works Association et Water Pollution Control Federation. (1985) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. sixteenth edition*.
- Belhatche Dannelle H. (1995). *Choose Appropriate Wastewater Treatment Technologies*. Wastewater Treatment, Chemical Engineering Progress, August 1995.
- Bergeron M., Plumpton A.J., St-Laurent H., Blackburn D. et Wilhelmy J.F. (1996). *Mise au point d'une méthode de traitement des sédiments portuaires contaminés par application des procédés minéralurgiques. Rapports d'étape 1 et 2. Échantillonnage et caractérisation des sédiments*. INRS-Géoressources, Centres de Recherches Minérales.
- Bistline, R. G. and Linfield, W. M. (1984) *Modification by Surfactants of Soil Water Absorption*. Milton J. Rosen. Structure/Performance Relationships in Surfactants - Based on a symposium sponsored by the Division of Colloid and Surface Chemistry at the 186th Meeting of the American Chemical Society, 1983 Aug. 28-1983 Sept. 2; Washington, DC.: American Chemical Society.
- Bovendeur J. and Mozeley R. (1993). *Characterisation and Treatment of Polluted Material - An Environmental Application of Mineral Processing Technology*. XVIII International Mineral Processing Congress.
- Carpo inc. (1992). *Expanding Leadership in Separation Technology*.
- Centre Saint-Laurent (1993). *Guide pour l'évaluation et le choix des technologies de traitement des sédiments contaminés*. Centre d'action Saint-Laurent, Environnement Canada.
- Centre Saint-Laurent (1992). *Critères intermédiaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent*. Environnement Canada, Ministère de l'Environnement du Québec. ISBN 0-662-97096-9.

- Centre Saint-Laurent (1992). *Guide méthodologique de caractérisation des sédiments*. Centre d'action Saint-Laurent, Environnement Canada.
- Chiu, Y. C.; Han, Y. C., and Cheng, G. M. (1984) *Relationship of Solubilization Rate to Micellar Properties - Anionic and Nonionic Surfactants*. Structure/Performance Relationships in Surfactants - Based on a symposium sponsored by the Division of Colloid and Surface Chemistry at the 186th Meeting of the American Chemical Society; 1983 Aug. 28-1983 Sept. 2; Washington, DC.: American Chemical Society.
- Clifford S.R. (1993) *Removal of organic contamination from Buffalo River sediment by froth flotation*. Minerals and Metallurgical Processing, November 1993, vol.10, no.4.
- Cominco Engineering Services Ltd. *Column Cell Technology*. Canada.
- Communauté Urbaine de Montréal. (1986) *Règlement 87 - Règlement relatif aux rejets des eaux usées dans les réseaux d'égout et les cours d'eau*.
- Ville de Montréal. (1995) *Prix à payer pour le dépôt de sol d'excavation au Centre de tri et d'élimination des déchets (C.T.E.D.)*. Règlement 95-147.
- De Brabandere, J. and Proot, K. (1995). *The ITORICS-SYSTEM : Towards an Integrated Treatment for Sediment Remediation*. Sediment Remediation 95.
- Dekeyser I.C. (1989). *Dredging and the environment*. Methods used to treat contaminated material practical experiences, RAI Congress Centre Amsterdam.
- DETALC (1993). *Application de la technologie Tallon dans le cadre du projet de réhabilitation du site Dickson, Bombardier inc., Montréal, Québec - Résumé du projet*. Programme de développement et de démonstration de techniques d'assainissement de lieux contaminés, Ministère de l'Environnement et de la Faune, Environnement Canada.
- Detzer H.D. (année non-mentionnée). *Treatment of Hambour Sediments at the METHA III Treatment Facility*. Freie und Hansestadt Hamburg, Germany.
- Detzner D., Kitschen L. and Weimerskirch W. (1993). *METHA- The First Large-scale Plant for Treatment of Harbour Sediments*. Aufbereitungs-Technik Mineral Processing.
- Environment Canada (année non-mentionnée). *Number 4 ARC/EPRI Clean Soil Process Bench Scale Demonstration*. Contaminated Sediment Treatment Technology Demonstration Series, Great Lakes Action Plan, Ontario Region.
- Environment Canada (1992). *Number 6 Acres Treatability Study - Welland River Sedimen*. Contaminated sediment treatment technology demonstration series, Cleanup Fund, Fact sheet. Great Lakes Environment Office, Ontario region.
- Eureka inc. (année non-mentionnée). *Joint forces to clean up harbour sludge*. Eureka Project EU 195.

- Fountain, J. C.; Klimek, A.; Beikirch, M. G., and Middleton, T. M. (1991) *The use of surfactants for in situ extraction of organic pollutants from a contaminated aquifer*. Journal of Hazardous Materials. 28:295-311.
- Fuerstenau D.W. (1980). *Fine particle flotation*. Fine Particles Processing, Somasundaran P. 1980.
- Galloway J.E. and Snitz F.L. (1994). *Pilot-scale demonstration of sediment washing*. Dredging 94.
- Gauthier R. (1993). *La problématique du dosage des huiles et graisses minérales*. Vision Science, automne 1993.
- Géophysique GPR International inc. (1995). *Caractérisation et répartition spatiale des sédiments dans les baies situées de part et d'autre du quai 103 (port de Montréal)*. Présenté à Les produits Shell Canada Ltée, La société de la zone portuaire de Montréal, Métallurgie Noranda - Affinerie CCR, Environnement Canada (DPE).
- Great Lakes Environnemental inc. (année non-mentionnée). *Quality Wastewater Treatment Equipment*.
- GL&V Ontario (1996). *GL&V Packed Flotation Column*. Canada.
- Huang S.-D. (1992). *Flotation*. Preconcentration techniques for trace elements, chapter 9.
- Kim J.Y. and Jamaluddin A.K.M. (1995). *Treatment of oily sand using conventional flotation technique*. Waste Processing and Recycling in Mineral and Metallurgical Industries II.
- Kröning H. (1991). *Thickening and Dewatering of Fine-Grained Organic-mineral Dredgings*. Aufbereitungs-Technik Mineral Processing, ISSN 0004-783 X.
- Kröning H. (1990). *Separation and Dewatering of Silt from the Port of Hamburg*. Aufbereitungs-Technik Mineral Processing, ISSN 0004-783 X.
- Lacroix R. (1992) *Technologies des procédés de séparation*. Département de génie chimique de l'Université Laval.
- Majid A. and Ripmeester J.A. (1985). *Benification of heavy metal minerals from sands and oil sand tailings by oil phase agglomeration*. The third UNITAR/UNDP international conference on heavy crude and tar sands.
- Majid A. and Sparks B.D. (1992). *Treatment of sludge from Athabasca tailings pond by oil phase agglomeration*. Waste Processing and Recycling in Mining and Metallurgical Industries.

- Martel, R. and Gélinas, P. J. (1996) *Surfactant Solutions Developed for NAPL Recovery in Contaminated Aquifers*. Ground Water. 1996; 34(1):143-154.
- Martel, R.; Gélinas, P. J.; Desnoyers, J. E., and Masson, A. (1993) *Phase Diagrams to Optimize Surfactant Solutions for Oil and DNAPL Recovery in Aquifers*. Ground Water. 1993; 31(5):789-800.
- McDermott, J. B.; Unterman, R.; Brennan, M. J.; Brooks, R. E.; Mobley, D. P.; Schwartz, C. C., and Dietrich, D. K. (1989) *Two Strategies for PCB Soil Remediation: Biodegradation and Surfactant Extraction*. Environmental Progress. 1989; 8(1):46-51.
- MIM (1992). *Jameson Cell*. Australia.
- Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (1996). *Politique de réhabilitation des terrains contaminés*. Direction des politiques du secteur industriel, du Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec. Terrains contaminés, ISSN 1204-2072, ISBN 2-551-16878-3.
- Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (1996). *Conservation et analyse des échantillons d'eau et de sol*. Direction des politiques du secteur industriel, du Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec. Terrains contaminés, ISSN 1204-2072 ISBN 2-551-16876-7.
- Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (1995). *Méthode d'analyse des milieux environnementaux. Sols-Dosage des hydrocarbures pétroliers (C₁₀ à C₅₀)*.
- Ministère de l'Environnement (1995). *Problématique des sols et des eaux souterraines contaminés par des produits pétroliers ; sélection de paramètres analytiques*. Publication du Québec 1995. 134p.
- Ministère de l'Environnement (1985). *Guide d'entreposage de déchets dangereux et gestion des huiles usées*. Gouvernement du Québec.
- Ministry of Environment and Energy, Ontario (1993). *Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario*. ISBN 0-7729-9248-7.
- Misra M. and Mehta R.K. (1995). *Remediating Heavy Metals, Radionuclides, and Organic Pollutants from Soils*. JOM, septembre 1995.
- Netzband A. (1994). *Dredged material management in the port of Hamburg*. European Water Pollution Control, volume 4, number 6, 1994.
- Oeberg N.C.R. et Steinlechner E.H. (1996) *Red mud and sands handling new thoughts on an old problem*. Light Metals 1996, The Minerals, Metals & Materials Society.
- Peters, R. W.; Montemagno, C. D.; Shem, L., and Lewis, B. A. (1992) *Surfactant Screening of Diesel-Contaminated Soil*. Hazardous Waste & Hazardous Materials. 9(2):113-136.

- Perry Robert H. and Green Don (1994). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. Sixth edition, McGraw-Hill.
- Plumpton A.J. (1996). *Dissolved air flotation... A solution for fine particle waste mineral pulps ? Technology and the Mineral Industry Environment*, CIM.
- Powell D.M. (1994). *Selecting Innovative Cleanup Technologies: EPA Resources*. *Chemical Engineering Progress*, mai 1994.
- Procéan inc. (1992). *Plan d'intervention des secteurs aquatiques contaminés, port de Québec, secteur PIQ1. phase 2., estuaire de la rivière Saint-Charles, caractérisation détaillée. Rédigé pour la Direction de l'Environnement, Conservation et Protection, région du Québec, Environnement Canada.*
- Richard Mozley ltd. (année non-mentionnée). *Oily Sand Clean-Up*.
- Richard Mozley ltd. (1991). *The Mozley double drum multi-gravity separator*.
- Roy P.H. (1993) *Technico-économie des procédés II. Analyse économique des projets d'investissements*. Département de génie chimique de l'Université Laval.
- Roy P.H. (1991) *Technico-économie des procédés I*. Département de génie chimique de l'Université Laval.
- Stenzel M.H. (1993). *Remove Organics by Activated Carbon Adsorption*. *Process Water Treatment/Reuse*, *Chemical Engineering Progress*, avril 1993.
- Stone J. (1996). *U.S EPA Method 1664 : Waiting for Godot*. American Environmental Laboratory.
- Tadros, T. F. (1984) *Influence of Structure and Chain Length of Surfactant on the Nature and Structure of Microemulsions*. Milton J. Rosen. *Structure/Performance Relationships in Surfactants - Based on a symposium sponsored by the Division of Colloid and Surface Chemistry at the 186th Meeting of the American Chemical Society; 1983 Aug 28-1983 Sep 2; Washington, DC.: American Chemical Society.*
- Tallon Environnement inc. (1995) *Technologie Tallon, décontamination/restauration des sites. Fiche technologique, Centre pour l'avancement des technologies environnementales, Enviro-Accès.*
- Tetra Tech inc. (1994). *Options for Treatment and Disposal of Contaminated Sediments from New York / New Jersey Harbor*. U.S Army Engineer District.
- Tils H.M.G.C. and Tels M. (1992). *A study into fine particle flotation separation characteristics with application to centrifugal force field flotation cells*. *International Journal of Mineral Processing*, 36, 1992.

- Traver R.P. (1996) *Conditioning Sediment & Soil for Site Remediation*. Presentation at Cleaning Contaminated Sediment. Bergmann USA.
- USEPA (1995). *Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment and Clean Up of Contaminated Land and Groundwater (Phase II)*. NATO/CCMS Pilot Study, Interim Status Report number 203, EPA 542-R95-006.
- USEPA (1994). *Mineral Processing Pretreatment of Contaminated Sediments. Assessment and Remediation of Contaminated Sediments (ARCS) Program*, EPA 905-R94-022.
- USEPA (1994). *Assessment and Remediation Of Contaminated Sediments (ARCS) Program. Remediation Guidance Document*, EPA 905-R94-003.
- USEPA (1994). *Superfund Innovative Technology Evaluation Program. Technology Profiles Seventh Edition, SITE*, EPA 540-R94-526.
- USEPA (1993). *Biogenesis Soil Washing Technology. Demonstration Bulletin, Biogenesis, SITE*, EPA 540 MR93-510.
- USEPA (1993). *Biogenesis Soil Washing Technology. SITE Technology Capsule*, EPA 540-SR93-510.
- USEPA (1993). *Toronto Harbour Commissioners (THC) Soil Recycle Treatment Train. Applications Analysis Report, SITE*, EPA 540-AR93-517.
- USEPA (1992). *Soil Recycling Treatment Train. Demonstration Bulletin, The Toronto Harbour Commissioners, SITE*, EPA 540-MR92-015.
- Valine S.B., Danesh B., Ghazi N. et Rohacek S. (1993). *Welland River Sediment Treatment Technology Demonstration. Présenté à The removal and Treatment of Contaminated Sediments Environment Canada's Great Lakes Cleanup Fund*.
- Van Rijt C. (1993). *Cleaning Contaminated Sediments by Separation on the Basis of Particle Size*. Public Works Department Municipality of Rotterdam.
- Van Veen H.J. (1988). *Technology for remediating contaminated sediments in the Netherland*. Netherlands Organisation for Applied Scientific Research TNO.
- Wardlaw G., Brendon D. and Randle W. (1995). *Results of Canada's Contaminated Sediment treatment Technology Program*. Wastewater Technology Centre, Sediment Remediation 95.
- Weber H. (1995) *Nouvelle méthode d'analyse en remplacement des Huiles et Graisses minérales pour les sols*. Ministère de l'Environnement et de la Faune. N.Ref. 5124-07-04-03
- Wills B.A. (1992) *Mineral Processing Technology*. Fifth edition, Pergamon Press

- Yang D.C. (1989). Packed-bed Column Flotation of Fine Coal. Part 1. Laboratory Tests and Flotation Circuit Design. Coal Preparation, 1990, vol. 8. pp 19-36.
- Yang D.C. (1989). Packed-bed Column Flotation of Fine Coal. Part 11. Technical - Economic Feasibility and Scale-up Considerations. Coal Preparation, 1990, vol. 8. pp 37-48.
- Yang D.C. and Holysh M. (1989). Packed-bed column flotation for flyash beneficiation. Proceedings of the international symposium on processing of complex ores, CIM.
- Yang D. C. (1988). A new packed column flotation system. International Symposium on Column Flotation, Arizona.
- Yarar B. and Hemphill G.P. (1983). Size-Surface Energy Relationships in the Flotation Upgrading of Oil Shale. 1983 Eastern Oil Shale Symposium.
- Zeta-Meter inc. (1993) Everything you want to know about Coagulation & Flocculation ...
Fourth edition.