

Institut National de la Recherche Scientifique

INRS- Eau, Terre et Environnement

**PROCÉDÉ DE DÉCONTAMINATION DES BOUES D'ÉPURATION MUNICIPALES:  
ANALYSE DE L'EFFET DES CONDITIONS OPÉRATOIRES SUR LA PERFORMANCE  
DU PROCÉDÉ**

Par

Isabel Beauchesne

Mémoire présenté

Pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.) en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Examineur externe	Roger Guay Université Laval
Examineurs internes	Guy Mercier INRS-ETE
	Jean-Louis Sasseville INRS-ETE
Directeur de recherche	Jean-François Blais INRS-ETE
Codirecteur de recherche	Taha Ouarda INRS-ETE

## **REMERCIEMENTS**

Je souhaite tout d'abord remercier profondément mon directeur de recherche, Jean-François Blais, pour sa grande disponibilité et ses conseils précieux tout au long de la réalisation de mon projet. Monsieur Taha Ouarda, codirecteur de recherche, mérite aussi une mention pour son enthousiasme constant ainsi que son expertise en modélisation. J'aimerais porter une attention particulière à mon conjoint, Simon Barnabé, pour son soutien moral, son aide salutaire et ses conseils judicieux.

Tous mes confrères et consœurs de l'INRS-ETE sont également à remercier pour leurs encouragements, leurs avis, leur aide appréciée et leur amitié, ainsi que le personnel, toujours disponible pour répondre aux questions et bien patient pour résoudre les problèmes analytiques. Finalement, je remercie l'INRS-ETE pour son soutien financier.

## RÉSUMÉ

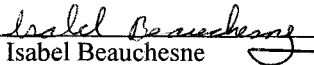
Au cours des dernières années, les gouvernements se concentrent sur la problématique de la disposition des déchets. À ce sujet, la gestion des boues d'épuration municipales cause un problème s'amplifiant alors que leur décontamination s'avère nécessaire pour leur valorisation. Cette décontamination doit toutefois s'effectuer sans affecter la qualité nutritive des boues.


L'efficacité du procédé MÉTIX-AC de décontamination des boues d'épuration municipales a été étudiée sur des boues biologiques, type le plus répandu. Le procédé a donc été optimisé par l'étude de l'impact des paramètres opératoires (pH, potentiel d'oxydoréduction, solution lixivante utilisée - effet du peroxyde d'hydrogène et du chlorure ferrique -) sur la solubilisation des métaux (Cu, Zn, Ni, Cr, Cd, Pb, Mn), la perte en éléments nutritifs (P, K, Mg, DCO, Ca, Na) ainsi que la qualité du conditionnement chimique obtenue suite au traitement. Les tendances observées ont été analysées, les conditions cibles d'opération déterminées et, finalement, un modèle mathématique a été construit, permettant une sélection de la zone de travail privilégiée selon l'importance accordée à chaque paramètre (métaux – ou métal particulier -, qualité nutritive, conditionnement, coûts).

Les résultats montrent que le procédé est efficace pour la décontamination des boues biologiques de la Haute-Bécancour, en réduisant la concentration en cuivre, élément le plus restrictif à la valorisation de ces boues, jusqu'à l'atteinte des normes d'excellente qualité environnementale (C1, épandage agricole au Québec). Une solubilisation significative du zinc, du nickel, du plomb, du manganèse est favorisée par l'acidification des boues, un ajout de fer ferrique améliorant la solubilisation du chrome et du cadmium. Toutefois, la solubilisation du nickel, bien qu'en concentration importante, est insuffisante pour atteindre la norme C1. À l'exception des pH extrêmement acides, les éléments nutritifs sont maintenus dans les boues, particulièrement par précipitation préférentielle du phosphate ferrique.

L'impact sur les boues d'une certaine concentration de produits chimiques étant très variable, la zone de travail cible est exprimée en termes de proportion de réactifs. Elle consiste en l'utilisation de fer ferrique à des concentrations de trois à 7 fois supérieures (cibler 5,6, la floculation pouvant être ardue près de 7) à celle de peroxyde d'hydrogène. La concentration de peroxyde d'hydrogène devrait idéalement être d'environ 10 kg/tbs, quantité suffisante pour assurer la désinfection des boues, la suppression des odeurs et minimiser la formation de précipité métallique. L'acide devrait donc être ajouté pour obtenir un pH inférieur à 2,5 mais supérieur à 2,0 (cibler entre 2,2 et 2,3), alors que le potentiel d'oxydoréduction obtenu devrait se situer à des valeurs supérieures à 450 mV (cibler 450 à 475 mV).

Les travaux ont également permis de proposer un modèle mathématique qui déterminera la zone de conditions opératoires adéquate pour solutionner certaines problématiques à venir. Il faut toutefois réaliser que cette zone cible doit plutôt être vue en tant que proportions de réactifs pour atteindre les conditions de pH et POR cibles, et non de concentrations puisque différentes boues ont différents pouvoirs tampons et réactivité générale.

  
Isabel Beauchesne  
Étudiante

  
Jean-François Blais  
Directeur de Recherche

# TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	III
RÉSUMÉ.....	V
TABLE DES MATIÈRES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES ABBRÉVIATIONS.....	XXI
INTRODUCTION.....	1
<b>CHAPITRE 1: BOUES D'ÉPURATION MUNICIPALES PRODUCTION, USAGE ET ÉLIMINATION.....</b>	<b>3</b>
1.1 PRODUCTION ET ÉLIMINATION : TENDANCES MONDIALES.....	3
1.2 VALORISATION ET SES RESTRICTIONS.....	5
1.2.1 <i>Composition des boues : potentiel utilitaire et facteurs limitatifs.....</i>	<i>6</i>
1.2.1.1 Matière organique et répartition.....	6
1.2.1.2 Éléments nutritifs : azote, phosphore, potassium et micronutriments.....	7
1.2.1.3 Métaux lourds et leur spéciation dans les boues.....	7
1.2.1.3.1 Cuivre.....	9
1.2.1.3.2 Zinc.....	10
1.2.1.3.3 Nickel.....	10
1.2.1.3.4 Chrome.....	11
1.2.1.3.5 Cadmium.....	11
1.2.1.3.6 Plomb.....	12
1.2.1.3.7 Manganèse.....	12
1.2.1.3.8 Les métaux dans les sols : généralités.....	12
1.2.1.4 Organismes pathogènes présents et dangers potentiels.....	13
1.2.2 <i>Études réalisées : efficacité, productivité et risques.....</i>	<i>13</i>
1.2.3 <i>Restrictions Législatives.....</i>	<i>15</i>
1.2.3.1 Métaux.....	15
1.2.3.2 Pathogènes.....	16
1.2.3.3 Odeurs.....	16
<b>CHAPITRE 2: DÉCONTAMINATION ET CONDITIONNEMENT DES PRÉALABLES À LA VALORISATION.....</b>	<b>17</b>
2.1 TECHNIQUES DE DÉCONTAMINATION ET LEUR APPLICABILITÉ.....	17
2.1.1 <i>Échange ionique.....</i>	<i>17</i>
2.1.2 <i>Récupération électrolytique.....</i>	<i>17</i>
2.1.3 <i>Traitement thermique.....</i>	<i>18</i>
2.1.4 <i>Précipitation chimique.....</i>	<i>18</i>
2.1.5 <i>Lixiviation.....</i>	<i>18</i>
2.1.5.1 Agents chélateurs.....	18
2.1.5.2 Agents modifiant le pH.....	19
2.1.5.3 Agents modifiant le potentiel d'oxydoréduction.....	19
2.1.5.4 Biolixiviation.....	19

2.2 LE CONDITIONNEMENT DES BOUES .....	20
2.2.1 Contenu en eau des boues .....	20
2.2.2 Agents de conditionnement.....	21
2.2.2.1 Mécanismes impliqués dans la coagulation.....	22
2.2.2.2 Viscosité du milieu : choix et dosage de l'agent flocculant .....	23
2.2.3 Influence de la nature du milieu.....	24
2.2.3.1 Distribution de la taille des particules .....	24
2.2.3.2 Charge des particules.....	25
2.2.4 Traitements améliorant les caractéristiques de déshydratation.....	25
2.2.4.1 Agents tensioactifs.....	25
2.2.4.2 Traitement thermique .....	25
2.2.4.3 Traitement oxydant.....	26
2.2.4.4 Traitement acide .....	26
2.2.5 Caractéristiques du mélange.....	26
2.3 LES PROCÉDÉS DE DÉCONTAMINATION .....	27
2.4 LES PROCÉDÉS MÉTIX.....	30
<b>CHAPITRE 3: ÉTUDE DE LA PERFORMANCE ET MODÉLISATION DU PROCÉDÉ MÉTIX-AC .....</b>	<b>31</b>
3.1 PRÉSENTATION DE MÉTIX-AC .....	31
3.2 BUTS ET OBJECTIFS DE RECHERCHE .....	32
<b>CHAPITRE 4: MÉTHODOLOGIE .....</b>	<b>33</b>
4.1 ÉCHANTILLONNAGE DES BOUES.....	33
4.2 CHOIX DU POLYMÈRE .....	34
4.3 COURBES D'ACIDIFICATION ET DE HAUSSE DE POR .....	35
4.4 ESSAIS DE LIXIVIATION / PREMIÈRE SÉRIE D'ESSAIS .....	36
4.5 ESSAIS DE LIXIVIATION / SECONDE SÉRIE D'ESSAIS .....	37
4.6 OPTIMISATION DU CONDITIONNEMENT .....	37
4.7 MESURES ANALYTIQUES.....	38
4.7.1 pH et POR.....	38
4.7.2 Demande chimique en oxygène .....	38
4.7.3 Métaux et éléments nutritifs.....	39
4.7.4 Solides totaux .....	40
4.7.5 Qualité du conditionnement .....	40
4.7.5.1 Qualité du floc .....	40
4.7.5.2 Temps de succion capillaire.....	41
4.7.5.3 Turbidité du surnageant.....	42
4.8 ÉLABORATION ET APPLICATION DU MODÈLE.....	43
4.8.1.1 Structure de l'indice de performance .....	43
<b>CHAPITRE 5: RÉSULTATS ET DISCUSSION .....</b>	<b>47</b>
5.1 CHOIX DU POLYMÈRE .....	48
5.2 ACIDIFICATION ET HAUSSE DU POTENTIEL D'OXYDORÉDUCTION .....	49
5.3 TENDANCES OBSERVÉES .....	50
5.3.1 Rendement d'enlèvement des métaux.....	51

5.3.1.1 Cuivre.....	54
5.3.1.2 Zinc.....	56
5.3.1.3 Nickel.....	58
5.3.1.4 Chrome.....	60
5.3.1.5 Cadmium.....	62
5.3.1.6 Plomb.....	64
5.3.1.7 Manganèse.....	66
5.3.2 <i>Solubilisation des éléments nutritifs</i> .....	68
5.3.2.1 Phosphore.....	68
5.3.2.2 DCO <sub>s</sub> .....	70
5.3.2.3 Potassium.....	72
5.3.2.4 Magnésium.....	74
5.3.2.5 Calcium.....	76
5.3.2.6 Sodium.....	78
5.3.3 <i>Qualité du conditionnement</i> .....	80
5.3.3.1 Détermination de la dose de polymère à utiliser.....	80
5.3.3.2 Qualité visuelle du floc.....	82
5.3.3.3 Temps de succion capillaire.....	84
5.3.3.4 Turbidité du surnageant du floc.....	86
5.3.4 <i>Coûts</i> .....	88
5.4 MODÉLISATION DE LA PERFORMANCE DES ESSAIS.....	90
5.4.1 <i>Élaboration du modèle</i> .....	90
5.4.1.1 Pondération des variables.....	90
5.4.1.2 Pondération des sous-indices de performance.....	93
5.4.2 <i>Tendances observées</i> .....	97
5.4.2.1 Sous-indice pour l'enlèvement des métaux.....	97
5.4.2.2 Sous-indice pour le maintien des éléments nutritifs.....	99
5.4.2.3 Sous-indice pour le conditionnement.....	101
5.4.2.4 Sous-indice pour les coûts.....	103
5.4.2.5 Indice de performance globale.....	105
5.4.3 <i>Vérification du modèle et des tendances observées</i> .....	107
5.4.3.1 Concordance avec les résultats de la première série d'essais (BB1).....	107
5.4.3.2 Concordance avec les connaissances antérieures et concomitantes.....	107
5.5 CONDITIONS OPTIMALES D'OPÉRATION ET APPLICATION DU MODÈLE.....	110
<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>113</b>
<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>115</b>
<b>APPENDICE 1</b> .....	<b>125</b>
<b>APPENDICE 2</b> .....	<b>151</b>
<b>APPENDICE 3</b> .....	<b>157</b>
<b>APPENDICE 4</b> .....	<b>165</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Production et disposition des boues d'épuration municipales à travers le monde: UE [EEA 2001], ÉUA [USEPA 1999], QC [RECYC-QUÉBEC 2002], Canada (Can.) [Apedaile 2001], Japon et Nouvelle-Zélande (N.-Z.) [Bradley et al. 1992]. ....	3
Tableau 2: Distribution des métaux dans les boues selon sept fractions, telle que décrite dans la littérature (sections suivantes). Espèces majoritaires (leur somme > 50%; ●), moyennement présentes (leur somme = 20 à 30%; ●), faiblement présente (leur somme ≤ 15%; ○) ou très faiblement présentes (leur somme < 5%; -). Les données entre parenthèses indiquent une seconde possibilité fréquemment observée. ....	9
Tableau 3: Concentrations (mg/kg b.s.) limites pour l'épandage agricole des boues municipales. ....	15
Tableau 4: Composition en métaux et éléments nutritifs des boues utilisées lors des essais.....	34
Tableau 5: Propriétés des polymères utilisés .....	35
Tableau 6: Échelle d'évaluation de la qualité du floc.....	41
Tableau 7: Sélection du polymère à utiliser lors du conditionnement et utilité d'utilisation du $\text{Na}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ .....	48
Tableau 8: Moyennes et écarts types des valeurs mesurées pour chaque paramètre analysé lors des deux séries d'essais (BB2 et BB1) .....	92
Tableau 9: Pondération des paramètres des sous-indices de performance.....	93
Tableau 10: Meilleurs essais selon l'indice de performance globale calculé en accordant 25% d'importance à chaque sous-indice.....	94
Tableau 11: Meilleurs essais selon l'indice de performance globale calculé en accordant 10% d'importance au sous-indice de performance $I_{\text{Métaux}}$ , 30% à chaque autre indice. ....	95
Tableau 12: Meilleurs essais selon l'indice de performance globale calculé en accordant 50% d'importance au sous-indice de performance $I_{\text{Conditionnement}}$ , 30% à $I_{\text{Métaux}}$ et 10% à chaque autre indice.....	96
Tableau 13: Pondérations retenues des sous-indices pour l'évaluation de la performance d'un essai.....	97
Tableau 14: Conditions expérimentales impossibles à atteindre lors des essais (BB1).....	127

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1 :	Production et disposition des boues d'épuration municipales à travers le monde au cours des dernières années ainsi que les objectifs futurs.....	4
Figure 2 :	Propriétés de l'eau des boues d'épuration municipales. a) Schéma de distribution de l'eau (type a : eau libre, 70%; type b : liée au floc, 20%; type c : capillaire, 2%; type d : intracellulaire, 8%) et b) réduction du volume des boues suite aux traitements de déshydratation et procédés permettant l'enlèvement des différents types d'eau. ....	21
Figure 3 :	Mécanismes impliqués lors de la floculation par des polymères .....	22
Figure 4 :	Schéma d'action d'un polyélectrolyte. a) anionique b) cationique .....	23
Figure 5 :	Distribution typique de taille des particules dans les boues (ici boues digérées non floculées).....	24
Figure 6:	Illustration de l'appareil mesurant le temps de succion capillaire. (D1-D0=0,8 cm, D2-D0=1,5 cm).....	42
Figure 7 :	pH résultant de l'ajout d'acide sulfurique dans 1L de boues lors du premier échantillonnage (Boues BB1) ainsi que lors du deuxième échantillonnage (Boues BB2 brutes et diluées à 25,4 g/kg). ....	49
Figure 8 :	Variation du potentiel d'oxydoréduction lors de l'ajout d'oxydant. ....	50
Figure 9:	Fraction soluble du cuivre en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène.....	55
Figure 10:	Fraction soluble du zinc en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène.....	57
Figure 11:	Fraction soluble du nickel en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène.....	59



Figure 12:	Fraction soluble du chrome en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. ....	61
Figure 13:	Fraction soluble du cadmium en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. ....	63
Figure 14:	Fraction soluble du plomb en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. ....	65
Figure 15:	Fraction soluble du manganèse en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. ....	67
Figure 16:	Fraction soluble du phosphore en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. ....	69
Figure 17:	Fraction soluble de la DCO en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. ....	71
Figure 18:	Fraction soluble du potassium en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. ....	73

Figure 19:	Fraction soluble du magnésium en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène.....	75
Figure 20:	Fraction soluble du calcium en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène.....	77
Figure 21:	Fraction soluble du sodium en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène.....	79
Figure 22:	Temps de succion capillaire (s), turbidité (NTU) et qualité du floc pour différentes concentrations de polymère (kg/tbs). .....	81
Figure 23:	Qualité visuelle du floc suite au conditionnement en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. ....	83
Figure 24:	Temps de succion capillaire suite au conditionnement en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. ....	85
Figure 25:	Turbidité du surnageant suite au conditionnement en fin de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. ....	87

- Figure 26: Coûts de traitement pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. .... 89
- Figure 27: Indice de performance pour l'enlèvement des métaux calculé pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. .... 98
- Figure 28: Indice de performance pour le maintient des éléments nutritifs calculé pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. .... 100
- Figure 29: Indice de performance pour la qualité du conditionnement calculé pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. .... 102
- Figure 30: Indice de performance pour les coûts calculé pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. .... 104
- Figure 31: Indice de performance globale calculé pour différentes concentrations (kg/tbs) de réactifs, soit en fonction de a) la concentration de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique, à cinq concentrations spécifiques d'acide sulfurique (une par graphique). b) la concentration d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène à cinq concentrations spécifiques de fer ferrique. c) la concentration de fer ferrique et d'acide sulfurique, à cinq concentrations spécifiques de peroxyde d'hydrogène. .... 106
- Figure 32: Fraction soluble du cuivre en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports  $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$  (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés. .... 128

Figure 33:	Fraction soluble du zinc en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés.....	129
Figure 34:	Fraction soluble du nickel en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés.....	130
Figure 35:	Fraction soluble du chrome en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés.....	131
Figure 36:	Fraction soluble du cadmium en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés.....	132
Figure 37:	Fraction soluble du plomb en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés.....	133
Figure 38:	Fraction soluble du manganèse en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés.....	134
Figure 39:	Fraction soluble du phosphore en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés.....	135
Figure 40:	Fraction soluble de la DCO en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés.....	136

Figure 41:	Fraction soluble du potassium en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés. ....	137
Figure 42:	Fraction soluble du magnésium en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés. ....	138
Figure 43:	Fraction soluble du calcium en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés. ....	139
Figure 44:	Fraction soluble du sodium en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés. ....	140
Figure 45:	Qualité du floc suite au conditionnement en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés. ....	141
Figure 46:	Temps de succion capillaire suite au conditionnement en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés. ....	142
Figure 47:	Turbidité du surnageant suite au conditionnement en fin de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés. ....	143
Figure 48:	Coûts de traitement pour différentes conditions expérimentales, soit en fonction du a) pH et du POR (mV), du milieu réactionnel, pour cinq solutions oxydantes de différents rapports $\text{FeCl}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (une par graphique). b) POR (mV) et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les cinq pH étudiés. C) pH et de la fraction de fer ferrique (v/v) dans la solution oxydante, pour les quatre POR (mV) étudiés. ....	144