

**PROCÉDÉ ORGAMETOX :  
ESSAIS DE TRAITABILITÉ D'UN SOL CONTAMINÉ  
PAR EXTRACTION SIMULTANÉE DES HAP ET DU PLOMB**

Centre d'excellence de Montréal en réhabilitation de sites

Préparé par :

Julia Mouton, Guy Mercier\* et Jean-François Blais

Institut national de la recherche scientifique  
Centre Eau, Terre et Environnement  
490 rue de la Couronne  
Québec, (Québec), Canada, G1K 9A9

\* Responsable du projet

Tél : (418) 654-2633

Fax : (418) 654-2600

Courriel : [guy\\_mercier@ete.inrs.ca](mailto:guy_mercier@ete.inrs.ca)

Rapport de recherche No R-915

16 mars 2007

**Document strictement confidentiel**



# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. CONTENU TECHNIQUE .....</b>	<b>1</b>
1.1. Nature de l'essai de traitabilité.....	1
1.2. Objectifs à atteindre.....	2
1.3. Méthodologie proposée.....	2
1.4. Échelle atteinte dans le développement du concept avant les essais actuels.....	3
1.5. Avantages de la technologie proposée.....	5
1.6. Identification des étapes principales dans le temps du présent projet.....	5
1.7. Protocole de suivi et d'échantillonnage détaillé.....	6
1.8. Protocole d'assurance qualité (QA/QC).....	8
1.9. Équipe de travail.....	8
1.10. Organigramme.....	9
1.11. Nature des partenariats et collaborations envisagées.....	9
1.12. Coûts des analyses chimiques incluant le programme d'assurance qualité.....	10
1.13. Coûts en main d'œuvre, équipements, fournitures et réactifs.....	10
1.14. Frais de gestion.....	11
1.15. Contingence.....	11
1.16. Bilan des essais réalisés.....	12
1.17. Pré-traitement par attrition.....	12
<b>2. PHASE I.....</b>	<b>15</b>
2.1. Principe.....	15
2.1.1 Lavage du sol en flottation.....	15
2.1.2 Lavage par oxydation.....	17
2.2. Résultats.....	17
2.2.1 Procédé de flottation.....	17
2.2.2 Procédé d'oxydation.....	20
2.3. Synthèse phase I.....	20
<b>3. PHASE II.....</b>	<b>21</b>
3.1. Principe.....	21

3.2.	Résultats .....	21
3.2.1	Entraînement particulière .....	21
3.2.2	Abattements et qualité des sols en fin de procédé.....	22
<b>4.</b>	<b>PHASE III.....</b>	<b>27</b>
4.1.	Principe .....	27
4.2.	Résultats .....	31
4.2.1	Fractions solides de procédé.....	31
4.2.2	Eaux de procédé .....	32
<b>5.</b>	<b>PHASE IV.....</b>	<b>35</b>
5.1.	Principe .....	35
5.2.	Résultats .....	37
5.2.1	Fractions solides de procédé.....	37
5.2.2	Eaux de procédé .....	38
<b>6.</b>	<b>CONTRÔLE DE LA QUALITÉ .....</b>	<b>41</b>
6.1.	Méthodes d’analyse en place à l’INRS-ETE .....	41
6.1.1	Analyse des HAP .....	41
6.1.2	Analyse du plomb.....	41
6.2.	Contrôle qualité des analyses.....	42
<b>7.</b>	<b>ESTIMÉ DU COÛT DU PROCÉDÉ À GRANDE ÉCHELLE .....</b>	<b>45</b>
<b>8.</b>	<b>ESTIMATION DU COÛT D’UNE DÉMONSTRATION DE LA TECHNOLOGIE .....</b>	<b>47</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>51</b>
	<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>53</b>
	<b>CV ABRÉGÉ – GUY MERCIER .....</b>	<b>55</b>
	<b>CV ABRÉGÉ – JEAN-FRANÇOIS BLAIS.....</b>	<b>59</b>
	<b>CV ABRÉGÉ – JULIA MOUTON .....</b>	<b>63</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma du procédé simultané de décontamination de sol pollué par les HAP et les métaux .....	4
Figure 2 : Abattement (%) en phase I selon la concentration en surfactant.....	20
Figure 3 : Abattements et respect des seuils réglementaires en fin de procédé (Tr-23 à 10% de pulpe).....	23
Figure 4 : Abattements et respect des seuils réglementaires en fin de procédé (Tr-29) .....	24
Figure 5 : Schéma de procédé phase III.....	30
Figure 6 : Évolution de la qualité du sol au fil des boucles .....	32
Figure 7 : Schéma de procédé en phase IV .....	36



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Coûts d'opération du procédé.....	4
Tableau 2 :	Échéancier de réalisation de projet.....	5
Tableau 3 :	Nombre prévu d'analyses de HAP (INRS.).....	6
Tableau 4 :	HAP analysés dans le cadre de cette étude.....	6
Tableau 5 :	Nombre prévu d'analyses de métaux et pH (INRS).....	7
Tableau 6 :	Nombre prévu d'analyses de HAP, Pb et pH (Bodycote).....	8
Tableau 7 :	Budget de réalisation du projet.....	12
Tableau 8 :	Bilan des essais réalisés en phase I.....	16
Tableau 9 :	Qualité des sols avant et après traitement par flottation en phase I (mg/kg sec).....	18
Tableau 10 :	Qualité des sols avant et après traitement par oxydation en phase I (mg/kg sec).....	19
Tableau 11 :	Bilan des essais réalisés en phase II.....	21
Tableau 12 :	Qualité des sols avant et après traitement par flottation en phase II (mg/kg sec).....	25
Tableau 13 :	Qualité des mousses en sortie de flottation en phase II (mg/kg sec).....	26
Tableau 14 :	Bilan quantitatif des boucles suivies.....	28
Tableau 15 :	Qualité des sols avant/après traitement par flottation et des mousses générées en phase III (mg/kg sec).....	
Tableau 16 :	Abattements calculés pour chaque boucle sur la qualité du sol en fin de procédé (%).....	34
Tableau 17 :	Bilan quantitatif des boucles suivies.....	35
Tableau 18 :	Suivi de la qualité des eaux de procédé en plomb (mg/L).....	38
Tableau 19 :	Qualité des sols avant/après traitement par flottation et des mousses générées en phase IV (mg/kg sec).....	39
Tableau 20 :	Abattements calculés pour chaque boucle sur la qualité du sol en fin de procédé (%).....	40
Tableau 21 :	HAP suivis et contrôlés au sein de la méthode d'analyse développée.....	42
Tableau 22 :	Résultats obtenus sur les contrôles d'analyses opérés.....	43
Tableau 23 :	Estimation du coût pour traiter 100 000 t.m. (base sèche) sur 2 ans d'opération (200 jours par an).....	46
Tableau 24 :	Estimation du budget de démonstration sur le site sur une période de 11 mois.....	48
Tableau 25 :	Évaluation du coût d'une démonstration de 6 mois par excavation du sol et transport dans une usine déjà équipée.....	49



# 1. CONTENU TECHNIQUE

## 1.1. Nature de l'essai de traitabilité

Ce rapport de recherche rapporte les résultats d'une étude de traitabilité de sol par un procédé *ex-situ* qui pourrait être opéré commercialement sur le site ou hors du site. Elle fait suite à l'obtention d'une subvention obtenue via le Centre d'Excellence de Montréal en Réhabilitation de sites (CEMRS), l'Institut de Recherche en Biotechnologie de Montréal (IRB; Conseil National de la Recherche du Canada (CNRC)) qui gère cette appel d'offre pour le Ministère de la Défense Nationale du Canada (MDN). L'option sur le site est en général préférable si la quantité à traiter est suffisante. L'excavation et la remise en place du sol traité compose généralement de 5 à 10% du coût unitaire de traitement lorsque fait dans un cadre raisonnable. La contamination mixte, soit la pollution combinée des sols par le plomb (Pb) et les HAP est fréquente et problématique. Dans les procédés éprouvés et appliqués dans des réussites commerciales, ce genre de contamination mixte nécessite le traitement par des procédés qui sont appliqués les uns après les autres dans une chaîne de procédés. Ainsi, les HAP sont enlevés dans un premier procédé, par exemple un système de lavage de sol à l'aide de surfactant, puis les métaux sont solubilisés par un deuxième procédé, tel une étape de lixiviation chimique ou des procédés miniers. Cet agencement de procédés est souvent coûteux par rapport à une contamination avec un seul type de contaminant. Les technologies pour traiter ces deux types de polluants séparément sont relativement nombreuses, quoique la décontamination pour les HAP à 4, 5 ou 6 noyaux aromatiques soit loin d'être aisée. D'autre part, notre équipe possède une vaste expérience en matière d'enlèvement des métaux dans diverses matrices (sol, cendres, boues, déchets dangereux, etc.) à l'aide des procédés miniers et des procédés de lixiviation chimique et biologique. Plus récemment, notre équipe s'est intéressée à la décontamination de deux types de résidus de l'industrie de l'aluminium contaminés par les HAP. Ce faisant, une nouvelle expertise portant sur l'élimination des HAP a donc été progressivement développée au cours des dernières années.

Dans le cadre de ce projet, nous avons étudié la combinaison, dans un même réacteur, de l'extraction des métaux (principalement le Pb) par lixiviation chimique et des HAP par un nouveau surfactant non-toxique et biodégradable. Les principaux paramètres sont le choix du surfactant, le choix des acides et des complexants, la teneur en solides dans le réacteur, la température, les temps de réaction, le nombre de lavages, le mode de récupération des micelles HAP-surfactant et les divers types de sols en terme de granulométrie et de composition (pH, contenu en matière organique, etc.). Le développement d'un procédé simultané à faible coût aura l'avantage de pouvoir traiter des contaminations mixtes qui sont beaucoup trop coûteuses à traiter actuellement en plus d'avoir l'avantage de pouvoir s'appliquer à des cas où la contamination est simple (métaux ou HAP). Cette opportunité élargira considérablement le marché potentiel d'une telle technologie.

## **1.2. Objectifs à atteindre**

Les objectifs sont décrits à la page 11 du document d'appel d'offre. Il est stipulé qu'il faut traiter au minimum 20 kg de sol de remblai provenant des secteurs TE-23 et TE-29 de la Garnison de Montréal afin qu'ils respectent les normes, lois et règlements en vigueur au Québec et au Canada pour une utilisation industrielle ou commerciale. Comme les sols sont contaminés au-delà du critère D pour les HAP et au-delà du C pour le Pb, l'objectif visé est de ramener leur teneur en Pb et HAP en dessous du critère C.

## **1.3. Méthodologie proposée**

Le procédé proposé a été testé à l'échelle du banc d'essai de laboratoire. Les essais d'enlèvement des HAP et des métaux ont été réalisés dans des cellules de flottation de type Denver de 1 L de capacité. Le pH de la pulpe a été ajusté à 3.0 avec de l'acide sulfurique. Dans le cadre de ce projet, les essais de traitabilité ont été divisés en quatre phases.

## **1.4. Échelle atteinte dans le développement du concept avant les essais actuels**

Le procédé actuellement développé est financé partiellement par le CEMRS dans cadre du doctorat de Mme Julia Mouton. Le procédé enlève simultanément dans une seule cellule de flottation les HAP et les métaux. Un surfactant est ajouté en quantité suffisante pour pouvoir déloger les HAP des particules, alors que de l'acide sulfurique et une concentration plus ou moins grande de NaCl permet la solubilisation du Pb de façon très efficace. Une mousse contenant les HAP est obtenue et elle doit être gérée comme matière dangereuse. Elle représente environ 4% de la masse sèche de sol. Le Pb se retrouve dans le liquide et il peut être séparé du liquide par électrodéposition selon le sol en traitement. Le concentré de Pb est géré comme matière dangereuse et dans le cas d'un contrat important, il serait intéressant de négocier une entente pour recycler le Pb dans l'industrie surtout qu'il est récupéré par électroplaquage. Des essais d'électroplaquage ont déjà été entrepris et il s'avère que la consommation électrique est faible. Le procédé fonctionne en circuit fermé et n'a donc pas d'effluent liquide car le liquide est recirculé pour une batch subséquente.

Le procédé a donc été appliqué pour l'instant dans une cellule de 1 L sur des sols fortement contaminés en HAP et Pb. Les divers paramètres opératoires sont en cours d'optimisation afin d'améliorer les rendements d'élimination des contaminants. Le sol initial contient du phénanthrène, du fluoranthène, du pyrène, du benzo(a)anthracène, du chrysène, du benzo(b,j,k)fluoranthène, et du benzo(a)pyrène à des teneurs respectives de 60, 90, 70, 40, 40, 40 et 30 mg/kg, ainsi que 2900 mg Pb/kg. Au premier novembre 2006, nous étions en mesure d'enlever environ 50% des HAP en une seule étape de flottation tout en enlevant près de 70% du Pb. L'utilisation de plusieurs étapes de flottation successives permettra d'enlever davantage de HAP. Une caractéristique importante de cette méthode réside dans le fait que les HAP lourds sont enlevés dans les mêmes proportions que les HAP légers. La chaîne de traitement des sols en développement est représentée à la Figure 1. Le tableau 1 présente certains coûts prévus en 2006.

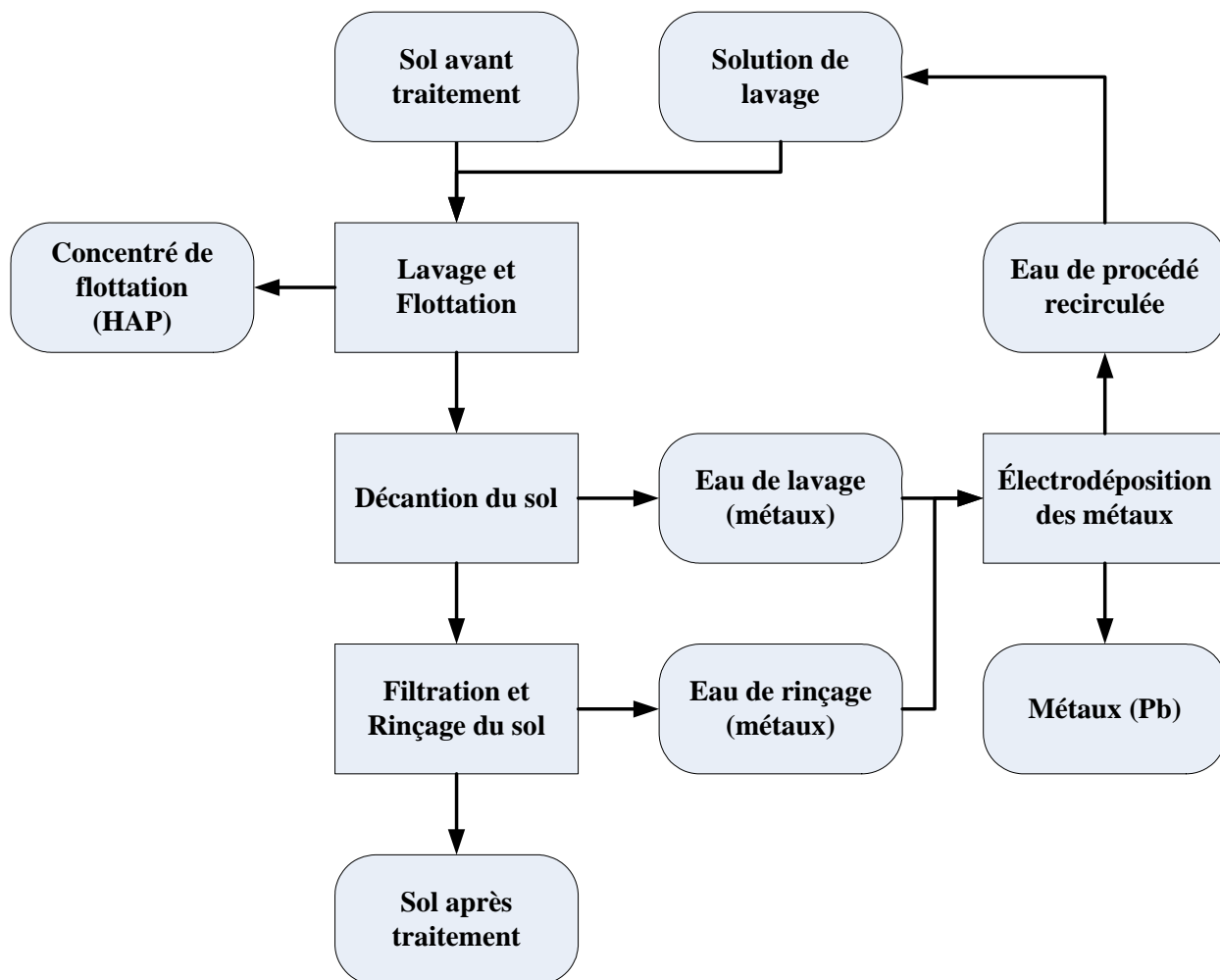


Figure 1 : Schéma du procédé simultané de décontamination de sol pollué par les HAP et les métaux

Tableau 1. Coûts d'opération du procédé

Items	Coût (\$/t sol sec)
Acide sulfurique	10
Chlorure de sodium	7
Surfactant	7
Électricité pour électrodéposition	2
Électrodes consommables	5
Disposition résidu HAP (si 4%)	16
Disposition concentré Pb (si 2%)	6
<b>Coût total (consommables, énergie et disposition)</b>	<b>53</b>

## 1.5. Avantages de la technologie proposée

La technologie proposée comporte de nombreux avantages mais le principal demeure le fait que deux types de contaminants peuvent être enlevés dans un même enceinte physique et en même temps. Les avantages en découlant sont :

- Simplicité d’opération;
- Infrastructure moins complexe à construire et à opérer;
- Investissement en capital moins intense;
- Faibles frais de main d’œuvre pour opérer le procédé;
- Utilisation d’un surfactant biodégradable et non-toxique;
- Possibilité de recycler le Pb.

## 1.6. Identification des étapes principales dans le temps du présent projet

Tel que mentionné précédemment, le programme d’essais comprend quatre séries d’essais. Le Tableau 2 montre la répartition du temps de travail pour l’accomplissement de ces travaux. Une période de 12 semaines a été nécessaire à la réalisation du projet.

**Tableau 2. Échéancier de réalisation du projet**

Étapes	Semaines												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Phase 1	■												
Phase 2	■			■									
Phase 3				■		■							
Phase 4								■		■			
Rapport												■	

## 1.7. Protocole de suivi et d'échantillonnage détaillé

Les analyses chimiques associées aux différents essais de traitabilité ont été réalisées en partie dans les laboratoires de l'INRS-ETE et dans un laboratoire externe (Bodycote, Québec, Qc) indépendant et accrédité par le Ministère de l'Environnement du Québec.

Il était prévu que 56 échantillons (sol avant traitement, sol après traitement, concentré de flottation, eau avant électrodéposition et eau après électrodéposition) seront analysés à l'INRS-ETE pour déterminer le contenu en HAP par GC-MS (appareil Perkin Elmer, modèle Clarus 500) (Tableau 3). Les HAP analysés sont présentés au Tableau 4.

Tableau 3. Nombre prévu d'analyses de HAP (INRS)

Échantillons	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Total
Sol après traitement	24	10	10	0	44
Sol avant traitement	6	0	0	0	6
Concentré de flottation	0	0	2	0	2
Eau avant électrodéposition	0	0	2	0	2
Eau après électrodéposition	0	0	2	0	2
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>10</b>	<b>16</b>	<b>0</b>	<b>56</b>

Tableau 4. HAP analysés dans le cadre de cette étude

HAP	Critère C (< mg/kg)	HAP mesurés (INRS)*	HAP mesurés (Bodycote)**
Acénaphène	100	X	X
Acénaphylène	100	X	X
Anthracène	100	X	X
Benzo[a]anthracène	10	X	X
Benzo[a]pyrène	10	X	X
Benzo[b+j+k]fluoranthène	30	X	X
Benzo[c]phénanthrène	10	X	X
Benzo[g,h,i]pérylène	10	X	X
Chrysène	10	X	X
Dibenzo[a,h]anthracène	10	X	X
Dibenzo[a,h]pyrène	10	X	X
Dibenzo[a,i]pyrène	10	X	X
Dibenzo[a,l]pyrène	10	X	X
Diméthyl-1,3 naphthalène	10	X	X
Diméthyl-7,12 benzo[a,l]anthracène	10	X	X
Fluoranthène	100	X	X
Fluorène	100	X	X
Indéno[1,2,3-cd]pyrène	10	X	X
Méthyl-1-naphtalène	10	X	X
Méthyl-2-naphtalène	10	X	X
Méthyl-3 chloranthène	10	X	X
Naphtalène	50	X	X
Phénanthrène	50	X	X
Pyrène	100	X	X
Triméthyl-2,3,5 naphtalène	10	X	X

\* Étalons de recouvrement: Acénaphène D-10, Anthracène D-10, Chrysène D-12, Pyrène D-10

\* Étalons volumétriques: Naphtalène D-8, Phénanthrène D-10

\*\* Étalons de recouvrement: Acénaphène D-10, Fluoranthène D10, Chrysène D-12

L'analyse d'un total de 92 échantillons a également été prévu pour les analyses des éléments (Al, As, B, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, S, Se et Zn) par ICP-AES (appareil Varian, modèle Vista AX), ainsi que pour des mesures de pH (Tableau 5).

L'analyse des HAP a été effectuée après une extraction de type Soxhlet sur les fractions solides (sol avant traitement, sol après traitement, concentré de flottation) obtenues et selon le mode opératoire développé par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2001)<sup>1</sup>.

Les métaux ont été analysés après digestion partielle (attaque par HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> et HCl) selon la méthode MENVIQ 90.05/210-mét 1.2). Pour des fins de bilans massiques, quelques mesures ont aussi été effectuées après digestion totale (HNO<sub>3</sub>, HF et HClO<sub>4</sub>) des échantillons solides selon la méthode 3030 I (APHA et al. 1999)<sup>2</sup>.

Une cinquantaine d'échantillons issus de la *quatrième phase* des travaux ont été acheminés au laboratoire de Bodycote (Québec, Qc) pour les analyses de Pb, HAP et pH (Tableau 6).

**Tableau 5. Nombre prévu d'analyses de métaux et pH (INRS)**

Échantillons	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Total
Sol après traitement	24	10	10	0	44
Sol avant traitement	6	0	0	0	6
Concentré de flottation	0	0	2	0	2
Eau avant électrodéposition	0	10	10	0	20
Eau après électrodéposition	0	10	10	0	20
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>32</b>	<b>0</b>	<b>92</b>

---

<sup>1</sup> Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2001) *Méthode MA 400-HAP 1.1*. Gouvernement du Québec, Québec, QC, Canada.

<sup>2</sup> APHA, AWWA et WPCF (1999) *Standards methods for examination of water and wastewaters. 20<sup>ième</sup> Édition*. American Public Health Association, American Water Works Association et Water Pollution Control Federation, Washington, D.C.

**Tableau 6. Nombre prévu d'analyses de HAP, Pb et pH (Bodycote)**

<b>Échantillons</b>	<b>Phase 1</b>	<b>Phase 2</b>	<b>Phase 3</b>	<b>Phase 4</b>	<b>Total</b>
Sol après traitement	0	0	0	30	30
Sol avant traitement	0	0	0	6	6
Concentré de flottation	0	0	0	10	10
Eau avant électrodéposition	0	0	0	2	2
Eau après électrodéposition	0	0	0	2	2
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>50</b>	<b>50</b>

## **1.8. Protocole d'assurance qualité (QA/QC)**

Pour chaque série d'essais entrepris, un contrôle a été effectué en extrayant les HAP d'un sol de référence (BCR no. 524 obtenu de *Institute for Reference Materials and Measurements*). Lors des analyses à l'INRS-ETE, des contrôles ont également été utilisés sur quelques-uns des HAP suivis, à l'aide de solutions certifiées obtenues chez Supelco. La méthode analytique utilisée pour les analyses de HAP permet de suivre 25 composés, en plus de quatre (4) étalons de recouvrement permettant d'évaluer l'efficacité de l'extraction Soxhlet préalable et deux (2) étalons volumétriques.

Il était prévu que cinq (5) échantillons soient également fournis au laboratoire externe pour des analyses de contrôle de qualité pour les mesures de HAP et de Pb. Quatre (4) échantillons ont été constitués de sol (2 échantillons de sol avant traitement et 2 échantillons de sol après traitement) ayant déjà fait l'objet d'analyses dans les laboratoires de l'INRS (lors de la troisième phase des travaux), alors qu'un (1) sol de référence (échantillon certifié BCR no. 524) a également été soumis pour analyse.

## **1.9. Équipe de travail**

## **1.10. Organigramme**

La composition de l'équipe de travail qui a veillé à la réalisation de ce projet est fort simple. Une chimiste (Julia Mouton, M.Sc.) s'est occupée de la réalisation des essais et des mesures analytiques, alors que les professeurs Mercier et Blais ont consacré leur temps à l'encadrement et la supervision de Mme Mouton, ainsi qu'à la rédaction du rapport final.

## **1.11. Nature des partenariats et collaborations envisagées**

L'INRS-ETE a actuellement deux partenaires industriels au niveau des sols contaminés et nous croyons selon nos informations qu'il y aura beaucoup de développement au niveau d'une ou de ces deux entreprises dans les prochaines années. La licence avec Services Matrec Inc. et Innovente Inc. porte sur la lixiviation chimique et biologique en milieu acide donc sur des problèmes de contamination simple par les métaux. Dragage Verreault possède une licence de l'INRS-ETE (procédé du professeur Mario Bergeron) sur un procédé de flottation des composés organiques et inorganiques en colonne (Brevet US 6,273,263 B1) sur des sédiments et sols fins (moins de 100 µm environ) et un procédé de traitement de sol avec des techniques minières (jig, spirale, classificateur, flottation et MGS) (Brevet américain no. 6,915,908, demande de brevet PCT et demande de brevet canadien no. CA 2,414,648) pour des contaminations métalliques. Le procédé proposé ici sera un nouveau procédé novateur qui ne sera pas en contrefaçon des technologies mentionnées pour des raisons évidentes. Comme la situation prendra un tournant décisif que nous ne pouvons deviner actuellement, nous préférons développer ce procédé sans lien avec ces entreprises pour l'instant. Quelques entreprises ont cependant mentionné leur intérêt à obtenir les droits de commercialisation. Nous sommes très confiants sur le potentiel d'application de cette nouvelle technologie. Un partenaire industriel sera associé pour la phase de pilotage du procédé si nous sommes retenus.

## **1.12. Coûts des analyses chimiques incluant le programme d'assurance qualité**

Les analyses chimiques associées aux différents essais de traitabilité ont été réalisées en partie dans les laboratoires de l'INRS-ETE et dans un laboratoire externe indépendant et accrédité par le Ministère de l'Environnement du Québec. Il était prévu que 56 échantillons soient analysés à l'INRS-ETE pour déterminer le contenu en HAP par GC-MS, 92 échantillons seront analysés pour le contenu en métaux (principalement le Pb) par ICP-AES, ainsi que pour des mesures de pH.

**Cinquante (50)** échantillons issus de la quatrième phase des travaux seront acheminés au laboratoire de Bodycote (Québec, Qc) pour des analyses de Pb, HAP et pH. Il était également prévu que cinq (5) échantillons certifiés seront également fournis au laboratoire externe pour des analyses de contrôle de qualité pour les mesures de HAP et de Pb.

Le Tableau 7 montre que les coûts inhérents aux analyses externes (Bodycote) sont évalués à **8 000 \$**, soit 100 \$ par échantillon pour les mesures de HAP, 30 \$ par échantillon pour les mesures de Pb et 17 \$ par échantillon pour les mesures de pH.

Les coûts associés aux analyses effectuées à l'INRS-ETE sont, pour leur part, estimés à **1 499 \$**. Ce montant inclut les coûts des produits chimiques pour la préparation des échantillons pour les mesures de HAP (extraction Soxhlet) et de métaux (digestion acide), ainsi que les frais liés à l'utilisation des instruments analytiques (GC-MS et ICP-AES). Ce montant ne comprend évidemment pas le temps que Mme Mouton a consacré à la préparation des échantillons et aux analyses.

## **1.13. Coûts en main d'œuvre, équipements, fournitures et réactifs**

La contribution en salaires de l'INRS-ETE pour la réalisation de ce projet est estimée à **38 600 \$**. Ce montant comprend 26 000 \$ en valeur de temps d'une chimiste (400 h) qui a réalisé les essais et effectué

les analyses chimiques et 12 600 \$ en salaires pour le temps de supervision et d'encadrement des professeurs Mercier (50 h) et Blais (40 h).

### 1.14. Frais de gestion

Un total de **370 \$**, soit 20% des coûts des dépenses internes (1 848 \$), est attribuable aux frais de gestion prélevés par le Centre INRS-ETE sur les octrois obtenus par les équipes de recherche. Ces frais ne s'appliquent toutefois pas aux montants prévus initialement (avant le début du projet) pour supporter les coûts des analyses externes.

### 1.15. Contingence

Aucun frais de contingence n'a été prévu étant donné le peu d'espace budgétaire disponible.

**Tableau 7. Budget de réalisation du projet**

Items	Base de calcul	Montant (\$)
<b>Salaires</b>		
Supervision (G. Mercier - professeur)	50 h x 140 \$/h	7 000 \$
Supervision (J.F. Blais - professeur)	40 h x 140 \$/h	5 600 \$
Chimiste (M.Sc.)	400 h x 65 \$/h	26 000 \$
Sous-total (salaires)		38 600 \$
<b>Dépenses internes</b>		
Produits chimiques	Solvants, acides, cartouches extraction, etc.	800 \$
Temps d'utilisation ICP-AES	20 \$/h x 92 échantillons / 6 éch/h	307 \$
Temps d'utilisation GC-MS	7 \$/h x 56 échantillons / 1 éch/h	392 \$
Frais de transport	Transport du sol	100 \$
Frais de voyage	1 déplacement Qc-Mtl	250 \$
Frais de gestion (20%)	20% des dépenses internes	370 \$
Sous-total (autres dépenses internes)		2 218 \$
<b>Analyses externes</b>		
Échantillons - HAP	50 échantillons x 100 \$/échantillon	5 000 \$
Échantillons - Pb	50 échantillons x 30 \$/échantillon	1 500 \$
Échantillons - pH	50 échantillons x 17 \$/échantillon	850 \$
Contrôle de qualité - HAP	5 échantillons x 100 \$/échantillon	500 \$
Contrôle de qualité - Pb	5 échantillons x 30 \$/échantillon	150 \$
Sous-total (analyses externes)		8 000 \$
<b>Grand total</b>		48 818 \$
<b>Contribution de l'INRS</b>		40 818 \$
<b>Montant demandé au CEMRS</b>		<b>8 000 \$</b>

## **1.16. Bilan des essais réalisés**

Comme mentionné au sein de la lettre d'intention du 3 novembre 2006, l'ensemble des essais de traitabilité est divisé en quatre phases :

- Phase I : Essais en flottation et en oxydation (Tr-23, Tr-29);
- Phase II : Optimisation des séquences de flottation menées en triplicata (Tr-23, Tr-29);
- Phase III : Suivi en cinq boucles de l'étape de flottation (Tr-23);
- Phase IV : Suivi en cinq boucles du procédé (Tr-29).

Pour l'ensemble des essais réalisés en phase I, II et III, seule la fraction granulométrique inférieure à 2 mm est considérée. Tr-23 et Tr-29 prélevés à la chaudière subissent une étape d'attrition à l'aide de surfactant à 0,2% (p/p sec) avant d'être tamisés par voie humide à 2 mm. Seule la phase IV propose un suivi du procédé développé dans son intégralité.

Ainsi, vingt quatre essais ont été réalisés en phase I, douze en phase II, cinq en phase III et cinq en phase IV.

## **1.17. Pré-traitement par attrition**

Le sol étudié se présente sous forme d'agrégats plus ou moins grossiers, c'est pourquoi il est proposé de procéder à une étape préliminaire d'attrition afin de disperser ces agrégats et de pouvoir tamiser le sol pour ne traiter que la fraction inférieure à 2 mm. Ainsi, le sol sous sa forme initiale est mis en pulpe à 10% dans une solution de surfactant à 0,2 g/L. Après quelques minutes d'agitation mécanique, le sol est tamisé par voie humide à 2 mm. La fraction supérieure à 2 mm propre est séchée à air ambiant et stockée, alors que la suspension inférieure à 2 mm est quant à elle décantée à l'aide de FeCl<sub>3</sub> (0,2 mg/L) et de Percol E-10 (20 mg/L). Après une heure

de décantation, solides et liquides sont séparés. Le solide est alors placé à air ambiant pour évaporation de l'excès d'humidité présent dans la matrice.



## **2. PHASE I**

Les essais proposés permettent de suivre, après une première étape d'attrition, deux traitements de type « soil washing » distincts : un procédé mixte doux (utilisant des sels et des surfactants) et un procédé chimique plus agressif (oxydation des HAP et solubilisation des métaux). Comme présenté au Tableau 8, les douze premiers essais ont été consacrés à l'étude du procédé doux et les douze suivants au procédé le plus agressif.

### **2.1. Principe**

#### **2.1.1 Lavage du sol en flottation**

Les essais de lavage sont réalisés en laboratoire dans une cellule de flottation (Denver lab-1) sous des séquences d'agitation de 15 minutes et de flottation de 5 minutes pour les essais 1 à 12. La densité de pulpe est maintenue à 10% (essais réalisés sur 1L). En fin de traitement, sol et solution de lavage sont séparés par filtration. Des analyses des métaux et des HAP par Chromatographie gazeuse et du plomb par absorption atomique sont alors poursuivies sur la fraction « décontaminée ». Les eaux de lavage sont conservées pour analyses des métaux. Les essais 1 à 3 proposent trois étapes de flottations successives, alors que l'ensemble des essais 4 à 12 ne considère qu'une séquence de flottation.

L'ensemble des conditions opératoires est présenté au Tableau 8. Le pH est fixé à l'aide d'acide sulfurique 36N et est maintenu tout au long des lavages où l'ajustement de pH est nécessaire. La concentration en NaCl est maintenue à 5,5M sur l'ensemble des essais réalisés. Les paramètres étudiés sur ces essais sont le sol étudié (Tr29 et Tr23), concentration en surfactant (0,1-0,4% p/p sec), température et nombre de séquences de flottation.

**Tableau 8 Bilan des essais réalisés en phase I**

Échantillon	Sol	DP (%)	[Surfactant] (%)	[NaCl] M	pH	[H2O2] (%)	T (°C)	Nb flottation	Nb ajouts H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
I-1	TR-29	10	0,10	5,5	3	0	20	3	0
I-2	TR-29	10	0,20	5,5	3	0	20	3	0
I-3	TR-29	10	0,40	5,5	3	0	20	3	0
I-4	TR-29	10	0,10	5,5	3	0	60	1	0
I-5	TR-29	10	0,20	5,5	3	0	60	1	0
I-6	TR-29	10	0,40	5,5	3	0	60	1	0
I-7	TR-23	10	0,10	5,5	3	0	20	1	0
I-8	TR-23	10	0,20	5,5	3	0	20	1	0
I-9	TR-23	10	0,40	5,5	3	0	20	1	0
I-10	TR-23	10	0,10	5,5	3	0	60	1	0
I-11	TR-23	10	0,20	5,5	3	0	60	1	0
I-12	TR-23	10	0,40	5,5	3	0	60	1	0
I-13	TR-29	10	0,10	5,5	3	2	25	0	1
I-14	TR-29	10	0,10	5,5	3	2	50	0	1
I-15	TR-29	10	0,10	5,5	3	2	75	0	1
I-16	TR-29	10	0,10	5,5	3	2	25	0	3
I-17	TR-29	10	0,10	5,5	3	2	50	0	3
I-18	TR-29	10	0,10	5,5	3	2	75	0	3
I-19	TR-29	10	0,10	5,5	3	5	25	0	1
I-20	TR-29	10	0,10	5,5	3	5	50	0	1
I-21	TR-29	10	0,10	5,5	3	5	75	0	1
I-22	TR-29	10	0,10	5,5	3	5	25	0	3
I-23	TR-29	10	0,10	5,5	3	5	50	0	3
I-24	TR-29	10	0,10	5,5	3	5	75	0	3

### **2.1.2 Lavage par oxydation**

L'ensemble des essais est réalisé dans un contenant fermé d'un litre placé sous agitation magnétique et à l'abri de la lumière. La densité de pulpe est maintenue à 10% sur l'ensemble des essais, la concentration en NaCl à 1M, le pH à 3 et la concentration en surfactant à 0,1%. La réaction est suivie sur 6h.

L'oxydation est opérée à l'aide de réactif de fenton ( $Fe^{3+}/H_2O_2$ ). Il est proposé d'étudier dans ces essais l'influence de la concentration en  $H_2O_2$  et la température. Nous essayons également d'évaluer les meilleures conditions d'ajout du peroxyde à savoir une addition totale à  $t=0$  ou des ajouts séquentiels de cette même quantité à  $t=0$ ,  $t=2h$  et  $t=4h$ .

## **2.2. Résultats**

Le Tableau 2 présente l'ensemble des analyses de plomb et HAP effectuées à l'INRS sur les fractions de sol avant et après traitement..

### **2.2.1 Procédé de flottation**

L'abattement est calculé sur la qualité du sol en fin de procédé. La Figure 2 présente l'ensemble des abattements ainsi calculés. Globalement, la température semble sans effet sur l'abattement des contaminants organiques et inorganiques. De même la concentration de surfactant n'impacte pas de façon significative les abattements observés.

L'entraînement particulaire est fonction de la concentration en surfactant. Ainsi, plus la concentration en surfactant augmente, plus l'entraînement augmente aussi. Il est également fonction de la granulométrie du sol traité. En effet, pour Tr-23 de plus faible granulométrie l'entraînement particulaire atteint 6,5% contre 4,5% pour Tr-29 en conditions similaires.

**Tableau 9**      **Qualité des sols avant et après traitement par flottation en phase I (mg/kg sec)**

Sols	Types	Valeurs	M procédé (g sec)	PhN	Anthrac N	Fluorant N	PyrN	B[a]anthr acN	ChrysN	B[b]k]f luorant N	B[a]pyr N	Indeno	Dibenz oah	ghi	Pb
Tr-29	Entrée	Moyenne	91	624,48	121,70	650,94	490,13	258,75	279,90	379,72	97,96	-	-	120,84	631,86
		Ecart	1	35,22	9,36	51,16	30,95	10,66	27,01	13,32	94,61	-	-	12,22	21,37
		CV	1%	6%	8%	8%	6%	4%	10%	4%	97%	-	-	10%	3%
		Nb	3	3	3	3	3	3	3	3	3	-	-	3	2
	Sortie	I-1	76,68	255,14	35,24	316,44	241,35	114,16	135,62	212,23	10,73	-	-	39,08	188,71
		I-2	68,70	241,13	47,58	219,35	158,87	74,19	95,97	123,39	12,10	-	-	20,16	176,18
		I-3	66,50	204,24	42,14	180,74	131,30	58,35	81,86	96,45	11,35	-	-	16,21	133,62
		I-4	84,70	587,27	124,45	573,29	422,28	205,54	258,68	332,79	19,58	-	-	79,70	220,99
		I-5	83,94	631,61	127,84	589,00	439,85	214,60	270,91	353,09	10,65	-	-	82,19	325,74
		I-6	80,76	296,65	58,77	253,27	186,11	83,96	118,94	148,33	20,99	-	-	33,58	221,67
Tr-23	Entrée	Moyenne	90	203,22	35,98	261,04	199,48	90,96	114,84	177,75	11,61	-	-	34,98	1581,6
		Ecart	0	13,23	15,30	21,28	15,50	8,78	6,59	13,08	2,52	-	-	2,76	69,33
		CV	0%	7%	43%	8%	8%	10%	6%	7%	22%	-	-	8%	4%
		Nb	3	3	3	3	3	3	3	3	3	-	-	3	3
	Sortie	I-7	80,57	67,63	10,38	75,94	58,43	26,40	35,30	51,91	4,75	-	-	8,90	1
		I-8	78,56	92,11	14,12	106,85	80,44	36,54	48,51	73,38	4,30	-	-	11,97	666,52
		I-9	71,37	127,29	19,49	141,60	107,49	50,55	63,95	97,75	7,00	-	-	14,62	660,27
		I-10	85,57	110,83	17,36	122,98	93,47	44,13	55,04	80,08	6,20	-	-	11,16	240,87
		I-11	78,47	111,35	18,78	132,04	101,27	48,73	60,44	87,93	6,26	-	-	10,89	555,26
		I-12	72,90	102,02	20,00	124,46	94,01	46,23	54,01	76,46	6,22	-	-	8,00	408,13

**Tableau 10** Qualité des sols avant et après traitement par oxydation en phase I (mg/kg sec)

Sols	Types	Valeurs	M procédé (g sec)	PhN	Anthrac N	Fluorant N	PyrN	B[a]anthr acN	ChrysN	B[b]k]f luorant N	B[a]pyr N	Indeno	Dibenz oah	ghi	Pb
	Entrée	Moyenne	96	811,35	168,63	829,51	629,20	318,98	356,44	465,06	17,66	-	-	128,42	631,86
		Ecart type	1	141,59	23,12	125,20	89,73	47,38	26,40	71,21	2,60	-	-	22,20	21,37
		CV	1%	17%	14%	15%	14%	15%	7%	15%	15%	-	-	17%	3%
		Nb Valeurs	3	3	3	3	3	3	3	3	3	-	-	3	2
Tr-29	Sortie	I-13	90,43	584,62	133,33	620,51	474,36	230,77	287,18	382,05	20,51	-	-	85,90	352,24
		I-14	92,40	788,49	157,38	827,03	627,90	306,72	377,38	507,46	32,12	-	-	109,20	485,11
		I-15	91,60	574,25	106,65	623,47	470,88	231,34	282,20	385,57	29,53	-	-	-	269,35
		I-16	91,97	601,24	146,28	704,13	521,90	269,01	307,44	422,73	30,99	-	-	-	284,95
		I-17	91,73	667,40	145,21	719,07	518,01	272,27	316,95	438,42	22,34	-	-	85,17	297,03
		I-18	93,12	557,85	104,13	712,81	552,89	278,93	287,60	459,92	32,23	-	-	86,78	219,78
		I-19	92,20	729,84	183,12	832,02	626,34	330,42	362,27	500,28	23,89	-	-	72,98	376,32
		I-20	90,40	597,97	125,29	646,38	472,68	237,77	279,05	382,99	24,20	-	-	51,25	255,55
		I-21	90,30	581,06	123,17	658,71	473,95	251,70	293,21	408,35	24,10	-	-	-	155,01
		I-22	91,19	479,06	100,43	503,30	375,17	188,16	222,79	283,97	17,32	-	-	33,48	617,42
		I-23	88,90	819,55	227,04	1035,52	858,32	452,69	537,14	675,58	44,30	-	-	56,76	-
		I-24	89,30	464,76	89,06	568,16	415,63	217,03	261,05	332,70	30,71	-	-	27,64	327,84

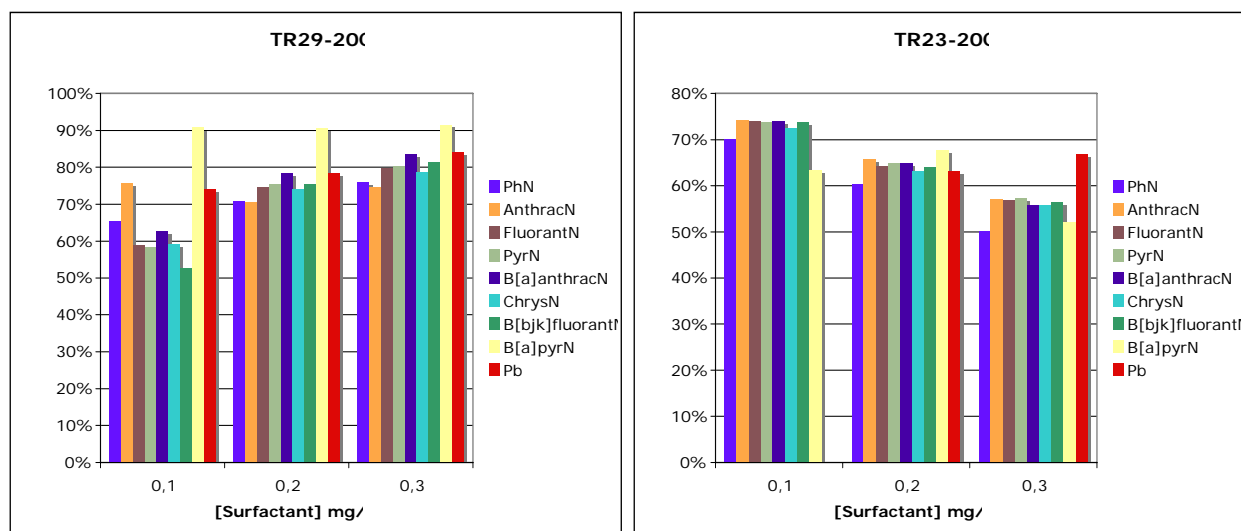


Figure 2 : Abatement (%) en phase I selon la concentration en surfactant

## 2.2.2 Procédé d'oxydation

L'abattement est calculé sur la qualité du sol en fin de procédé, par différence des quantités de contaminants en entrée et en sortie de procédé. Sur l'ensemble des essais réalisés, la moyenne des abattements des HAP avoisine 30%. Aucune des conditions testées ne semble être particulièrement meilleure qu'une autre. Le plomb est solubilisé à hauteur de 50-60% sur l'ensemble des essais, sans qu'un effet de température ou du mode d'addition du peroxyde n'apparaisse particulièrement favorable.

## 2.3. Synthèse phase I

Aux vues des résultats obtenus, il est proposé de poursuivre les essais de traitabilité en flottation sous les conditions suivantes :

- Concentration en surfactant à 0,1% base sèche;
- Concentration NaCl à 5,5 M;
- pH maintenu à 3.

### 3. PHASE II

#### 3.1. Principe

Les essais proposés, menés en triplicata, permettent de suivre le procédé de flottation retenu en phase I après trois flottations successives et ce pour différentes densités de pulpe. Le principe opératoire est identique à celui présenté en phase I.

**Tableau 11 Bilan des essais réalisés en phase II**

Essais	Sol	d	Cas %	NaCl	pH	Nbe flottations	Cumul des mousses
1-1	TR-23	10%	0,10%	5,5	3	3	non
1-2	TR-23	10%	0,10%	5,5	3	3	oui
1-3	TR-23	10%	0,10%	5,5	3	3	oui
2-1	TR-29	10%	0,10%	5,5	3	3	non
2-2	TR-29	10%	0,10%	5,5	3	3	oui
2-3	TR-29	10%	0,10%	5,5	3	3	oui
3-1	TR-29	15%	0,10%	5,5	3	3	non
3-2	TR-29	15%	0,10%	5,5	3	3	oui
3-3	TR-29	15%	0,10%	5,5	3	3	oui
4-1	TR-29	20%	0,10%	5,5	3	3	non
4-2	TR-29	20%	0,10%	5,5	3	3	oui
4-3	TR-29	20%	0,10%	5,5	3	3	oui

#### 3.2. Résultats

##### 3.2.1 Entraînement particulière

L'entraînement particulière ne semble pas varier de façon très significative avec l'augmentation de la densité de pulpe dans la gamme suivie. En effet celui-ci passe de 14% à 19% pour des

densités de pulpe respectives de 10% et 20% ». Le paramètre semble être bien plus dépendant de la granulométrie du sol soumis au traitement. En effet, pour Tr-23 de plus faible granulométrie, et pour une densité de pulpe de 10%, l'entraînement particulaire atteint 20% contre 14% pour Tr-29 en conditions similaires.

### **3.2.2 Abattements et qualité des sols en fin de procédé**

Les essais réalisés sur Tr-23 assurent de très bon taux d'enlèvement avoisinant en moyenne 92% pour les contaminants organiques et inorganiques en delà des seuils réglementaires. Ainsi, les sols en fin de procédé sont amenés à des concentrations en contaminants avoisinant les seuils réglementaires les plus faibles (présenté à la Figure3).

Les essais réalisés sur Tr-29 assurent également d'assez bons taux d'enlèvement avoisinant en moyenne 73% pour les HAP en delà des seuils réglementaires et 98% pour le plomb. Toutefois, notons que les sols en fin de procédé présentent des concentrations en HAP toujours supérieures aux seuils réglementaires visés (présenté à la Figure 4). Cependant il ne semble pas démesuré de supposer que par de plus nombreuses flottations successives il serait possible d'abaisser ces seuils aux seuils réglementaires. Le Tableau 12 présente l'ensemble des analyses de plomb et HAP effectuées à l'INRS sur les fractions de sol avant et après traitement, ainsi que sur les mousses de flottation.

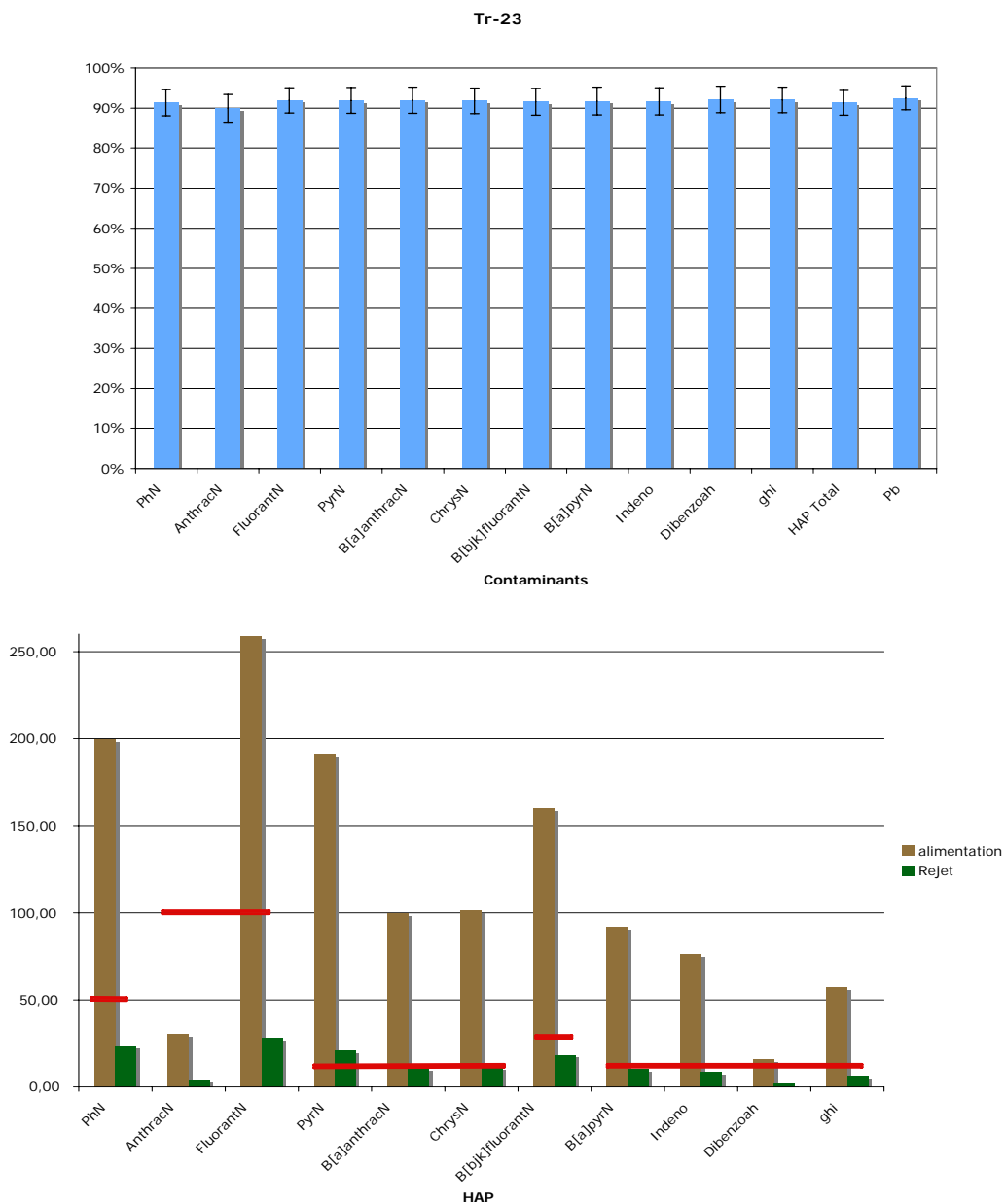


Figure 3 : Abattements et respect des seuils réglementaires en fin de procédé (Tr-23 à 10% de pulpe)

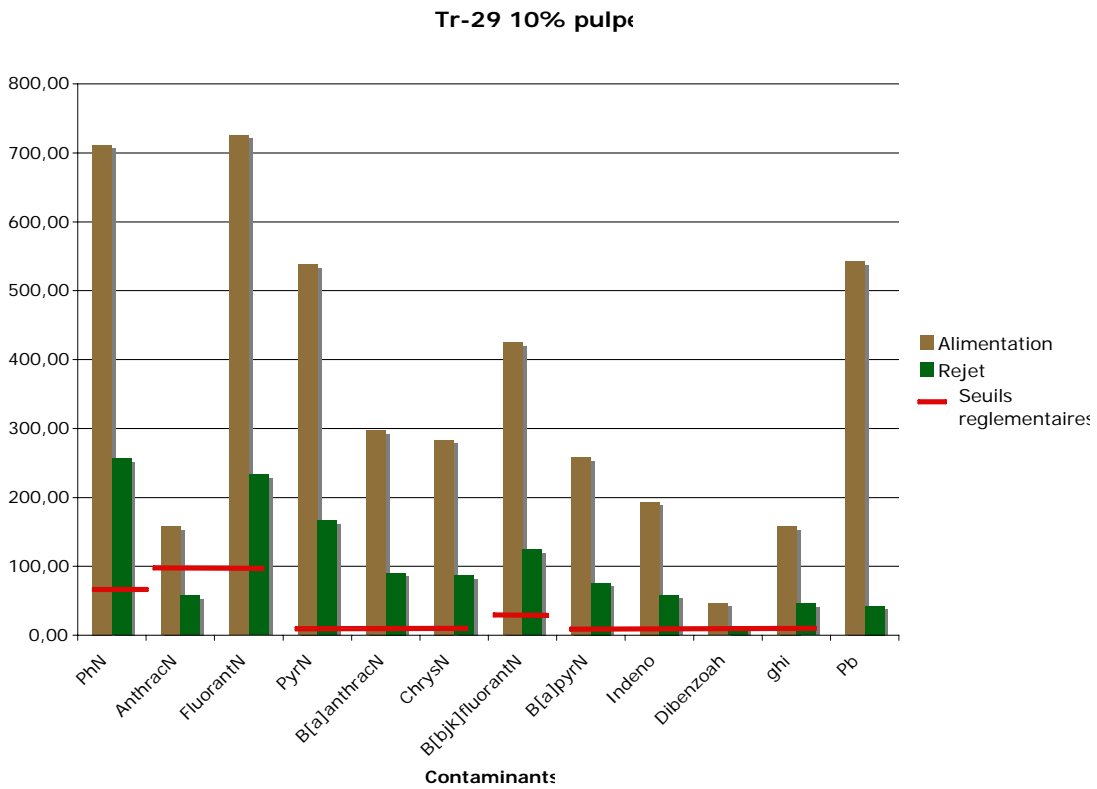
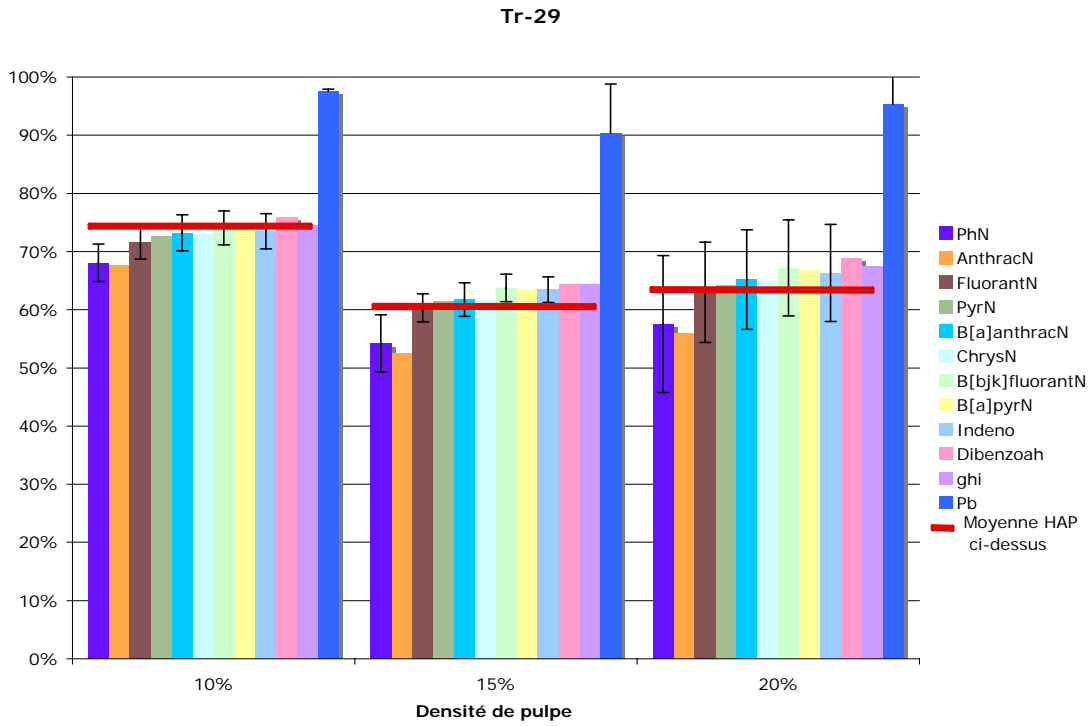


Figure 4 : Abattements et respect des seuils réglementaires en fin de procédé (Tr-29)

**Tableau 12** Qualité des sols avant et après traitement par flottation en phase II (mg/kg sec)

Sols	Essais	Fraction procédé	Valeurs	M procédé (g sec)	PhN	AnthracN	FluorantN	PyrN	B[a]anthracN	ChrysN	B[b]k]fluorant N	B[a]pyrN	Indeno	Dibenzoh	ghi	Pb	
Tr-23	II-1	Entrée	Moyenne	91,9	199,61	30,46	258,65	191,19	99,80	101,35	159,76	91,64	76,09	15,61	57,32	1612,9	
			Ecart type	0,4	4,69	0,36	3,09	3,01	1,27	6,24	1,19	1,78	1,79	0,74	0,89	55,13	
			CV	0%	2%	1%	1%	2%	1%	6%	1%	2%	2%	5%	2%	3%	
			Nb	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	II-1	Sortie	Moyenne	67,19	23,39	4,15	28,15	20,87	10,85	11,22	18,16	10,19	8,55	1,65	6,16	162,84	
			Ecart type	5,04	6,99	1,15	8,81	6,82	3,57	3,51	5,80	3,53	2,80	0,56	2,00	56,87	
			CV	8%	30%	28%	31%	33%	33%	31%	32%	35%	33%	34%	32%	35%	
			Nb	3	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Tr-29	II-2	Entrée	Moyenne	97,6	711,15	157,50	725,33	537,87	297,35	282,67	424,30	257,88	193,70	46,35	157,44	541,91	
			Ecart type	0,3	63,89	18,40	56,57	44,46	25,23	23,32	35,16	20,39	15,09	4,00	13,02	130,50	
			CV	0%	9%	12%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	9%	8%	24%
			Nb	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3
	II-2	Sortie	Moyenne	86,26	256,74	57,70	232,78	166,81	90,12	86,21	124,52	75,75	58,10	12,62	45,49	42,60	
			Ecart type	6,69	35,78	8,03	32,78	23,33	14,11	12,89	19,13	11,51	9,35	2,31	7,37	8,34	
			CV	8%	14%	14%	14%	14%	16%	15%	15%	15%	16%	18%	16%	20%	
			Nb	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	II-3	Sortie	Moyenne	117,64	407,69	93,38	359,84	259,26	142,29	135,59	192,36	118,01	88,51	20,62	70,06	64,25	
			Ecart type	2,11	50,52	11,88	27,73	22,15	13,01	12,55	15,83	9,75	6,84	2,04	5,25	3,83	
			CV	2%	12%	13%	8%	9%	9%	9%	8%	8%	10%	8%	7%	6%	
			Nb	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	
II-4	Sortie	Moyenne	151,49	390,47	89,59	347,01	248,43	133,96	128,60	180,03	110,74	84,30	18,62	66,09	48,42		
		Ecart type	1,71	106,17	21,62	79,28	60,64	32,28	33,73	44,47	26,08	20,47	5,18	16,49	0,00		
		CV	1%	27%	24%	23%	24%	24%	26%	25%	24%	24%	28%	25%	0%		
		Nb	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1		

**Tableau 13** Qualité des mousses en sortie de flottation en phase II (mg/kg sec)

Sols	Essai	Fraction procédé	Valeurs	M procédé (g sec)	PhN	Anthrac N	Fluorant N	PyrN	B[a]anthracN	ChrysN	B[b]k]fluorant N	B[a]pyr N	Indeno	Dibenzo ah	ghi	Pb
Tr-23	II-1	Sortie	Moyenne	18,20	878,03	161,57	1	925,77	542,91	537,88	930,32	-	512,23	-	346,62	937,1
			Ecart type	1,30	23,10	9,87	16,05	9,64	10,70	7,65	20,13	-	7,81	-	16,51	-
			CV	7%	3%	6%	1%	1%	2%	1%	2%	-	2%	-	5%	-
			Nb	3	2	2	2	2	2	2	2	-	2	-	2	1
Tr-29	II-2	Sortie	Moyenne	13,57	2 767,94	671,93	3	2 403,12	1 448,10	1 384,33	2 245,91	-	1 120,55	-	875,54	844,3
			Ecart type	1,47	815,94	193,45	463,43	457,27	235,28	275,01	410,50	-	118,25	-	178,82	-
			CV	11%	29%	29%	15%	19%	16%	20%	18%	-	11%	-	20%	-
			Nb	3	2	2	2	2	2	2	2	-	2	-	2	1
	II-3	Sortie	Moyenne	25,50	2 614,07	680,26	2	2 211,97	1 351,98	1 304,29	2 097,57	-	1 007,98	-	811,43	918,3
			Ecart type	3,83	124,66	35,60	134,15	116,18	46,18	47,67	96,58	-	37,98	-	31,49	-
			CV	15%	5%	5%	5%	5%	3%	4%	5%	-	4%	-	4%	-
			Nb	3	2	2	2	2	2	2	2	-	2	-	2	1
	II-4	Sortie	Moyenne	37,22	2 197,51	555,31	2	1 918,59	1 191,87	1 132,24	1 880,56	-	916,32	-	710,28	488,8
			Ecart type	4,97	338,08	103,27	260,54	233,96	95,65	135,75	235,47	-	79,24	-	101,23	-
			CV	13%	15%	19%	11%	12%	8%	12%	13%	-	9%	-	14%	-
			Nb	3	2	2	2	2	2	2	2	-	2	-	2	1

## **4. PHASE III**

Au sein de cette phase, il est proposé de suivre le procédé retenu en phase II sur un cycle de cinq boucles (c'est-à-dire, avec re-circulation des eaux de procédé). Cette phase d'essais s'applique uniquement au traitement de Tr-23.

### **4.1. Principe**

Le procédé suivi est présenté à la Figure 5 et ne comprend que les étapes de flottation et de rinçage du sol du procédé global. Le Tableau 14 présente les quantités introduites à chaque boucle (en g pour les solides et ml pour les liquides).

**Tableau 14 Bilan quantitatif des boucles suivies**

		Quantités (g ou mL)					
		Boucles					
	Identifiant	1	2	3	4	5	Moyenne
<b>Intrants</b>	<b>NaCl (g)</b>	520	400	350	200	125	319,00
	<b>Surfactant (g)</b>	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
	<b>H2SO4 (36N) (ml)</b>	9	10	9	9,5	9	9,30
	<b>P-E10 (1g/L) (ml)</b>	5	7,5	5	5	5	5,50
	<b>FC (g)</b>	100	100	100	100	100	100,00
	<b>Fli1 (ml)</b>	950	950	950	950	950	950,00
	<b>Fli2 (ml)</b>	300	300	300	300	300	300,00
	<b>Fli3 (ml)</b>	300	300	300	300	300	300,00
<b>Intermediaires</b>	<b>FLf (ml)</b>	440	350	360	360	450	392,00
	<b>FMR (ml)</b>	1820	2190	2210	2230	2110	2112,00
	<b>Edi (ml)</b>	3000	2800	3000	3000	3000	2960,00
<b>Extrants</b>	<b>FS (g)</b>	62,6	64	61,89	60,24	70,7	63,89
	<b>FM (g)</b>	25,17	41,77	52,16	57,49	53,2	45,96
	<b>EDR (g)</b>	0,61	0,84	0	1,3	2,5	1,05
	<b>Edf (ml)</b>	2900	2780	2900	2930	3120	2926,00
	<b>Fp (ml)</b>	750	1040	960	800	820	874,00

Aux vues des quantités reportées dans le Tableau 14, il apparaît que la masse de mousses recueillies après flottation augmente au fil des boucles alors que la masse de sol reste inchangée. L'augmentation de masse des mousses au fil des boucles est due à une accumulation de NaCl au sein de celles-ci, qui se trouvent chargées en NaCl. Les mousses sont rincées par les eaux de procédé re-circulées. La charge en NaCl de ces eaux semble trop importante pour pouvoir assurer un bon rinçage des mousses. Cette opération sera donc optimisée en phase IV.

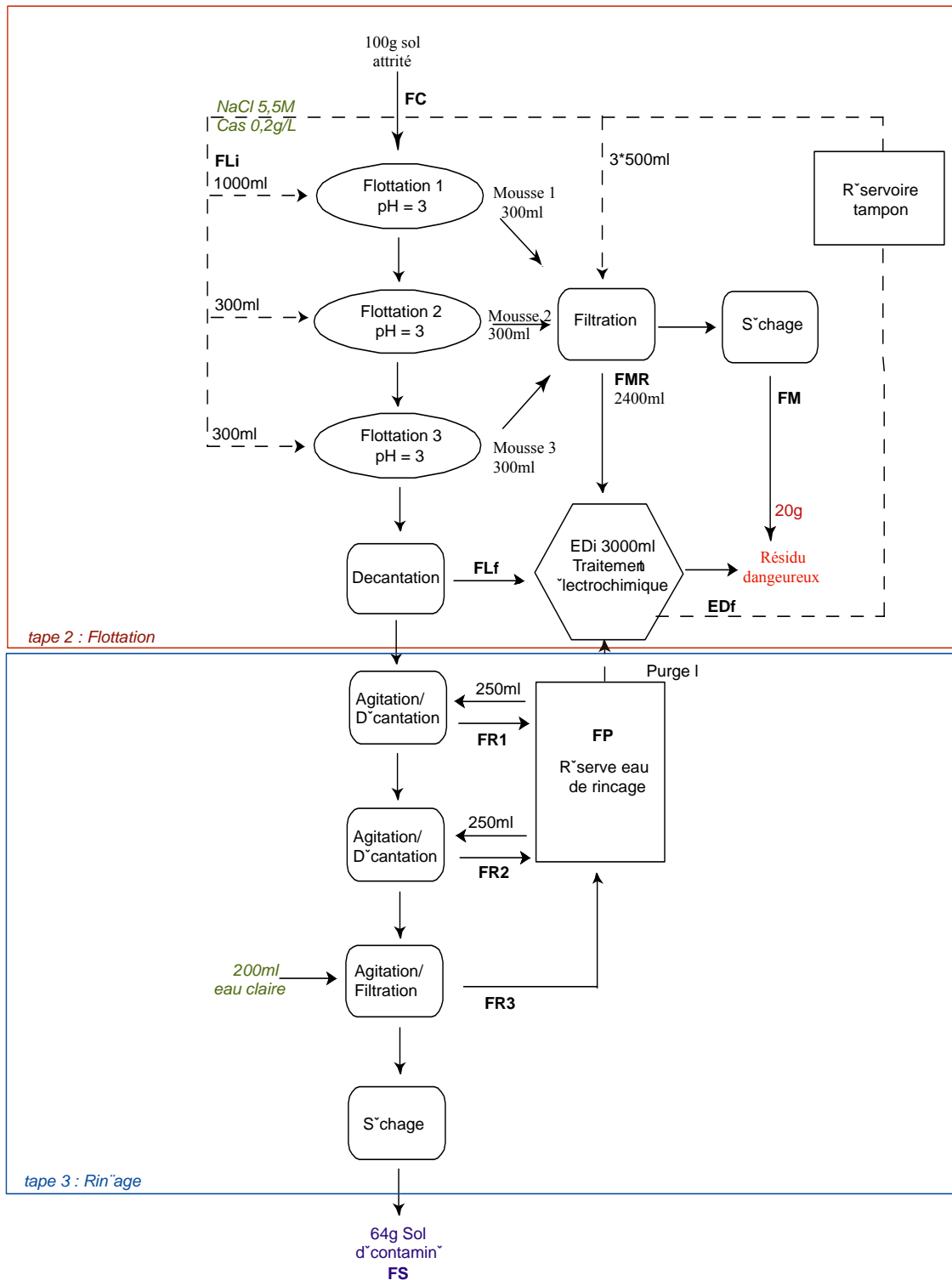


Figure 5 : Schéma de procédé phase III

## 4.2. Résultats

### 4.2.1 Fractions solides de procédé

L'ensemble des analyses réalisées par un laboratoire externe (Bodycote, Québec, Qc) est présenté au Tableau 15. Conformément aux résultats obtenus en phase II, la qualité du sol recueilli en fin de procédé de la première boucle satisfait les exigences réglementaires tant pour les HAP que pour le plomb. En revanche, et à l'exception du plomb, il est impossible d'assurer ce même niveau de qualité des sols pour les boucles suivantes. En effet, si la première boucle permet un abattement de 93% des HAP totaux (Tableau 16), l'enlèvement calculé pour les boucles suivantes se situe entre 50-78%. Il semble donc que les conditions du milieu lors de la recirculation de l'eau n'ont pas été bien contrôlées et qu'un meilleur contrôle de ces aspects est à considérer pour permettre la recirculation de l'eau donc du NaCl. Le résidu métallique issu du traitement chimique est produit à hauteur de 6g/kg de sol sec traité, avec un dépôt électrolytique de plomb de 1.4 kg par tonne de résidus et présente une concentration de 91 000mg de plomb par kg de résidu produit.

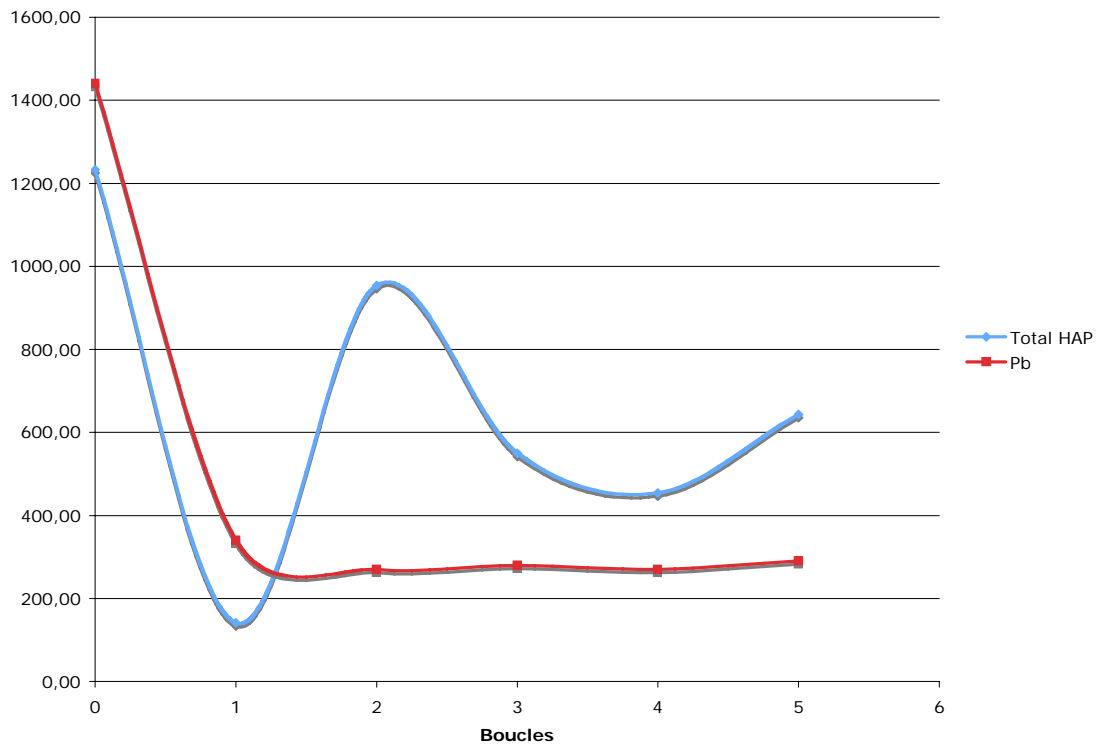


Figure 6 : Évolution de la qualité du sol au fil des boucles

#### 4.2.2 Eaux de procédé

Deux échantillons d'eau de procédé en cinquième boucle en entrée et sortie de traitement électrochimique ont également été analysés par Bodycote. Ainsi il est possible d'abaisser la concentration en plomb des eaux collectées en entrée d'électrodéposition de 41mg/L à 4,6 mg/L, soit un d'enlèvement de 89%.

**Tableau 15** Qualité des sols avant/après traitement par flottation et des mousses générées en phase III (mg/kg sec)

Types	Valeurs	M procédé g sec	PhN	Fluorant N	PyrN	B[a]anthra cN	ChrysN	B[bjk]fluo rantN	B[a]pyr N	Indeno	Dibenzo ah	ghi	Pb	pH
Entrée	Moyenne	98,6	188,00	224,00	172,00	97,60	105,80	168,00	62,00	63,60	13,80	49,00	1440,00	8,18
	Ecart type	0	13,04	11,40	8,37	3,36	5,76	10,95	9,19	2,97	0,45	2,35	54,77	0,04
	CV	0%	7%	5%	5%	3%	5%	7%	15%	5%	3%	5%	4%	1%
	Nb Valeurs	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Sortie- Sol (FS)	III-1	62,6	20,0	21,0	16,0	9,1	9,8	16,0	7,7	5,9	1,3	4,7	340,0	7,3
	III-2	64	160,0	170,0	130,0	70,0	75,0	120,0	61,0	45,0	9,6	35,0	270,0	7,1
	III-3	61,89	94,0	100,0	74,0	40,0	43,0	68,0	34,0	25,0	5,2	19,0	280,0	7,4
	III-4	60,24	75,0	82,0	61,0	32,0	35,0	55,0	27,0	20,0	4,3	15,0	270,0	7,3
	III-5	70,7	110,0	120,0	87,0	47,0	50,0	80,0	40,0	29,0	6,0	22,0	290,0	7,3
Sortie- Mousse (FM)	III-1	25,17	590,0	680,0	520,0	260,0	270,0	400,0	210,0	150,0	36,0	120,0	680,0	6,7
	III-2	41,77	300,0	370,0	270,0	160,0	170,0	270,0	130,0	99,0	24,0	75,0	370,0	6,2
	III-3	52,16	330,0	420,0	310,0	170,0	180,0	300,0	150,0	110,0	25,0	82,0	290,0	6,2
	III-4	57,49	280,0	350,0	260,0	150,0	170,0	270,0	130,0	98,0	23,0	75,0	600,0	6,4
	III-5	53,2	180,0	230,0	170,0	98,0	11,0	170,0	84,0	62,0	14,0	48,0	520,0	6,5

**Tableau 16** Abattements calculés pour chaque boucle sur la qualité du sol en fin de procédé (%)

Boucles	PhN	FluorantN	PyrN	B[a]anthrac N	ChrysN	B[bjk]fluor antN	B[a]pyr N	Indeno	Dibenzo ah	ghi	Pb
1	93%	94%	94%	94%	94%	94%	92%	94%	94%	94%	85%
2	45%	51%	51%	54%	54%	54%	36%	54%	55%	54%	88%
3	69%	72%	73%	74%	75%	75%	66%	75%	76%	76%	88%
4	76%	78%	78%	80%	80%	80%	74%	81%	81%	81%	89%
5	58%	62%	64%	66%	66%	66%	54%	67%	69%	68%	86%

## 5. PHASE IV

Au sein de cette phase, il est proposé de suivre le procédé retenu en phase II sur un cycle de cinq boucles (c'est-à-dire, avec re-circulation des eaux de procédé). Cette phase d'essais s'applique uniquement au traitement de Tr-29.

### 5.1. Principe

Le procédé intégral suivi est présenté à la Figure 7. Le Tableau 17 présente les quantités introduites à chaque boucle (en g pour les solides et ml pour les liquides).

**Tableau 17 Bilan quantitatif des boucles suivies**

		Quantités (g ou mL)					
		Boucles					
	Échantillons	1	2	3	4	5	Moyenne
<b>Intrants</b>	AC (g)	200	200	200	200	200	200,00
	NaCl (g)	820	300	200	125	125	314,00
	Cas (g)	0,52	0,5	0,36	0,28	0,26	0,38
	ALi (ml)	2000	2000	2000	2000	2000	2000,00
	H2SO4 (36N) (ml)	2,5	3,5	3	3	2	2,80
	P-E10 (1g/L) (ml)	50	86	60	50	53	59,80
	FeCl3 (ml)	-	-	0,8	0,6	0,6	0,67
<b>Intermediaires</b>	FC (g)	100	100	100	100	100	100,00
	Fli1 (ml)	950	950	950	950	950	950,00
	Fli2 (ml)	300	300	300	300	300	300,00
	Fli3 (ml)	300	300	300	300	300	300,00
	Fli4 (ml)	300	300	300	300	300	300,00
	Fli5 (ml)	300	300	300	300	300	300,00
	Fli6 (ml)	300	300	300	300	300	300,00
	FLf (ml)	650	810	650	640	530	656,00
	FML	1660	1500	1500	1600	1600	1572,00
	FMR (ml)	900	920	1100	960	1000	976,00
	Edi (ml)	3130	3160	3060	3120	3020	3098,00
<b>Extrants</b>	AS (g)	50,9	50,9	50,9	50,9	50,9	50,90
	FS (g)	58,99	60,8	61,9	59,6	63	60,86
	FM (g)	18,3	15,4	19	17,5	16,8	17,40
	EDR (g)	1,3	1,5	2,1	2,3	2,5	1,94
	Edf (ml)	3040	3120	3000	3040	2980	3036,00
	RTot (ml)	780	1100	1380	1600	1870	1346,00
	Alf (ml)	2000	2000	2000	2000	2000	2000,00

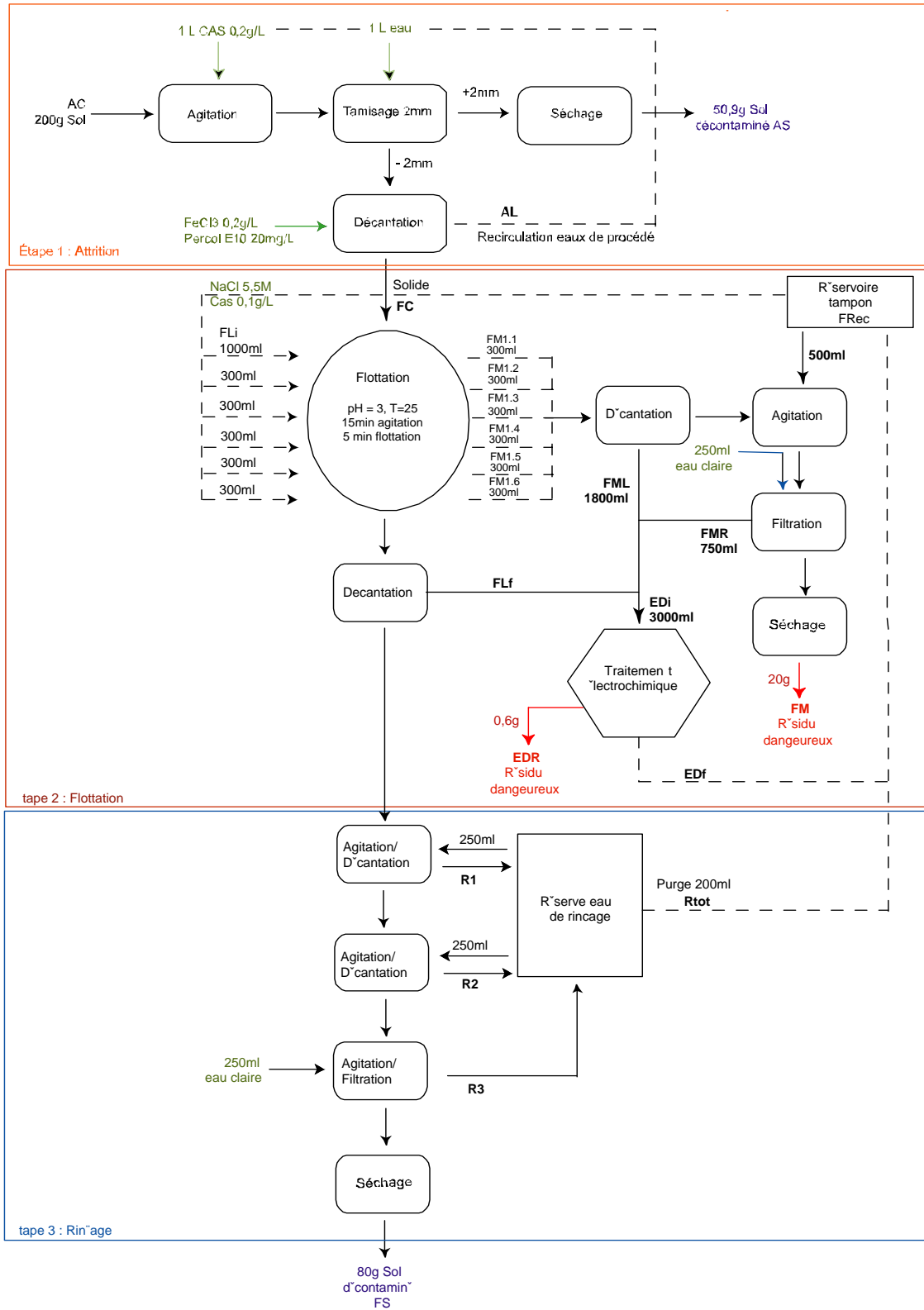


Figure 7 : Schéma de procédé en phase IV

## 5.2. Résultats

### 5.2.1 Fractions solides de procédé

L'ensemble des analyses réalisées par un laboratoire externe (Bodycote, Québec, Qc) est présenté au Tableau 18. Conformément aux résultats envisagés en phase II, la qualité de la fraction de sol inférieure à 2mm recueilli en fin de procédé de la première boucle satisfait les exigences réglementaires. En revanche, il est impossible d'assurer ce même niveau de qualité pour les boucles suivantes. En effet, si la première boucle permet un abattement de 96% des HAP totaux, l'enlèvement calculé pour les boucles suivantes se situe entre 70-84% et ne permet pas d'atteindre les objectifs réglementaires. Les bons résultats en boucle 1 sont issus du parfait contrôle de la charge ionique en présence au sein de l'étape de flottation. Ce contrôle n'a pu être réalisé pour les boucles suivantes. En effet, une quantité, actuellement non déterminée, d'ions chlorure est oxydée en chlore gazeux lors du traitement électrochimique des eaux. Ainsi, il reste dans les eaux re-circulée une quantité inconnue d'ions  $\text{Na}^+$  qui perturbe la charge ionique du milieu et ne permet pas d'assurer une bonne reproductibilité des résultats en terme d'efficacité au fil des boucles. La détermination du taux d'oxydation des ions chlorures est en cours et devrait permettre de répondre au problème posé en contre-ionisant les ions  $\text{Na}^+$  en solution en sortie de traitement électrochimique.

Il est à noter également que la fraction supérieure à 2mm en sortie d'étape d'attrition ne répond pas aux exigences réglementaires. En effet, comme présenté au Tableau 19, cette fraction reste très contaminée en HAP. La phase d'attrition demande donc à être optimisée dans de futurs essais. Les HAP étant adsorbés en surface de la fraction grossière, il est envisagé de multiplier les séquences d'attrition en vue d'une possible optimisation.

### **5.2.2 Eaux de procédé**

Quatre échantillons d'eaux de procédé ont été analysés par Bodycote : deux échantillons en sortie de traitement électrochimique (Edf) et deux échantillons de la réserve des eaux de rinçage du sol (Rtot), chacun à boucle 1 et boucle 5. Ainsi, aucune accumulation significative de plomb dans les eaux de procédé n'a pu être détectée.

**Tableau 18 Suivi de la qualité des eaux de procédé en plomb (mg/L)**

<b>Boucles</b>	<b>1</b>	<b>5</b>
Edf	3,8	12
Rtot	<LD	2,7

**Tableau 19** Qualité des sols avant/après traitement par flottation et des mousses générées en phase IV (mg/kg sec)

Types	Valeurs	M procédé g sec	PhN	Anthrac N	Fluoran tN	PyrN	B[a]anthr acN	ChrysN	B[b]k[f] luorant N	B[a]pyr N	Indeno	Dibenz oah	ghi	Pb
Entrée (AC)	Moyenne	197	520,00	146,00	504,00	374,00	224,00	218,00	306,00	168,00	114,00	30,80	92,60	498,00
	Ecart type	0	107,47	20,66	86,49	63,09	21,91	26,83	40,99	24,90	15,17	4,82	11,87	39,62
	CV	0%	21%	14%	17%	17%	10%	12%	13%	15%	13%	16%	13%	8%
	Nb	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Sortie-Sol > 2mm (AS)	III-1	50,9	670	210	530	390	220	220	300	160	110	28	91	47
	III-2	50,9	980	280	880	670	380	380	610	340	240	48	190	150
	III-3	50,9	430	130	370	280	160	160	220	120	82	21	71	170
	III-4	50,9	600	180	480	360	220	200	290	160	110	27	91	120
	III-5	50,9	870	270	680	510	300	280	380	210	130	36	110	170
Sortie-Sol < 2mm (FS)	III-1	58,99	74	22	72	53	31	32	43	22	15	4	13	33
	III-2	60,8	320	94	310	230	150	150	210	110	78	20	62	54
	III-3	61,9	380	110	370	270	160	160	230	120	81	21	70	80
	III-4	59,6	540	160	500	370	220	220	310	170	120	-	98	96
	III-5	63	270	78	260	190	110	110	150	82	56	-	49	89
Sortie- Mousse (FM)	III-1	18,3	1 900	530	1 900	1 400	860	830	1 100	620	400	110	310	530
	III-2	15,4	1 200	320	1 300	950	590	620	870	460	330	86	260	640
	III-3	19	690	190	700	500	300	320	440	220	140	36	120	530
	III-4	17,5	1 200	330	1 200	920	550	560	770	410	250	68	220	590
	III-5	16,8	1 100	330	1 200	880	550	560	820	430	290	79	250	610

**Tableau 20 Abattements calculés pour chaque boucle sur la qualité du sol en fin de procédé (%)**

Boucles	PhN	Anthrac N	Fluoran tN	PyrN	B[a]anthr acN	ChrysN	B[bjk]fl uorant N	B[a]pyr N	Indeno	Dibenz oah	ghi	Pb
1	96%	95%	96%	96%	96%	96%	96%	96%	96%	97%	96%	98%
2	81%	80%	81%	81%	79%	79%	79%	80%	79%	80%	79%	97%
3	77%	76%	77%	77%	78%	77%	76%	78%	78%	79%	76%	95%
4	69%	67%	70%	70%	70%	69%	69%	69%	68%	-	68%	94%
5	83%	83%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	-	83%	94%

## **6. CONTRÔLE DE LA QUALITÉ**

### **6.1. Méthodes d'analyse en place à l'INRS-ETE**

#### **6.1.1 Analyse des HAP**

L'analyse des HAP a été réalisée à l'aide d'un GC-MS (Perkin Elmer, modèle Clarus 500) après une extraction de type Soxhlet sur la fraction solide obtenue et selon le mode opératoire développé par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2001).

La méthode analytique développée dans ce projet permet de suivre quelques 26 composés, dont : 4 étalons de recouvrement permettant d'évaluer l'efficacité de l'extraction Soxhlet préalable et 2 étalons volumétriques. Le Tableau 21 présente l'ensemble des composés suivis et contrôlés au sein de la méthode d'analyse développée, alors que le Tableau 22 donne quelques caractéristiques de base des HAP étudiés. Un sol certifié (CRM 524 du community bureau of reference) permet également de contrôler tant l'efficacité d'extraction que la qualité d'analyse.

#### **6.1.2 Analyse du plomb**

L'analyse du plomb a été effectuée après une digestion acide partielle (MENVIQ 89.12/213 – Met.1.3) par absorption atomique. Un sédiment de référence a également été utilisé (APHA et al. 1999).

**Tableau 21 HAP suivis et contrôlés au sein de la méthode d'analyse développée**

HAP	Nature	Sol de référence	Contrôle analyses	Limite de detection (mg.kg <sup>-1</sup> )
Naphtalène D-8	Étalon Volumétrique	-	-	-
Naphtalène	HAP	-	+	0,18
Méthyl-2-naphtalène	HAP	-	+	0,18
Acénaphthylène	HAP	-	+	0,32
Acénaphthène D-10	Étalon Recouvrement	-	-	-
Acénaphthène	HAP	-	+	0,47
Fluorène	HAP	-	+	0,33
Phénanthrène D-10	Étalon Volumétrique	-	-	-
Phénanthrène	HAP	-	+	0,21
Anthracène D-10	Étalon Recouvrement	-	-	-
Anthracène	HAP	-	+	0,25
Fluoranthène	HAP	-	+	1,19
Pyrène D-10	Étalon Recouvrement	-	-	-
Pyrène	HAP	+	+	1,13
Benzo[a]Anthracène	HAP	+	+	2,03
Chrysène D-12	Étalon Recouvrement	-	-	-
Chrysène	HAP	-	+	1,42
Benzo[b]Fluoranthène	HAP	+	+	1,20
Benzo[j]Fluoranthène	HAP	-	-	1,20
Benzo[k]Fluoranthène	HAP	+	+	1,20
Diméthylbenzanthracène	HAP	-	-	-
Benzo[a]pyrène	HAP	+	+	2,87
3-méthyl-chloranthène	HAP	-	-	-
Indéno[1,2,3,c-d]pyrène	HAP	+	+	1,60
Dibenzo[a,h]anthracène	HAP	-	+	1,71
Ghi-pénilène	HAP	-	+	1,18

## 6.2. Contrôle qualité des analyses

Le Tableau suivant présente les résultats annoncés par les laboratoires de l'INRS-ETE et de Bodycote sur des matériaux de référence certifiés, ainsi que sur des fractions de procédé. Il apparaît que les deux laboratoires présentent des résultats similaires quant à l'analyse du matériel de référence certifié. Quelques écarts sont au contraire observés pour l'analyse des fractions de procédé. Cette observation semble, de part l'observation précédente, plus être le fruit d'une hétérogénéité de distribution des contaminants au sein de la matrice qu'une réelle différence de résultats d'analyse.

**Tableau 22 Résultats obtenus sur les contrôles d'analyses opérés**

Échantillon	Composés	Valeur (mg/kg sec)			
		Attendue	Intervalle	INRS	Bodycote
CMR-Pb	Pb	168	10	195,4	200
CMR-HAP	Pyrene	173	11	167,1	180
	B[a]anthracN	22,5	1,8	22,3	28
	Benzo[a]pyrene	8,6	0,5	<LD	<LD
	Indeno[1,2,3c-d]pyrene	5,1	0,4	<LD	<LD
III-FS1	Phenanthrene	-	-	53,7	20
	Benzo[b,j,k]fluoranthene	-	-	29	16
	Chrysene	-	-	22,2	9,8
IV-FS1	Phenanthrene	-	-	51,5	74
	Benzo[b,j,k]fluoranthene	-	-	44,1	43
	Chrysene	-	-	26,5	32



## **7. ESTIMÉ DU COÛT DU PROCÉDÉ À GRANDE ÉCHELLE**

Le Tableau 23 présente une estimation des coûts de traitement pour un grand site contenant 100 000 t.m. de sol contaminé en HAP et en Pb. Le coût total de la construction et de l'installation est complètement amorti sur ce seul projet. Ce coût pourrait être ajusté après qu'une caractérisation détaillée ait été effectuée et qu'elle se confirme lors de l'application du procédé. Il faudrait de plus prévoir une période de design et construction de l'unité de 12 à 18 mois. Le sol traité est retourné sur le site. Le coût unitaire globale présenté est de 137 \$/t.m. sèche mais la marge d'erreur est évaluée à 25% à ce stade de développement du design du procédé. La disposition du concentré de HAP représente une forte proportion du coût du procédé (17%). Comme les HAP ont une forte capacité calorifique, il sera pertinent pour la suite du développement du procédé de vérifier la possibilité de plutôt utiliser ces concentrés comme source de combustible dans les cimenteries, ou dans la cogénération pour la production d'électricité ou de vapeur, ce qui permettrait de réduire ce coût.



## **8. ESTIMATION DU COÛT D'UNE DÉMONSTRATION DE LA TECHNOLOGIE**

Les Tableaux 24 et 25 présentent deux estimés de coûts pour deux types de démonstration qui ont chacune des avantages et des inconvénients. Les salaires indiqués sur ces Tableaux pourraient aussi bien être des salaires des gens de l'entreprise qui commercialiserait le procédé que des salaires du personnel de l'INRS, puisqu'une négociation devra avoir lieu pour trouver un terrain d'entente à ce sujet. Le Tableau 24 présente le cas pour lequel le projet se fait par une installation et une opération complète sur le site, ce qui implique une durée de projet de 11 mois. Il s'agit de l'option la plus dispendieuse car elle nécessite un budget de 638 000 \$ environ. Une façon de réduire les coûts d'une telle démonstration serait d'excaver une dizaine de tonnes de sol du site, de les transporter à Québec dans les installations du COREM. Nous pourrions aussi installer l'usine pilote de l'INRS-ETE au COREM (Tableau 25). Ce faisant il serait possible d'y faire rapidement monter une unité de démonstration à partir des nombreux équipements dont ils disposent afin de faire les essais. Le coût de cette option est d'environ 299 000 \$.

**Tableau 24 Estimation du budget de démonstration sur le site sur une période de 11 mois**

Items budgétaires	Montant	
<b>Salaires</b>		
Professeurs	50 000 \$	
Ingénieur	160 000 \$	11 mois
Techniciens	120 000 \$	18 mois
Agents de recherche	125 000 \$	15 mois
Services par technicien labo	10 000 \$	20 jours
<i>Sous-total salaires</i>	<i>465 000 \$</i>	
<b>Frais du pilote</b>		
Excavation et remise en place	2 800 \$	28 h
Location attriteur	7 000 \$	7 mois
Location pompes	7 000 \$	7 mois
Location pilote INRS	12 000 \$	6 mois
Location cellules de flottations	14 000 \$	7 mois
Mobilisation/démobilisation pilote INRS	10 000 \$	
Montage/démontage du système	24 000 \$	300 h
Téléphone et internet	1 000 \$	
Électricité	3 000 \$	
Consommables	6 000 \$	
Entretien et réparation pilote INRS	30 000 \$	
Gestion de 2000 kg de concentrés	4 000 \$	
<b>Frais de séjour et de voyage</b>		
10 voyages Québec Montréal	2 000 \$	
<b>Frais de laboratoire</b>		
Fonctionnement et entretien	4 000 \$	
Frais d'utilisateurs des appareils d'analyse	10 000 \$	
Matériaux et fournitures	3 000 \$	
<b>Secrétariat, papeterie, téléphone, informatique</b>	5 000 \$	
<i>Sous-total (hors salaire INRS)</i>	<i>144 800 \$</i>	
<i>20% frais administratifs</i>	<i>28 960 \$</i>	
<b>Grand total en espèces</b>	<b>638 760 \$</b>	

**Tableau 25 Évaluation du coût d'une démonstration de 6 mois par excavation du sol et transport dans une usine déjà équipée**

Items budgétaires	Montant	
<b>Salaires</b>		
Professeurs	25 000 \$	1 jr/sem
Ingénieur	80 000 \$	1 sur 6 mois
Agents de recherche	50 000 \$	1 sur 6 mois
Services par technicien labo	10 000 \$	20 jours
<i>Sous-total salaires</i>	<i>165 000 \$</i>	<i>1</i>
<b>Frais des essais</b>		
Excavation	700 \$	
Transport à Québec	700 \$	
Location pilote INRS	6 000 \$	
Mobilisation démobilitation pilote INRS	7 000 \$	
Entretien et réparation pilote INRS	15 000 \$	
Consommables	6 000 \$	
Montage démontage du système	16 000 \$	200 h
Essais (personnel COREM)	33 600 \$	3 personnes 14 h/série 80 \$/h 10 séries
Gestion de 2000 kg de concentrés	4 000 \$	
<b>Frais de séjours et de voyage</b>		
5 voyages Québec Montréal	1 000 \$	
<b>Frais de laboratoire</b>		
Fonctionnement et entretien	4 000 \$	
Frais d'utilisateurs des appareils d'analyse	10 000 \$	
Matériaux et fournitures	3 000 \$	
<b>Secrétariat, papeterie, téléphone, informatique</b>		
	5 000 \$	
<i>Sous-total (hors salaire INRS)</i>	<i>112 000 \$</i>	
<i>20% frais administratifs</i>	<i>22 400 \$</i>	
<b>Grand total en espèces</b>	<b>299 400 \$</b>	



## **9. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS**

Le procédé présenté dans ce projet a un fort potentiel pour décontaminer à un prix raisonnable un sol contaminé par des HAP et du plomb. Le problème du plomb est facile à résoudre et le défi provient davantage des HAP qui, en présence du plomb, cause une contamination mixte très exigeante à résoudre.

Le principal problème rencontré est l'ajustement fin de la concentration des ions permettant d'extraire efficacement les HAP lors de la recirculation de l'eau de procédé. Un meilleur suivi et contrôle permettra d'obtenir après quelques efforts supplémentaires une stabilité de l'enlèvement des HAP tout en recirculant la grande majorité de l'eau et du NaCl. Le deuxième problème rencontré est la forte teneur en HAP de la fraction supérieure à 2 mm. Les mélangeurs de laboratoire ne dégagent pas assez d'énergie pour bien attriter des cailloux. Les attriteurs industriels sont beaucoup plus efficaces et ce problème devrait être réglé rapidement avec l'usage d'attriteurs industriels.

Au niveau pratique, il faudra envisager la valorisation énergétique éventuelle des concentrés de HAP pour abaisser le coût de disposition des concentrés. Il faut aussi prendre en considération que le montage d'une usine appliquant ce procédé coûte environ 4 000 000 \$ pour traiter 100 000 tonnes excavées sur 2 ans. Il faudrait donc réviser l'ensemble des coûts de traitement une fois le tonnage réel et le temps alloué au traitement connus. Nous sommes donc très confiants de pouvoir arriver à réaliser ce traitement lorsque nous aurons identifié un partenaire industriel qui a les capacités techniques et la volonté de réussir un tel projet.



## **RÉFÉRENCES**

APHA, AWWA, WPCF, 1999. Standards Methods for Examination of Water and Wastewaters, 20th Edition. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation, Washington, DC.

Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2001) Méthode MA 400-HAP 1.1. Gouvernement du Québec, Québec, QC, Canada.



## CV ABRÉGÉ – GUY MERCIER

### Expériences

Octobre 2002 –	Professeur	INRS-ETE
Juin 2000- Octobre 2002	Associé de recherche	INRS-ETE
Juillet 1988- Juin 2000	Agent de recherche	INRS-Eau
Mai 1985 – Octobre 1985	Professionnel traitement de l'eau	Sanivan-Sanexen
Mai 1979- Mai 1981	Technicien de laboratoire	Pratt & Whitney of Canada Ltd
Mai 1978-Mai 1979	Technicien contrôle qualité	Briston Myers Pharmaceutical Group

### Formation académique

Mai 1997 – Juin 2000	Ph.D., Science de la Terre	Université Laval
Mai 1997 – Juin 2000	Doctorat, Génie Civil	INSA, Toulouse, France
Septembre 1986 – Juillet 1988	M.Sc., Sc de l'eau (assainissement)	INRS-Eau
Sept 1982 – Mai 1985	B.Sc. A., Environnement	UQAM

### Distinctions

- Obtention de la prime pour très bonne performance comme professeur INRS-ETE (2005-2006)

### Affiliations professionnelles

- Spécialiste en Environnement Agréé du Canada (SEAC)
- Membre de la Canadian Association for Water Quality (CAWQ/IWA)

### Enseignement

- Responsable du cours *Réhabilitation de terrains contaminés et gestion de matières résiduelles dangereuses* (INRS-ETE, cours Eau-517, 2 crédits)

### **Publications et communications**

Types	Nombre
Brevets	5
Articles scientifiques publiés	44
Communications – congrès avec compte-rendu	27
Communications – congrès sans compte-rendu	8
Rapports scientifiques ou techniques	66

### **Formation de chercheurs**

Encadrement	Nombre d'étudiants
Direction/co-direction – étudiants à la maîtrise	18
Direction/co-direction – étudiants au doctorat	12
Chercheurs post-doctoraux	2
Encadrement de stagiaires	11

### **Services à l'INRS et à la collectivité**

- Responsable du programme de maîtrise de recherche
- Membres de jurys de mémoires et de thèses (12 étudiants)

### **Domaines d'expertise**

- Procédés de lixiviation des métaux et autres contaminants par voie chimique et biologique (Matrec, Innovente)

- Procédés (Elecstab/ElecDec) électrochimiques de stabilisation et décontamination des boues (Innovente inc.)
- Procédés (Metix/Stabiox) chimique et biologique de stabilisation et décontamination des boues (Innovente inc.)
- Procédé de décontamination (HAP) de déchets d'aluminerie par surfactant (Alcan et Gazon Savard inc.)
- Procédé (Lisox) de traitement de lisier de porc par flottation biologique (Corporation HET)
- Procédé (Alex Cendre) de décontamination des RCPA (commercialisé à l'incinérateur de Québec)



## CV ABRÉGÉ – JEAN-FRANÇOIS BLAIS

### Expériences

Juin 2004 -	Professeur titulaire	INRS-ETE
Déc 2001 – Mai 2004	Professeur agrégé	INRS-ETE
Juin 1998 – Nov 2001	Professeur adjoint	INRS-Eau
Août 1997- Mai 1998	Chercheur post-doctoral	Cominco Research Center (C.B.)
Mai 1997 – Juillet 1997	Chargé de cours	CÉGEP de Sainte-Foy
Fév 1992 – Avril 1997	Associé de recherche	INRS-Eau

### Formation académique

Sept 1989 – Avril 1992	Ph.D., Sciences de l'eau	INRS-Eau
Mai 1988 – Juillet 1989	M.Sc., Microbiologie	Université Laval
Sept 1985 – Avril 1988	B.Sc., Biochimie	Université Laval

### Distinctions et prix

- Titulaire de la Chaire de recherche du Canada en décontamination environnementale (2001-2011)
- Obtention de la prime pour très bonne performance (niveau A) comme professeur INRS-ETE (2002-2006)
- Médaille d'Or du Gouverneur Général du Canada, Excellence académique, étudiant de INRS (1991-1992)
- Prix (3) pour des articles dans des revues scientifiques

### Affiliations professionnelles

- Membre de l'Ordre des Chimistes du Québec
- Membre de l'Association des Microbiologistes du Québec (AMQ)
- Membre de la Canadian Association for Water Quality (CAWQ/IWA)

## Enseignement

- Responsable du cours *Traitement des eaux usées* (INRS-ETE, cours Eau-457, 4 crédits)

## Publications et communications

Types	Nombre
Brevets	5
Articles scientifiques publiés	92
Communications - congrès ou symposium	95
Conférences sur invitation	20
Rapports scientifiques ou techniques	55

## Formation de chercheurs

Encadrement	Nombre d'étudiants
Direction/co-direction – étudiants à la maîtrise	22
Direction/co-direction – étudiants au doctorat	17
Chercheurs post-doctoraux	2
Encadrement de stagiaires	47

## Services à l'INRS et à la collectivité

- Directeur scientifique adjoint de la Revue des Sciences de l'Eau (octobre 2004 – en cours)
- Editorial Advisory Board of Recent Patents on Engineering (juillet 2006 – en cours)
- Membres de jurys de mémoires et de thèses (29 étudiants)

## Domaines d'expertise

- Procédés de lixiviation des métaux et autres contaminants par voie chimique et biologique (Matrec, Innovente)
- Procédés (Elecstab/ElecDec) électrochimiques de stabilisation et décontamination des boues (Innovente inc.)
- Procédés (Metix/Stabiox) chimique et biologique de stabilisation et décontamination des boues (Innovente inc.)
- Procédé de décontamination (HAP) de déchets d'aluminerie par surfactant (Alcan et Gazon Savard inc.)
- Procédé (Lisox) de traitement de lisier de porc par flottation biologique (Corporation HET)
- Procédés chimiques, biologique et électrochimique de traitement des effluents chargés en métaux



## CV ABRÉGÉ – JULIA MOUTON

Adresse :

825, rue St Jean

QUÉBEC (Québec)

G1R-1R2

(418) 525-5976

[julia\\_mouton@inrs-ete.uquebec.ca](mailto:julia_mouton@inrs-ete.uquebec.ca)

### Formation et compétences

Avril 2004-Avril 2008 → **INRS-ETE - Université du Québec.**

**Doctorat « Science de l'eau »:** Traitement des sols à contamination mixte (métaux, HAP)

Sept 2002-Juin 2003 → **Faculté de pharmacie de Marseille (13) - France.**

**DESS « Prévention des Risques et des Nuisances Technologiques »** - Formation en alternance.

1997-2002 → **Université des Sciences du Languedoc – Montpellier II (34) - France.**

**Maîtrise « Chimie des Matériaux et Interfaces », Licence « Chimie fondamentale », DUT « Chimie »**  
spécialisation « **Environnement** ».

### Expériences

Avril 2004-Avril 2008 → **INRS Eau, Terre et Environnement – Université de Québec- Canada.**

Solubilisation des métaux lourds en milieu gastrique dans le cadre de l'**évaluation des risques** liés aux **sites et sols contaminés**. Développement d'un test de dépistage des sols pollués simulant l'environnement gastrique humain. **Chimie des métaux dans le sol, spéciation, biodisponibilité, traitement des sols** par procédés minéralurgiques et chimiques...

Septembre 2002-Juin 2003 → **TOTAL France - Raffinerie de Provence - Etang de Berre –(13) - France.**

Employée au sein du service sûreté et **environnement** : Etude de **la qualité des écoulements souterrains** par suivi piézométrique (mise en place d'un nouveau système de **gestion** de la **qualité** des **nappes** et donc des **sols**), suivi de la propreté sur site, management environnemental **ISO 14 001**, Bilan environnementaux (Rejets atmosphériques aqueux et déchets)...

Janvier 2002-Juin 2002 → **K-JIST – Kwangju Institute of Science and Technology – Corée du sud.**

Etude de polyampholytes types bétaïne en vue de la mise en place d'un **nouveau procédé membranaire de purification des eaux en métaux**. Etude des interactions polymère-ligand **métallique**, cinétique de complexation, optimisation des propriétés du matériau, étude de stabilité des complexes formés...

### **Publications**

Mouton J., Khamitzhanova G., Kudaibergenov S., Geckeler K.E., Application of novel betaine-type polyampholytes for the recovery of transition metal ions, Proc.Intern.Monitoring Conf."Development of Rehabilitation Methodology of Environment of the Semipalatinsk Region Polluted by Nuclear Tests", Semipalatinsk, Kazakhstan. 2002.

Synthesis, Characterization, Stimuli-Sensitive Properties and Metal Ions Complexation of Novel Water-Soluble and Water-Swelling Polybetaines Paper submitted to J. Phys. Chem B.

Juin 2001-Sept 2001 → **DGCCRF - Direction Générale de la Consommation, de la Concurrence et de la Répression des Fraudes – Montpellier – (34) - France.**

Mise au point d'une méthode d'extraction de l'arsénobétaïne chez le poisson en vue d'une **quantification des teneurs en arsenic toxique – Spéciation de l'arsenic – Chimie de l'arsenic en solutions aqueuses et organiques. Mesure de l'impact des pollutions industrielles sur les eaux françaises.**

Fev 1999-Juin 1999 → **DACD – Développement Activités Chimiques et Distribution – Valence – (26) - France.**

Mise au point et optimisation de formulations pour peintures, décapants, assouplissants textile et autres produits industriels