

PAR COURRIEL

Le 13 juillet 2023

DEMANDEUR

N/Réf. : 202306-31

Objet : Demande d'accès à l'information

Madame,

Nous donnons suite à votre demande d'accès à l'information reçue le 16 juin 2023.

La recherche a permis de repérer un document concernant votre demande qui vous est accessible. Vous le trouverez ci-joint.

À la réception de ce document, vous remarquerez que nous avons soustrait certains renseignements, comme le permet l'article 14 de la Loi sur l'accès aux documents des organismes publics et sur la protection des renseignements personnels (RLRQ, chapitre A-2.1). En effet, nous avons retranché les renseignements confidentiels en vertu du paragraphe 2 de l'article 9 de cette loi.

Nous vous indiquons que vous pouvez demander à la Commission d'accès à l'information de réviser cette décision. Vous trouverez ci-joint une note explicative concernant l'exercice de ce recours.

Veuillez agréer, Madame, l'expression de nos sentiments les meilleurs.

La responsable de l'accès à l'information,

Original signé par

Matilde Thérroux-Lemay

p. j. 3

Ministère de l'énergie et des ressources

Ministère de l'environnement

Gouvernement du Québec

Etude en laboratoire portant sur la restauration du parc à
résidus de l'ancienne mine East-Sullivan

Antoine Karam

Département des Sols

Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation

et

Louis M. Azzaria

Groupe de Recherche en Géochimie et Géophysique Appliquées
Faculté des sciences et de génie

Janvier 1990



Cité universitaire
Québec, Canada G1K 7P4

EQUIPE DE REALISATION

Coordonnateurs des travaux

Université Laval : Monsieur Antoine Karam

Ministère de l'Energie : Monsieur Claude Dufour
et des Ressources du : Monsieur André Ouellet
Québec

Ministère de : Monsieur Mario Daigle
l'Environnement du : Madame Renée Martial
Québec

Equipe de recherche de l'Université Laval

Département des Sols : Monsieur Antoine Karam, professeur adjoint
FSAA
Pavillon Paul-Comtois

Groupe de Recherche en : Monsieur Louis M. Azzaria, professeur titulaire
Géochimie et Géophysique : FSG
Appliquées : Pavillon Alexandre-Vachon

REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce rapport tiennent à remercier les personnes qui à des titres divers ont rapporté leur soutien technique: (i) le personnel du Département des Sols de l'Université Laval, Mmes Monique Gilbert, Josée Fortin, Joanne Drouin et Denise Gouge, MM. Gilles Grenier, Marc Drouin, Gilles Richard, Eric Gervais et Claude Caron (ii) le personnel du Groupe de Recherche en Géochimie et Géophysique Appliquées de l'Université Laval, Mme Johanne Cyr et M. Benoît Landry.

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
EQUIPE DE REALISATION.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIERES.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES.....	viii
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : CARACTERISTIQUES CHIMIQUES, PHYSIQUES ET MINERALOGIQUES DES RESIDUS MINIERES ET DES MATERIAUX ORGANIQUES	
1.1 Résidus miniers.....	7
1.2 Amendements organiques.....	18
DEUXIEME PARTIE : IMPACTS DE MATERIAUX ORGANIQUES SUR LA QUALITE DES EFFLUENTS ISSUS DE RESIDUS MINIERES ACIDES	
2.1 INTRODUCTION.....	22
2.2 MATERIEL.....	23
2.2.1 Résidus miniers.....	23
2.2.2 Sédiments.....	23
2.2.3 Amendements organiques.....	23
2.3 ESSAIS EXPERIMENTAUX EN LABORATOIRE.....	25
2.3.1 Essais d'acidification des résidus miniers du site East-Sullivan et des sédiments de la rivière Bourlamaque.....	25
2.3.1.1 Acidification des résidus miniers sulfureux.....	25
2.3.1.2 Acidification des sédiments de la rivière Bourlamaque.....	28
2.3.2 Essais d'acidification des amendements organiques.....	28
2.3.3 Essais concernant la capacité des boues à modifier le pH des résidus miniers acides.....	31
2.3.4 Capacité des amendements organiques à retenir le fer de la solution.....	33
2.3.5 Essais de lixiviation des résidus miniers acides amendés avec des matériaux organiques.....	38
2.3.5.1 Influence comparée d'apports de BUE, de BFS et de SB sur les propriétés chimiques des effluents miniers.....	38
2.3.5.2 Effet du mode d'incorporation des amendements organiques sur la qualité des effluents miniers.....	48
2.4 CONCLUSION DE SECTION.....	56

	<u>Page</u>
TROISIEME PARTIE : ESSAIS DE MISE EN VEGETATION DE RESIDUS MINIERES ACIDES AMENDES AVEC DES MATERIAUX ORGANIQUES	
3.1 INTRODUCTION.....	57
3.2 ESSAIS EXPERIMENTAUX EN SERRES.....	58
3.2.1 Matériel.....	58
3.2.1.1 Résidus miniers.....	58
3.2.1.2 Amendements organiques.....	58
3.2.1.3 Plantes agronomiques.....	58
3.2.2 Essais de fertilisation de résidus amendés avec des matériaux organiques	60
3.2.2.1 Résidus miniers recevant des boues de fosses septiques et de sciure de bois.....	60
3.2.2.2 Résidus miniers recevant des boues d'usine d'épuration et de sciure de bois.....	68
3.2.3 Essais de lixiviation: effet du mode d'incorporation des amendements organiques sur la teneur en métaux lourds des eaux de percolation issus de résidus miniers cultivés avec des plantes agronomiques.....	71
3.3 CONCLUSION DE SECTION.....	82
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS.....	88
REFERENCES CONSULTEES.....	90
ANNEXE.....	93

LISTE DES TABLEAUX

	<u>Page</u>
Tableau 1 Composition chimique de douze échantillons de résidus miniers acides provenant du parc à résidus miniers East-Sullivan.....	10
Tableau 2 Teneur en quelques éléments mineurs de cinq minerais à base de soufre.....	11
Tableau 3 Caractéristiques physiques des échantillons de rejets miniers.....	12
Tableau 4 Caractéristiques chimiques des échantillons de rejets miniers.....	14
Tableau 5 Description technique sommaire du traitement des eaux usées de l'usine d'épuration de la ville de Val d'Or.....	19
Tableau 6 Composition chimique et quelques caractéristiques chimiques de trois matériaux organiques utilisés dans la présente étude.....	21
Tableau 7 Quantité de métaux lourds libérés par un échantillon de rejets miniers composite provenant du parc à résidus miniers East-Sullivan en fonction du pH de la solution.....	27
Tableau 8 Quantité de métaux lourds libérés par un échantillon de sédiments prélevé de la rivière Bourlamaque, en fonction du pH de la solution	29
Tableau 9 Quantité de fer libéré (ppm) dans la solution pour trois matériaux organiques, en fonction du pH de la solution.....	30
Tableau 10 Quantité de fer extraite d'une eau de surface s'écoulant du parc à résidus miniers East-Sullivan par trois matériaux organiques.....	36
Tableau 11 Données de sorption du fer par différents mélanges de matériaux organiques après addition d'une eau de lixiviation provenant de résidus miniers acides et contenant 394 ppm de fer.....	37
Tableau 12 Description des traitements relatifs aux essais de lixiviation de résidus miniers acides recouverts avec de matériaux organiques appliqués en surface.....	39
Tableau 13 Evolution du pH d'effluents issus de résidus miniers acides recouverts avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation.....	41
Tableau 14 Evolution du pH d'effluents issus de résidus miniers acides recouverts avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation acide.....	42
Tableau 15 Conductivité électrique d'effluents issus de résidus miniers acides recouverts avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation.....	44
Tableau 16 Conductivité électrique d'effluents issus de résidus miniers acides recouverts avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation acide.....	45

	<u>Page</u>
Tableau 17 Les teneurs (ppm) en métaux des effluents miniers recueillis après plusieurs cycles de lixiviation avec de l'eau distillée.....	46
Tableau 18 Les teneurs (ppm) en métaux des effluents miniers recueillis après plusieurs cycles de lixiviation avec de l'eau distillée acide (pH=4,00).....	47
Tableau 19 Critères de qualité des eaux.....	49
Tableau 20 Description des traitements relatifs aux doses d'application et au mode d'incorporation des matériaux organiques.....	50
Tableau 21 Doses de boues de fosses septiques et de sciure de bois utilisées lors des essais culturaux en serre.....	61
Tableau 22 Rendements en matières sèches (g/pot) de plantes fourragères cultivées en serre sur des rejets miniers traités avec des matériaux organiques.....	65
Tableau 23 Teneurs en éléments majeurs et mineurs de la partie aérienne de la fétuque rouge cultivée sur des rejets miniers sulfureux amendés de boues de fosses septiques et de sciure de bois.....	66
Tableau 24 Teneurs en éléments majeurs et mineurs de la partie aérienne de la fléole des prés cultivée sur des rejets miniers sulfureux amendés de boues de fosses septiques et de sciure de bois.....	67
Tableau 25 Teneurs (mg/kg) en métaux lourds du feuillage des plantes (Chaney, 1972).....	69
Tableau 26 Doses de boues d'usine d'épuration et de sciure de bois utilisées lors des essais culturaux en serre.....	70
Tableau 27 Rendements en matières sèches (g/pot) de plantes fourragères cultivées en serre sur des rejets miniers traités avec des matériaux organiques.....	74
Tableau 28 Teneurs en éléments majeurs et mineurs de la partie aérienne de la fétuque rouge cultivée sur des rejets miniers sulfureux amendés avec des boues d'usine d'épuration et de sciure de bois.....	75
Tableau 29 Teneurs en éléments majeurs et mineurs de la partie aérienne de la fléole des prés cultivée sur des rejets miniers sulfureux amendés avec des boues d'usine d'épuration et de sciure de bois.....	76
Tableau 30 Teneurs en éléments majeurs et mineurs de la partie aérienne du maïs ensilage cultivé sur des rejets miniers sulfureux amendés avec des boues d'usine d'épuration et de sciure de bois.....	77
Tableau 31 Description des traitements relatifs aux essais de lixiviation de résidus miniers cultivés avec de plantes agronomiques.....	78
Tableau 32 Valeurs de pH des échantillons de rejets miniers prélevés à trois profondeurs dans la colonne de lixiviation après la récolte du lotier et du maïs.....	81

	<u>Page</u>
Tableau 33 Concentrations de métaux lourds (ppm) dans les effluents provenant de résidus miniers recouverts avec de matériaux organiques et cultivés avec deux cultures.....	83
Tableau 34 Rendements et composition chimique du lotier corniculé cultivé en serre dans des colonnes contenant des résidus miniers sulfureux amendés avec des matériaux organiques.....	84
Tableau 35 Rendements et composition chimique du maïs ensilage cultivé en serre dans des colonnes contenant des résidus miniers sulfureux amendés avec des matériaux organiques.....	85

LISTE DES FIGURES

	<u>Page</u>
Figure 1 Impact des résidus miniers acides avoisinant les cours d'eau au site East-Sullivan	2
Figure 2 Aires de confinement des déchets provenant de la transformation du bois sur le parc à résidus miniers East-Sullivan	3
Figure 3 Epandage des boues de la station municipale d'épuration des eaux usées de la ville de Val d'Or sur le parc à résidus miniers East-Sullivan	4
Figure 4 Déversement de boues de fosses septiques dans une lagune située sur le parc à résidus miniers East-Sullivan	5
Figure 5 Accumulation de déchets d'origine industrielle sur le parc à résidus miniers East-Sullivan	6
Figure 6 Emplacement des sites d'échantillonnage de résidus miniers acides au parc East-Sullivan à Val d'Or	8
Figure 7 Vue partielle de l'ancien parc à résidus miniers sulfureux d'East-Sullivan Mines Ltd	9
Figure 8 Coupe transversale d'un profil provenant de la zone oxydée des résidus miniers acides du site East-Sullivan	15
Figure 9 Vue d'ensemble des différentes couches de profil de sol minier situé dans la zone d'oxydation	16
Figure 10 Hétérogénéité des matériaux composant la couche de profondeur 50-60 cm	17
Figure 11 Emplacement du site d'échantillonnage des sédiments prélevés de la rivière Bourlamaque	24
Figure 12 Bassin servant à simuler la libération des métaux en fonction du pH du milieu	26
Figure 13 Variation du pH des suspensions de rejets miniers, en fonction de doses croissantes de boues	32

Figure 14	Coloration orangée d'une eau de surface s'écoulant du parc à résidus miniers East-Sullivan	34
Figure 15	Variation de la teneur en fer d'une eau de surface s'écoulant du parc à résidus miniers East-Sullivan contenant 3560 ppm de Fe, en fonction de doses croissantes de matériaux organiques ajoutées	35
Figure 16	Colonne de lixiviation en polypropylène	40
Figure 17	Variation de la concentration en fer des effluents provenant de résidus miniers amendés avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation	51
Figure 18	Variation de la concentration en zinc des effluents provenant de résidus miniers amendés avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation	52
Figure 19	Variation de la concentration en cuivre des effluents provenant de résidus miniers amendés avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation	53
Figure 20	Variation de la concentration en manganèse des effluents provenant de résidus miniers amendés avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation	54
Figure 21	Variation de la concentration en aluminium des effluents provenant de résidus miniers amendés avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation	55
Figure 22	Effet de l'applicaton de boues de fosses septiques et de sciure de bois sur la capacité des résidus miniers acides à supporter la croissance de la fétuque rouge	63
Figure 23	Effet de l'applicaton de boues d'usine d'épuration et de sciure de bois sur la capacité des résidus miniers acides à supporter la croissance de la fléole des prés	72
Figure 24	Effet de l'applicaton de boues d'usine d'épuration et de sciure de bois sur le pouvoir d'implantation du maïs ensilage dans les résidus miniers acides	73

Figure 25	Comparaison entre les valeurs de pH des effluents provenant de résidus miniers amendés avec de matériaux organiques et cultivés avec du lotier ou du maïs, après le semis et avant la récolte	80
Figure 26	Effet du mode d'incorporation des amendements organiques sur la croissance du lotier corniculé	86

INTRODUCTION

Le parc à résidus miniers East-Sullivan a été classé dans la catégorie 1 lors de l'inventaire effectué par le Groupe d'étude et de restauration des lieux d'élimination des déchets dangereux. En effet le parc qui occupe une superficie de 122 ha, a un potentiel d'acidification et de mise en solution des métaux pouvant affecter certains cours d'eau et lacs du secteur. La contamination en métaux lourds, particulièrement le fer, le zinc, le cuivre et le manganèse provenant de ce parc affecte sérieusement la rivière Bourlamaque à partir du lieu East-Sullivan, jusqu'au lac Herbin. La figure 1 montre l'impact des résidus miniers abandonnés avoisinant les cours d'eau.

D'autre part, trois usines déposent, depuis 1984, des déchets provenant de la transformation du bois (résidus forestiers) sur le parc (figure 2). La ville de Val d'Or dépose, depuis 1985, les boues de la station municipale d'épuration des eaux usées sur le parc à résidus miniers East-Sullivan (figure 3). De plus, ce dernier reçoit des boues de fosses septiques (figure 4) ainsi que des déchets d'origine industrielle (figure 5).

Les résidus forestiers sont déposés et étendus sur le parc dans le but de l'isoler de l'eau de précipitation et de l'air ambiant tandis que les boues de station d'épuration et les boues de fosses septiques servent à amender la surface des résidus forestiers afin d'y implanter de la végétation.

C'est dans ce contexte que l'Université Laval a été mandatée pour réaliser une étape du processus d'intervention, soit l'étude de la capacité de pouvoir tampon des amendements organiques à diminuer le potentiel d'acidité et de pollution des résidus miniers. Pour ce faire, la première partie de l'étude comprend, d'une part, une caractérisation chimique des résidus miniers et des amendements organiques utilisés et, d'autre part, une caractérisation minéralogique d'un profil (60 cm de profondeur) provenant de la zone oxydée des résidus miniers et ce à tous les 10 cm. La deuxième partie comprend une étude en laboratoire portant essentiellement sur les impacts des matériaux organiques sur la qualité des effluents issus des résidus miniers acides. La troisième partie comprend des essais culturels en serres avec des résidus miniers amendés avec les matériaux organiques. Finalement, des conclusions et des recommandations sont présentées en termes de restrictions d'usages et d'objectifs de restauration.



FIGURE 1

Impact des résidus miniers acides avoisinant les cours d'eau au site
East-Sullivan



FIGURE 2

Aires de confinement des déchets provenant de la transformation du bois sur le parc à résidus miniers East-Sullivan



FIGURE 3

Epandage des boues de la station municipale d'épuration des eaux usées de la ville de Val d'Or sur le parc à résidus miniers East-Sullivan



FIGURE 4

Déversement de boues de fosses septiques dans une lagune située
sur le parc à résidus miniers East-Sullivan



FIGURE 5

Accumulation de déchets d'origine industrielle sur le parc à
résidus miniers East-Sullivan

PREMIERE PARTIE

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES, PHYSIQUES ET MINERALOGIQUES DES RESIDUS MINIERES ACIDES ET DES MATERIAUX ORGANIQUES

1.1 Résidus miniers

Des échantillons de résidus miniers acides ont été prélevés sur une profondeur de 0 à 15 cm, répartis en 12 points sur toute la surface du parc à résidus miniers East-Sullivan. Les douze sites d'échantillonnage apparaissent à la figure 6.

L'ensemble du parc à résidus miniers East-Sullivan (figure 7) contient en moyenne 6,86% d'Al, 1,06% de Ca, 0,023% de Cu, 0,008% de Co, 5,28% de Fe, 1,34% de Mg, 0,058% de Mn, 0,037% de Pb, 1,64% de K, 29,4% de Si, 0,64% de Ti et 0,018% de Zn (tableau 1). Les résidus miniers du site East-Sullivan renferment, en général, des concentrations en certains métaux lourds moins élevées que les résidus miniers sulfureux du parc Solbec-Cupra (Roche Ltée, 1987). Ces derniers contiennent en moyenne 12% de Fe, 0,12% de Zn, 0,086% de Cu et 0,071% de Pb (tableau 4.8; Roche Ltée, 1987). Les niveaux observés de silicium (29,4%) et d'aluminium (6,8%) tendent à démontrer que les résidus miniers du parc East-Sullivan contiennent des minéraux silicatés. Les échantillons analysés ne comportent pas de concentrations particulièrement élevées de cuivre, de plomb et de zinc ($\leq 0,05\%$). De façon générale, les teneurs en éléments mineurs et traces sont comparables à celles que l'on retrouve le plus fréquemment dans les minéraux soufrés (tableau 2).

La distribution des fractions sable et limon (tableau 3) montre une certaine discontinuité texturale entre les échantillons. La fraction " sable " domine dans les horizons de surface et varie de 59 à

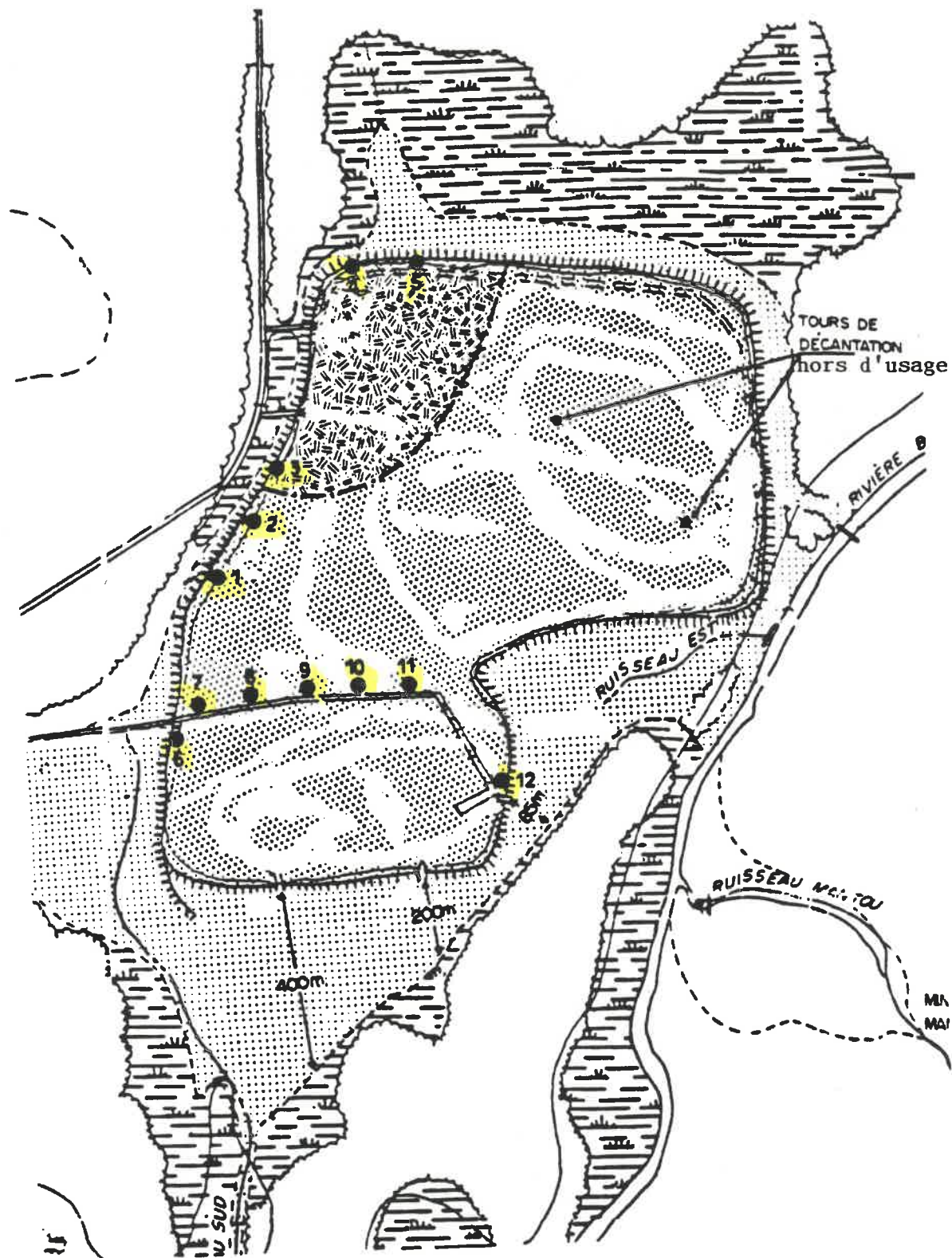


FIGURE 6

Emplacement des sites d'échantillonnage de résidus miniers acides
sur le parc East-Sullivan à Val d'Or



FIGURE 7

Vue partielle de l'ancien parc à résidus miniers sulfureux d'East-Sullivan Mines Ltd

TABLEAU 1. Composition chimique de douze échantillons de résidus miniers acides provenant du parc à résidus miniers East-Sullivan

No du site d'échan- tillonnage	Al %	Ca %	Cu ppm	Co ppm	Fe %	Mg %	Mn ppm	Pb ppm	K %	Si %	Ti %	Zn ppm
1	6,79	0,93	220,1	74,2	4,62	1,29	654,1	336,5	1,58	28,3	0,57	160,4
2	7,03	1,03	138,2	84,5	4,82	1,33	700,7	338,8	1,63	29,9	0,58	177,6
3	6,92	0,97	226,4	66,7	4,62	1,31	584,9	320,7	1,64	29,5	0,57	144,6
4	6,77	0,92	176,4	76,9	4,66	1,31	554,5	310,8	1,55	30,7	0,61	131,4
5	6,87	1,66	248,3	90,3	6,08	1,32	543,6	540,9	1,75	28,4	0,62	198,0
6	7,11	0,91	282,0	98,1	5,73	1,44	592,9	342,9	1,66	30,2	0,71	195,5
7	7,09	1,07	467,7	78,7	5,11	1,39	610,0	383,3	1,68	30,3	0,62	153,3
8	7,58	1,01	368,7	85,9	5,29	1,37	525,0	365,6	1,95	30,1	0,71	143,7
9	6,85	1,03	128,1	85,3	5,10	1,38	534,4	343,7	1,72	29,9	0,67	134,4
10	7,05	1,02	317,0	72,2	5,89	1,49	565,4	402,0	1,52	28,5	0,69	222,2
11	5,87	1,29	480,0	108,0	6,87	1,20	613,3	370,0	1,30	26,3	0,60	403,3
12	6,40	0,92	146,1	89,6	4,65	1,25	522,8	350,7	1,73	30,3	0,76	120,2
Moyenne	6,86	1,06	226,6	84,2	5,28	1,34	583,5	367,2	1,64	29,4	0,64	182,1

Identification des éléments: Al : aluminium, Ca : calcium, Cu : cuivre, Co : cobalt, Fe : fer, Mg : magnésium, Mn : manganèse, Pb : plomb, K : potassium, Si : silicium, Ti : titane et Zn : zinc.

Remarques :

1. L'analyse élémentaire a été effectuée par fusion au métaborate de lithium.
2. L'emplacement des sites d'échantillonnage de résidus miniers apparaît à la figure 6.
3. La concentration des éléments est exprimée sur la base de poids de l'échantillon séché à l'étuve (105 °C).

TABLEAU 2. Teneur en quelques éléments mineurs de cinq minerais à base de soufre

Minéral	Élément	Teneur maximale (ppm)	Interval de concentration que l'on retrouve le plus fréquemment dans la nature (ppm)
Pyrite (FeS ₂)	Cu	60000	10 - 10000
	Co	25000	200 - 5000
	Mn	10000	10 - 50
	Ni	25000	200 - 500
	Pb	5000	200 - 500
	Ti	600	200 - 500
	Zn	45000	1000 - 5000
Pyrrhotine (Fe _{1-x} S)	Cu	7000	100 - 200
	Co	8500	200 - 500
	Mn	3000	200 - 500
	Ni	74700	50 - 500
Chalcopyrite (CuFeS ₂)	Co	2000	10 - 50
	Mn	20000	10 - 50
	Ni	2000	10 - 50
Sphalérite (ZnS)	As	5000	10 - 50
	Cd	44000	1000 - 5000
	Co	3000	10 - 100
	Mn	10000	10 - 100
	Ni	300	10 - 50
Galène (PbS)	As	10000	200 - 5000
	Cu	3000	10 - 200
	Fe	5000	10 - 50
	Mn	2000	10 - 50
	Ni	100	10 - 50

Tiré de Levinson, 1974.

TABLEAU 3. Caractéristiques physiques des échantillons de rejets miniers

Paramètres	No d'échantillon de rejets miniers											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Densité apparente (g/cm ³)	1,57	1,51	1,50	1,47	1,41	1,62	1,68	1,66	1,61	1,53	1,34	1,58
<u>Granulométrie (%)</u>												
Sable	84,6	93,7	93,7	92,7	77,7	71,7	88,7	71,7	74,7	58,7	73,8	75,8
Limon	12,6	3,5	4,5	4,6	18,6	25,6	9,6	26,6	23,6	39,6	21,5	21,5
Argile	2,8	2,8	1,8	2,7	3,7	2,7	1,7	1,7	1,7	1,7	4,7	2,7
<u>Fractionnement des sables (%)</u>												
1. Echantillons tamisés à 2 mm												
Sable très grossier	0,45	0,20	0,22	0,13	2,06	0,74	0,54	0,88	0,46	2,59	1,46	0,16
Sable grossier	2,83	2,37	0,69	0,47	3,53	2,06	13,07	5,31	2,27	4,33	2,64	0,17
Sable moyen	19,44	31,32	25,68	13,17	26,41	10,14	51,84	38,43	9,13	5,92	10,44	3,90
Sable fin	56,60	55,07	63,55	71,77	44,10	64,44	28,11	37,00	68,64	40,77	49,08	63,12
Sable très fin	20,18	11,04	9,87	14,46	23,91	22,62	6,44	18,38	19,51	46,39	36,38	32,66
2. Echantillons non tamisés												
Sable très grossier	0,65	0,29	0,24	0,15	16,70	1,74	0,48	2,88	2,35	2,10	6,29	0,26
Sable grossier	3,58	2,68	0,78	0,65	3,62	2,11	10,28	5,68	3,87	2,69	6,55	0,42
Sable moyen	20,43	32,05	23,11	16,21	26,53	13,90	40,75	31,51	7,16	4,89	23,78	2,59
Sable fin	56,58	54,12	66,67	69,17	38,40	59,47	35,93	36,26	58,88	57,42	49,61	61,19
Sable très fin	18,77	10,87	9,21	13,81	14,75	22,78	12,56	23,68	27,75	32,89	13,78	35,54

Remarque: Les douze sites d'échantillonnage sont illustrés à la figure 6.

94%. De plus, les fractions " sable moyen ", " sable fin " et " sable très fin " dominent dans toutes les couches de surface et varient entre 80 et 99%. Les sols miniers présentent des teneurs en argile inférieures à 5%. La valeur moyenne de densité apparente des rejets miniers est de $1,54 \text{ g/cm}^3$.

Le pH du sol minier est très fortement à extrêmement acide (tableau 4) dans les horizons de surface de tous les sites dans lesquels on observe également un faible taux de saturation en bases échangeables. D'autre part, les quantités de Fe extrait au DTPA (Fe assimilable) dépassent considérablement celles des autres oligo-éléments (Cu, Mn et Zn). La distribution du soufre et du phosphore " assimilables " n'est pas homogène entre les échantillons. Les valeurs de l'indice de disponibilité de P sont comprises entre 10 et 117 mg/kg tandis que celles de S sont comprises entre 60 et 14800 mg/kg.

D'autre part, des prélèvements de résidus miniers jusqu'à 60 cm de profondeur ont été effectués au site 10 (figure 6). Une coupe transversale du site est illustrée à la figure 8. Les échantillons prélevés à tous les 10 cm présentent des teintes différentes (figure 9). La sixième couche en profondeur (50-60 cm) contient des matériaux de teintes grisâtres, jaunâtres et brun orangé (figure 10). La teinte brunâtre ou orangée indique une oxydation de la pyrite tandis qu'une teinte grisâtre indique l'absence de l'oxydation de la pyrite.

L'analyse par diffraction X des différentes couches du site 10 a révélé la présence de cinq minéraux communs à tous les échantillons: le quartz, les plagioclases (souvent albite), l'hydromuscovite (altération des plagioclases), la chlorite (altération de la biotite) et un minéral non identifié pour le moment. La hornblende est détectée dans quelques échantillons; cependant, la hauteur du pic peu élevée, enregistrée sur le diffractogramme, indique que ce minéral ne se

TABLEAU 4. Caractéristiques chimiques des échantillons de rejets miniers

Paramètres	No. d'échantillon de rejets miniers											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
pH (eau)	2,99	3,32	3,40	3,19	2,34	3,40	3,50	3,24	3,30	3,28	2,30	3,32
Conductivité électrique (mmhos/cm)	1,36	0,51	0,30	0,34	4,37	0,45	0,45	0,70	0,42	0,55	4,70	0,42
Phosphore total (mg/kg sec)	550	430	450	490	600	740	570	640	680	740	550	580
<u>Bases échangeables (mg/kg sec)</u>												
Ca	92	51	81	50	5078	93	87	91	70	130	2621	108
Mg	46	9	7	6	97	8	10	17	11	14	274	11
K	5	7	6	8	6	10	6	6	9	9	15	12
<u>Eléments "assimilables" (mg/kg sec)</u>												
P (Bray 2)	15	23	28	29	10	90	37	54	117	60	113	88
Fe (DTPA)	172	120	168	103	234	185	90	157	150	193	2714	118
Zn (DTPA)	2,04	2,45	1,45	1,51	1,25	1,63	1,57	1,69	1,87	2,50	5,53	1,64
Mn (DTPA)	2,57	1,07	1,57	1,50	4,47	0,77	0,87	1,37	0,97	1,27	14,70	1,07
Cu (DTPA)	10	12	7	18	5	8	9	10	6	3	49	3
S (eau)	1050	190	60	80	14800	188	100	324	128	298	8000	128

Remarque: Les douze sites d'échantillonnage sont illustrés à la figure 6.



FIGURE 8

Coupe transversale d'un profil provenant de la zone oxydée des résidus miniers acides du site East-Sullivan



FIGURE 9

Vue d'ensemble des différentes couches de profil de sol minier situé dans la zone d'oxydation



FIGURE 10
Hétérogénéité des matériaux composant la couche de profondeur
50-60 cm

retrouve qu'en petites quantités dans ces échantillons. Une série de pics correspondrait dans quelques échantillons à la présence du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), découlant de la dissolution des carbonates (CaCO_3) en milieu acide. Des pics mineurs sur les différents diffractogrammes représentent des minéraux accessoires dont l'identification n'a pas été possible.

L'analyse du profil de la station 10 a porté sur la distribution et l'identification des sulfures présents par microscopie en lumière réfléchie. Les résultats révèlent que les particules libres de pyrite et quelquefois la chalcoppyrite, sont altérées en surface. Le produit d'altération est probablement la limonite (oxyde de fer hydraté: $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Ces sulfures sont aussi retrouvés en inclusions dans la gangue (quartz?) où ils y sont peu altérés. La pyrite est présente sur tous les horizons tandis que la chalcoppyrite est concentrée dans les horizons inférieurs (couches 40-50 et 50-60 cm). La pyrrhotite, la sphalérite et la galène n'ont pas été observées. La matrice et les minéraux de la gangue ont une teinte grise qui rend l'observation de la sphalérite quasi impossible. De la couche 0-10 cm à la couche 40-50 cm, la teinte de l'horizon passe progressivement d'un brun orangé à un gris verdâtre. Le dernier horizon (couche 50-60 cm) a des teintes variées (figure 10).

Art 9

1.2 Amendements organiques

Les divers amendements organiques utilisés dans la présente étude sont:

- (i) des boues de la station municipale d'épuration des eaux usées (BUE) de la ville de Val d'Or. Le tableau 5 donne une description technique sommaire du traitement;
- (ii) des boues de fosses septiques (BFS) provenant de la firme "Les Fosses Septiques du N.O. Inc." à Val d'Or. Ces boues n'étaient pas stabilisées;
- (iii) des sciures de bois (SB), ≤ 5 cm, déposés sur le parc à

TABLEAU 5. Description technique sommaire du traitement des eaux usées de l'usine d'épuration de la ville de Val d'Or

Paramètre	Description
1. Capacité de traitement:	
Population	35 000
Débit moyen	15 100 m ³ /j (4,0 MUSGPJ)
Débit de pointe	25 500 m ³ /j (6,7 MUSGPJ)
2. Pompage principal	Deux pompes à 2 vitesses. Capacité 327 litres/seconde chacune (5182 USGPM)
3. Prétraitements	Dégrillage mécanique et dessablage aéré
4. Traitements	Biologique, par chenaux d'oxydation, 2 unités, volume total 9 700 m ³ (2,6 MUSG); Aérateurs: types rotors de surface, 8 unités; Clarificateurs circulaires, 2 unités 26,2 mètres de diamètre; Recirculation des boues par vis d'Archimède, 2 unités, capacité 23 300 m ³ /j chacune (6,1 MUSGPJ)
5. Efficacité	Enlèvement de la matière organique : plus de 90%
6. Traitement des boues	a) Un épaisseur circulaire 7,6 m de diamètre b) 2 pompes à boues à piston plongeur c) Conditionnement des boues par polymères d) Assèchement des boues par filtre à bandes presseuses d'une capacité de 20 kg de matières sèches à l'heure

résidus miniers East-Sullivan. Les divers matériaux mis dans des chaudières de plastique ont été expédiés de Val d'Or à Québec par le Groupe TRANSPORT BRAZEAU.

La composition chimique des trois matériaux organiques étudiés apparaît au tableau 6. Les valeurs mesurées pour les boues utilisées sont dans l'intervalle de concentration que l'on retrouve le plus fréquemment dans les boues (Pietz et coll., 1989; Topper et Sabey, 1986; St-Yves, 1984; Halderson et Zenz, 1978).

Les données d'analyse des BUE, BFS et SB montrent que :

- 1) les BUE contiennent des niveaux de métaux lourds plus élevés que les BFS et SB;
- 2) les BUE et BFS sont plus riches en éléments nutritifs pour la plante (éléments assimilables) que la SB;
- 3) les trois matériaux organiques ont un pH neutre à légèrement alcalin.

Compte tenu de la durée du contrat et du montant accordé pour la réalisation du protocole expérimental , il nous a été difficile d'inclure dans les expérimentations tous les types de sciures de bois ou copeaux de bois se trouvant sur le parc à résidus miniers. Nous avons donc choisis un seul type de sciure de bois lequel avait une valeur de pH légèrement alcaline.

TABLEAU 6. Composition chimique et quelques caractéristiques chimiques de trois matériaux organiques utilisés dans la présente étude

Paramètres fosses	Sciure de bois	Boues d'usine d'épuration	Boues de septiques
<u>Éléments totaux</u>			
Aluminium (%)	0,10	0,76	0,68
Arsenic (ppm)	<2,0	2,0	5,0
Azote Kjeldahl (%)	0,21	4,20	1,3
Calcium (%)	0,25	1,44	1,50
Chrome (ppm)	1,0	32,0	18,0
Cuivre (ppm)	9,0	852,0	107,0
Cobalt (ppm)	1,4	21,3	7,1
Fer (%)	0,04	2,61	0,38
Magnésium (%)	0,16	0,51	0,15
Manganèse (%)	0,01	0,13	0,02
Mercure (ppb)	5,0	6000,0	2100,0
Nickel (ppm)	7,0	103,0	95,0
Phosphore (%)	0,02	2,3	0,5
Potassium (%)	0,02	0,28	0,11
Plomb (ppm)	8,2	307,4	146,5
Silicium (%)	0,01	0,02	0,05
Soufre (%)	<0,01	0,90	0,52
Titane (%)	0,01	0,08	0,05
Zinc (ppm)	28,7	560,0	397,5
<u>Éléments "assimilables" (mg/kg)</u>			
Calcium	662,9	5856,0	3780,0
Potassium	253,2	2362,0	520,6
Fer	49,1	770,5	142,0
Cuivre	2,9	15,4	12,1
Zinc	4,1	104,9	35,0
Manganèse	50,7	87,2	79,5
<u>Autres</u>			
Carbone organique (%)	42,3	10,2	8,8
Rapport C/N	201	2,4	6,8
pH (eau)	7,58	6,95	7,30

Remarques:

1. La concentration des éléments est exprimée sur la base de poids de l'échantillon séché à l'étuve (105 °C).
2. Unités de mesure: 1% = 10 000 ppm; 1 ppm = 1000 ppb;
1 mg/kg = 1 ppm.

DEUXIEME PARTIE

IMPACTS DE MATERIAUX ORGANIQUES SUR LA QUALITE DES EFFLUENTS ISSUS DE RESIDUS MINIERES ACIDES

2.1 INTRODUCTION

Les résidus miniers contenant des minéraux sulfurés engendrent de sérieux problèmes de gestion et d'élimination. En effet, le soufre a l'inconvénient de produire par oxydation des ions sulfatés qui combinés à l'eau (pluie et neige fondante) et en présence de l'oxygène, forment de l'acide sulfurique et des espèces chimiques à base de fer. Ceci provoque une forte acidification du milieu. Le pH des résidus miniers hautement sulfureux se situe entre 2,4 et 3,5. La réaction d'oxydation peut être catalysée par voie microbienne à l'aide de bactéries chimio-autotrophes si les conditions ambiantes le permettent (présence d'eau, d'oxygène, de gaz carbonique, de phosphore, d'ammoniaque et d'éléments mineurs).

L'eau de pluie qui entre en contact avec les résidus sulfureux s'acidifie et tend à solubiliser les métaux lourds présents dans les résidus miniers. Il est donc nécessaire de corriger l'acidité du milieu afin de neutraliser l'activité de tous les métaux ou les composés toxiques. La méthode classique est l'apport d'amendements calcaires. La quantité de chaux agricole requise sur les résidus miniers acides varie d'un parc à l'autre et même d'un point à l'autre sur le parc (Watkin et Watkin, 1982). Des parcs à résidus possédant un fort potentiel de production d'acide peuvent avoir des besoins en chaux qui s'élèvent jusqu'à 550 tonnes par hectare (Cescas, 1987). L'application répétitive de doses élevées de chaux nécessite une machinerie appropriée pour la tâche et constitue une opération coûteuse.

Les objectifs de cette deuxième partie du travail consiste donc à :

1. Examiner l'effet de l'acidification des résidus miniers sulfureux provenant du site East-Sullivan, sur le taux de libération des métaux lourds.
2. Examiner l'effet de l'acidification des sédiments prélevés dans la rivière Bourlamaque située à proximité du site East-Sullivan, sur le taux de libération des métaux lourds.
3. Evaluer, en laboratoire, la capacité de pouvoir tampon des amendements organiques à diminuer l'acidité excessive des résidus miniers sulfureux.
4. Evaluer, en laboratoire, la qualité (pH, conductivité électrique, métaux lourds) des effluents provenant:

(i) de résidus miniers non amendés (témoin)

(ii) de sciures de bois (pH=7,58)

(iii) de résidus miniers recouverts avec les divers amendements organiques (BUE, BFS, SB).

2.2 MATERIEL

2.2.1 Résidus miniers

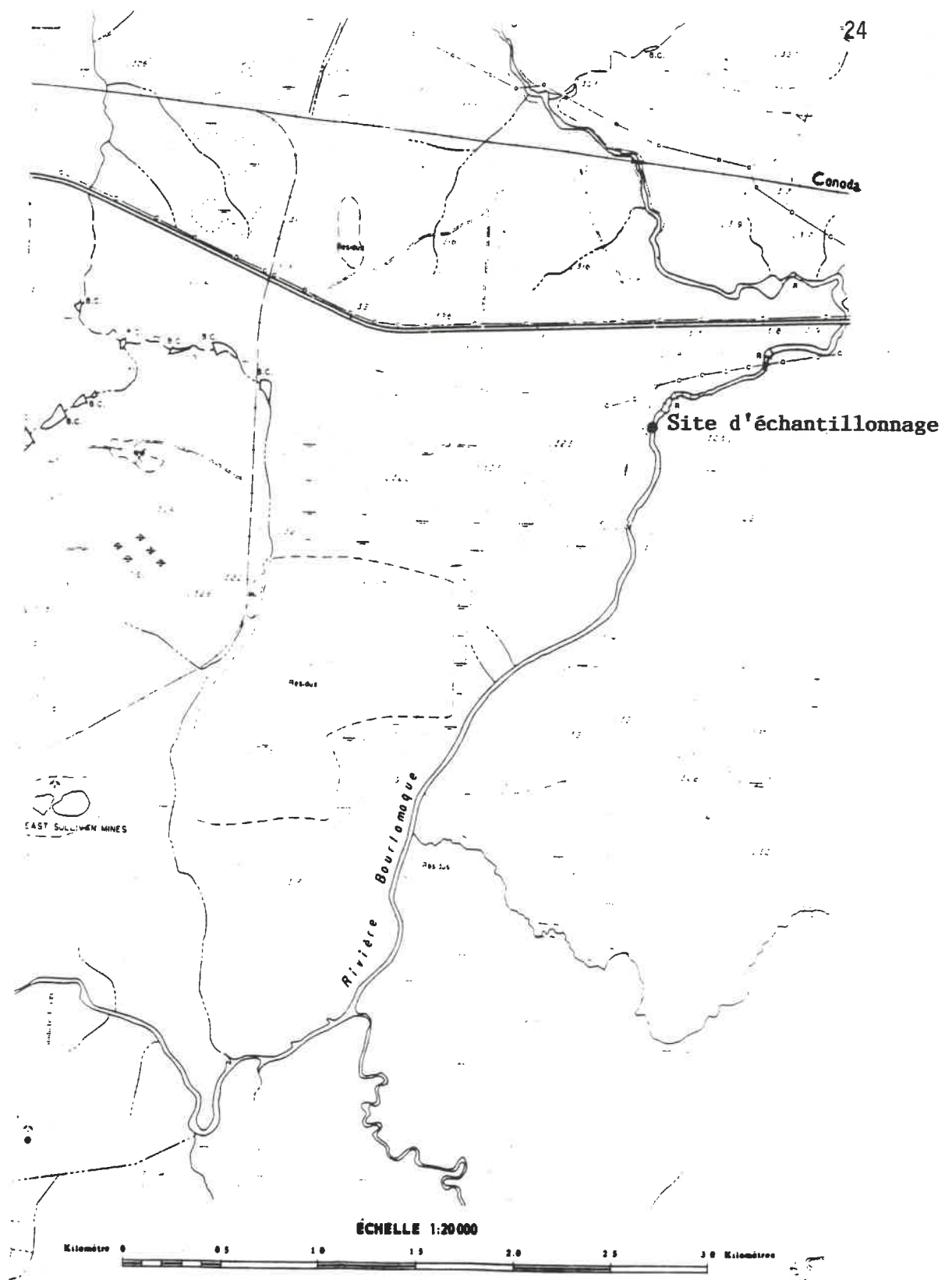
Plusieurs échantillons de résidus miniers ont été prélevés en vrac à plusieurs endroits dans le parc à résidus miniers East-Sullivan. Les sites d'échantillonnage sont représentés à la figure 6. Les échantillons ont été mélangés et homogénéisés pour en former un seul échantillon (échantillon composite).

2.2.2 Sédiments

Un seul échantillon de sédiments a été prélevé dans la rivière Bourlamaque. Le site d'échantillonnage apparaît à la figure 11.

2.2.3 Amendements organiques

Les divers amendements organiques sont ceux de la section 1.2. La composition chimique des trois amendements organiques utilisés (BUE, BFS et SB) apparaît au tableau 6.



RIVIÈRE BOURLAMAQUE

FIGURE 11

Emplacement du site d'échantillonnage des sédiments prélevés de la rivière Bourlamaque

2.3 ESSAIS EXPERIMENTAUX EN LABORATOIRE

2.3.1 Essais d'acidification des résidus miniers du site East-Sullivan et des sédiments de la rivière Bourlamaque

L'étude de la libération des éléments inorganiques (Al, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Zn) en fonction de l'acidité du milieu a été réalisée en laboratoire dans des bassins de Pyrex (figure 12) selon les modalités préconisées par Arafat et Nriagu (1986). Les matériaux utilisés sont:

- (i) les résidus miniers (échantillon composite),
 - (ii) un échantillon de sédiments de la rivière Bourlamaque.
- Les matériaux (1L) ont été introduits dans les bassins puis ces derniers furent remplis d'eau distillée. Le rapport matière solide : eau est de 1 : 4.

Le pH du milieu a été modifié de façon régulière au moyen de solutions d'acide sulfurique ou d'hydroxyde de sodium diluées, pendant environ quatre mois. Chaque traitement est répété quatre fois. L'eau du bassin est analysée 10 fois durant l'expérimentation.

2.3.1.1 Acidification des résidus miniers sulfureux

Les données de l'extraction des métaux lourds en fonction de l'acidité du milieu sont présentées au tableau 7. Les quantités de métaux libérées varient en fonction du pH; elles augmentent quand le milieu devient plus acide. A pH=2,35, Les quantités (mg/L) de métaux libérées par les résidus miniers sulfureux sont: 154(Fe), 150(Al), 21(Ni), 16(Cu), 8(Cr), 4,2(Mn), 1,64(Zn), et 0,85(Cd). Par contre à pH=3,25 , les quantités extraites (mg/L) sont: 5,5(Fe), 18,0(Al), 7,5(Cu), 9,2(Ni), 2,8(Mn), 0,8(Zn), 4,4(Cr) et 0,5(Cd) et à pH=5,00, les quantités extraites (mg/L) sont: 0,2(Fe), 0,1(Al), 1,0(Cu), 0,2(Ni), 0,2(Mn), 0,1(Zn), 0,05(Cr) et 0,01(Cd).

L' effet du pH sur la libération des métaux par les résidus miniers sulfureux peut être envisagé sous deux aspects. Le premier étant une réaction de solubilisation et l'autre, un effet indirect résultant



FIGURE 12

Bassin servant à simuler la libération des métaux en fonction du pH du milieu

TABLEAU 7. Quantité de métaux lourds libérés par un échantillon de rejets miniers composite provenant du parc à résidus miniers East-Sullivan, en fonction du pH de la solution

pH	Fe (ppm)	Al (ppm)	Zn (ppm)	Ni (ppm)	Cd (ppm)	Cu (ppm)	Cr (ppm)	Mn (ppm)
2,35	154,0	150,0	16,0	21,0	0,85	8,0	1,64	4,2
2,45	88,9	140,0	12,0	19,0	0,80	7,8	1,48	4,1
2,55	54,5	123,0	10,0	17,5	0,70	7,4	1,35	3,4
2,65	31,5	95,0	8,5	15,0	0,60	6,5	1,28	3,1
3,05	11,5	50,0	8,1	11,4	0,60	6,2	1,20	3,0
3,25	5,5	18,0	7,5	9,2	0,50	4,4	0,80	2,8
3,85	1,8	12,0	3,4	5,0	0,10	3,2	0,50	2,2
4,05	1,5	5,0	2,9	2,0	0,05	2,8	0,38	1,6
4,40	0,5	1,0	1,0	0,5	0,04	2,0	0,12	0,9
5,00	0,2	0,1	0,1	0,2	0,01	1,0	0,05	0,2

de la décomposition partielle des minéraux phylliteux présents dans les résidus. Kishk et Hassan (1973), rapportèrent que les solutions acides altèrent ou décomposent les aluminosilicates et que les ions H^+ peuvent ainsi pénétrer dans la maille cristalline des minéraux et déplacer les métaux comme le fer, l'aluminium et autres.

2.3.1.2 Acidification des sédiments de la rivière Bourlamaque

Le tableau 8 montre la variation des quantités de métaux lourds libérées en fonction du pH du milieu. Les résultats indiquent que le taux de métaux lourds extrait des sédiments augmente avec l'acidité du milieu. A pH=2,35, la solution d'équilibre contient (mg/L): 18,0 (Al), 16,8(Ni), 3,8(Fe), 1,15(Mn), 1,0(Cd), 0,86(Zn) et 0,45(Cu). Par contre, à pH=5,00, les concentrations des métaux lourds dans la solution aqueuse sont comprises entre 0,01 et 0,50 mg/L. La baisse du pH de l'eau du bassin provoque la libération des métaux dans le milieu. Ces résultats sont en accord avec les observations de Arafat et Nriagu (1986).

2.3.2 Essais d'acidification des amendements organiques

Les données de désorption du fer (élément d'intérêt) par les trois matériaux (BUE, BFS et SB), en fonction du pH de la solution ont été obtenues en équilibrant pendant 24 heures avec agitation intermittente, 2,0g d'amendement organique dans 80 mL d'eau distillée ajustée à divers pH. Après centrifugation, les solutions ont été décantées et le fer déterminé par spectrométrie d'absorption atomique. Le pH des solutions surnageantes fut également mesuré. Les résultats sont présentés dans le tableau 9. Comme on peut s'y attendre, la quantité de fer désorbée augmente considérablement avec l'accroissement de l'acidité de la solution. Par contre, les quantités de fer libérées par les amendements organiques, en milieu neutre à alcalin, sont minimes. Les quantités de fer libérées sont dépendantes des quantités initialement présentes (tableau 6). En effet, nous notons que la quantité de fer libérée augmente dans l'ordre suivant: $SB < BFS < BUE$. Ces résultats laissent supposer que la teneur élevée de certains métaux lourds dans les amendements organiques pourrait constituer un risque de

TABLEAU 8. Quantité de métaux lourds libérés par un échantillon de sédiments prélevé de la rivière Bourlamaque, en fonction du pH de la solution

pH	Fe (ppm)	Al (ppm)	Zn (ppm)	Ni (ppm)	Cd (ppm)	Cu (ppm)	Cr (ppm)	Mn (ppm)
2,35	3,80	18,0	0,86	16,8	1,00	0,45	8,0	1,15
2,45	2,95	14,0	0,80	11,6	0,80	0,38	7,8	0,94
2,55	1,90	12,0	0,62	11,0	0,78	0,28	7,6	0,86
2,65	1,50	10,0	0,48	10,2	0,70	0,26	7,2	0,76
3,05	1,20	5,0	0,40	9,0	0,65	0,20	6,5	0,70
3,25	1,05	2,0	0,40	7,5	0,60	0,18	4,0	0,52
3,85	1,00	1,5	0,20	3,0	0,60	0,14	3,1	0,20
4,05	0,20	1,0	0,10	1,0	0,30	0,10	1,0	0,18
4,40	0,10	0,5	0,05	0,2	0,20	0,06	1,0	0,10
5,00	0,02	0,1	0,01	0,1	0,10	0,02	0,5	0,02

TABLEAU 9 : Quantité de fer libéré (ppm) dans la solution pour trois matériaux organiques, en fonction du pH de la solution d'équilibre

Sciure de bois		Boues d'usine d'épuration		Boues de fosses septiques	
pH	Fe	pH	Fe	pH	Fe
0,85	7,60	0,92	462,0	0,89	55,6
1,16	4,40	1,30	380,0	1,25	48,0
1,56	3,20	1,92	347,0	1,76	41,2
1,87	3,05	2,50	172,0	2,35	36,6
2,18	2,65	3,28	45,2	3,24	23,4
7,10	0,18	6,90	2,5	6,80	0,8
9,20	0,10	8,80	1,4	9,70	0,3
9,95	0,02	9,72	0,5	9,82	0,1

Remarques :

1. Le rapport matériel organique:solution était de 1:40.

2. Le temps de réaction était 24 h.

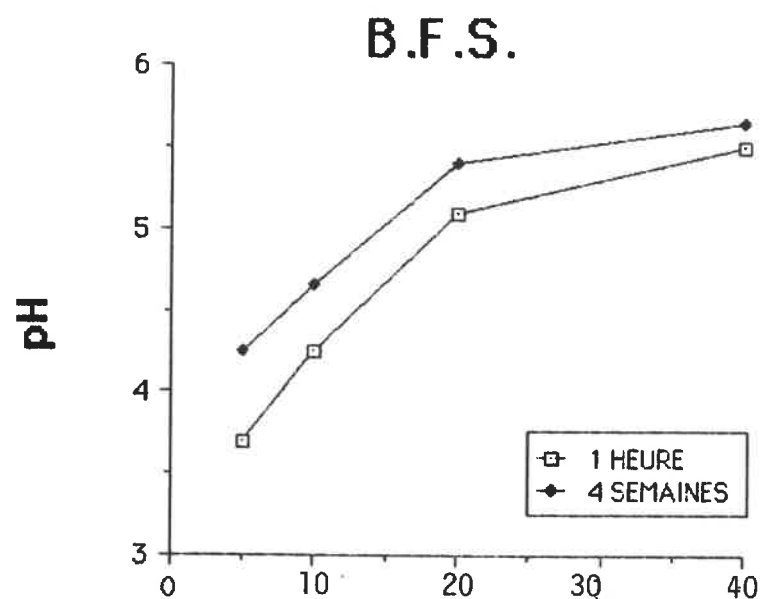
libération additionnelle de métaux lourds surtout si le milieu récepteur tend à acidifier les boues, à long terme, ou bien lors de la biodégradation des amendements organiques dans le milieu récepteur.

2.3.3 Essais concernant la capacité des boues à augmenter le pH des résidus miniers acides

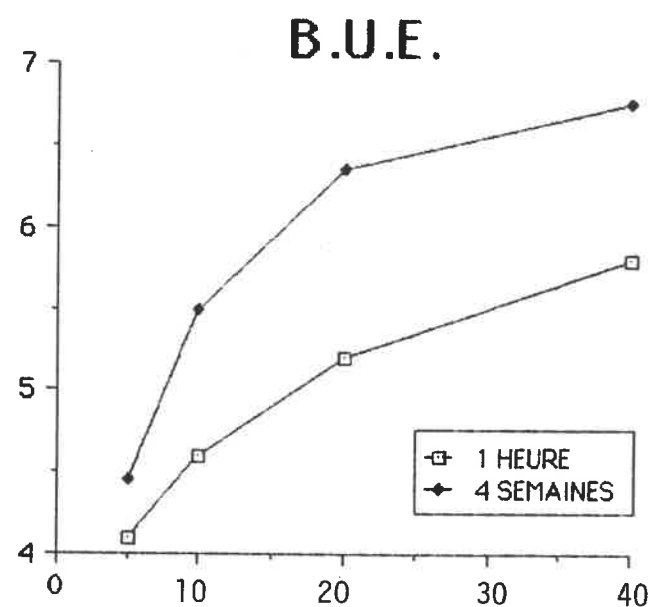
Vingt millilitres d'eau distillée ont été ajoutés à 10,0g de résidus miniers (échantillon composite) contenant des quantités croissantes de boues (BUE et BFS), dans des béchers de 50 mL. La proportion de boues ajoutées aux résidus miniers représente 0, 5, 10, 20 et 40%. Les béchers furent bouchés pour diminuer l'évaporation et laissés au repos pendant 4 semaines, à la température de la pièce. Le pH des mélanges (résidus miniers + boues) fut mesuré à deux reprises, soit après 1 heure et 4 semaines de réaction.

Les variations de pH des résidus miniers en fonction des quantités croissantes de boues ajoutées sont représentées à la figure 13. Ces résultats indiquent une augmentation progressive du pH des résidus miniers avec les doses croissantes de boues, après 1 heure et 4 semaines de contact.

Après 4 semaines de contact, les valeurs de pH des résidus miniers mélangés avec les boues d'usine d'épuration augmentent graduellement pour atteindre une valeur de pH=6,75 avec la dose de BUE la plus élevée, soit 40%. Dans le cas des BFS, les valeurs de pH correspondant aux doses 5, 10, 20 et 40% sont respectivement 4,25, 4,65, 5,40 et 5,65. Les BUE sont plus efficaces à augmenter le pH des rejets miniers acides que les BFS. Les résultats obtenus sont en accord avec les observations de Haghiri et Sutton (1983) qui ont rapporté que l'application des doses de boues d'usine d'épuration variant de 179 à 716 tonnes métriques par hectare contribuait à augmenter les valeurs de pH des sols miniers acides (pH=2,9) à 6,2 et 6,4, respectivement. Ces doses de boues correspondent approximativement à 9 et 36%.



Proportion de boues ajoutées aux rejets miniers, %



Proportion de boues ajoutées aux rejets miniers, %

FIGURE 13

Variation du pH des suspensions de rejets miniers en fonction de doses croissantes de boues

Abréviations: 1.B.U.E.=Boues d'usines d'épuration
2.B.F.S.=Boues de fosses septiques

2.3.4 Capacité des amendements organiques à retenir le fer de la solution

Afin d'apporter plus d'information sur la capacité des amendements organiques à diminuer le potentiel de pollution des rejets miniers acides, nous avons entrepris deux séries d'expériences. La première consistait à traiter une eau de surface contaminée provenant du parc à résidus miniers East-Sullivan (figure 14) avec différentes quantités d'amendements organiques (BUE, BFS et SB). Comme l'indique la figure 15, la concentration du fer total dans l'eau de surface diminue considérablement avec les doses croissantes de matériaux organiques. Les boues d'usine d'épuration et les boues de fosses septiques sont plus efficaces à sorber le fer de l'eau de surface que la sciure de bois. Les BUE, les BFS et la SB ont sorbé respectivement 95,2, 94,0 et 73,9% du fer initialement présent dans l'eau de surface (3560 mg/L), au niveau de la plus forte dose d'application (tableau 10).

Dans une deuxième série d'expériences, nous avons déterminé la capacité d'un mélange composé de BUE + SB ou de BFS + SB à sorber le fer d'un effluent minier. A cet effet, des effluents aqueux provenant d'un échantillon composite de résidus miniers acides ont été mis en contact avec différents mélanges de BUE + SB et BFS + SB (tableau 11). Les résultats obtenus montrent la supériorité des boues à celle de la sciure de bois à sorber le fer en solution. Plus la proportion de boues dans les mélanges boues + sciure de bois est élevée, plus le mélange sorbe le fer dissous dans l'effluent minier.

D'après l'avis de plusieurs chercheurs (Corey et coll., 1987; Sommers et coll., 1984), les principaux mécanismes de rétention des métaux par les boues sont:

- 1) la précipitation des métaux sous forme de carbonates, de phosphates, de sulfures, de silicates ou d'oxydes hydratés et
- 2) la sorption des métaux par la matière organique et les oxydes hydratés.



FIGURE 14

Coloration orangée d'une eau de surface s'écoulant du parc à résidus miniers East-Sullivan

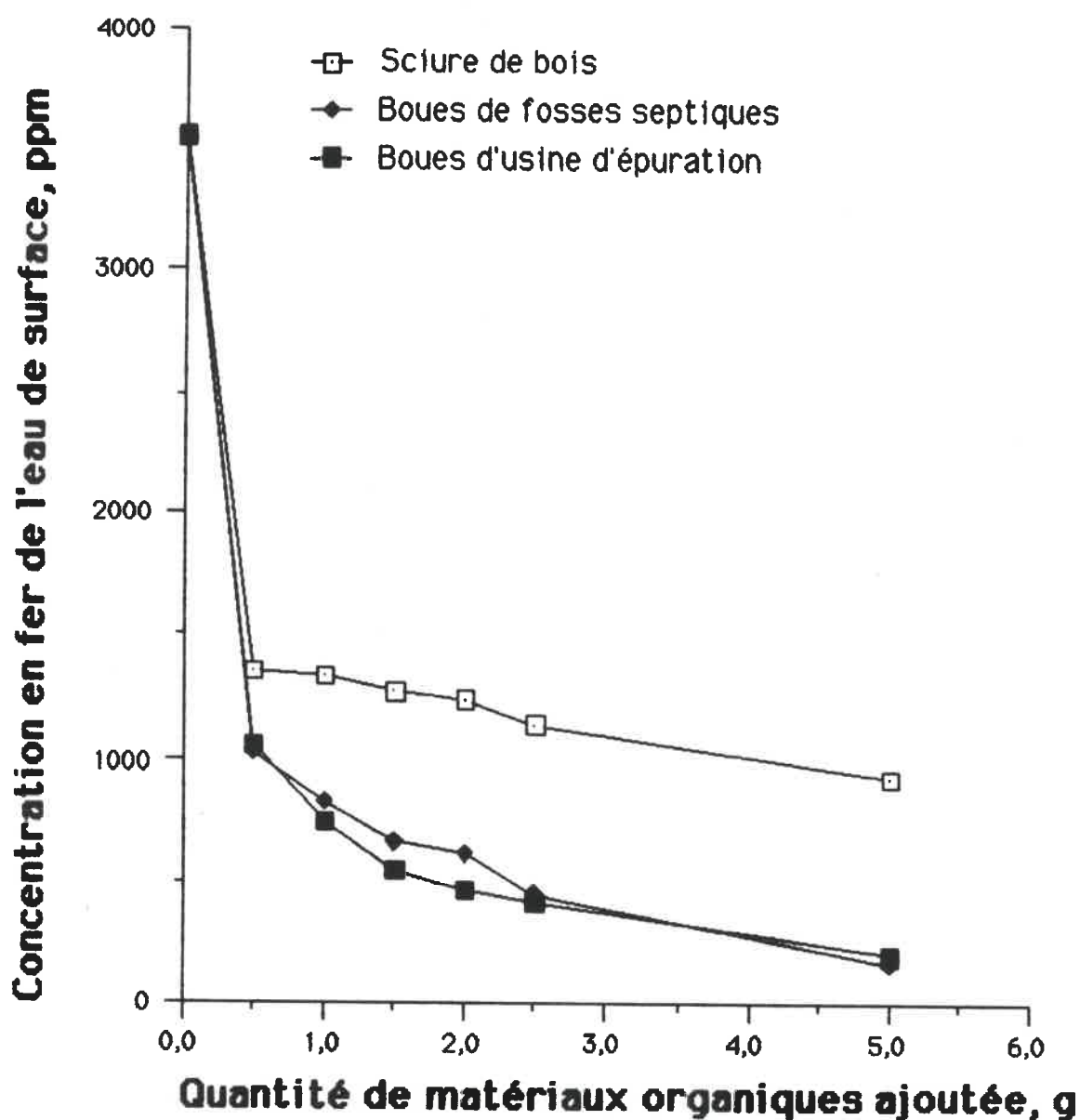


FIGURE 15

Variation de la teneur en fer d'une eau de surface s'écoulant du parc à résidus miniers East-Sullivan contenant 3560 ppm de Fe, en fonction de doses croissantes de matériaux organiques ajoutées.

TABLEAU 10. Quantité de fer extraite d'une eau de surface s'écoulant du parc à résidus miniers East-Sullivan par trois matériaux organiques

Doses de matériaux organiques ajoutées (g)	Fer sorbé (%) par les matériaux organiques		
	Sciure de bois	Boues d'usine d'épuration	Boues de fosses septiques
0,5	61,8	71,3	70,1
1,0	62,3	76,7	78,9
1,5	64,2	81,6	84,9
2,0	65,3	82,8	86,8
2,5	67,9	87,4	88,4
5,0	73,9	95,2	94,0

Remarques :

1. Le volume d'eau de surface utilisé était 20 cm³.
2. La quantité de fer sorbée est exprimée en pourcentage de fer initialement présent dans l'eau de surface (3560 ppm).

TABLEAU 11. Données de sorption du fer par différents mélanges de matériaux organiques après addition d'une eau de lixiviation provenant de résidus miniers acides et contenant 394 ppm de fer

Composition des mélanges (g)			Solution d'équilibre		Quantité de fer sorbée (%)
Sciure de bois	Boues d'usine d'épuration	Boues de fosses septiques	pH	Fe (ppm)	
6,0	0,0	---	3,23	79,0	79,9
5,0	1,0	---	3,97	57,4	85,4
4,0	2,0	---	4,30	44,0	88,8
3,0	3,0	---	4,38	25,6	93,5
2,0	4,0	---	4,55	24,4	93,8
1,0	5,0	---	4,96	13,6	96,5
0,0	6,0	---	5,02	13,5	96,6
6,0	---	0,0	3,23	79,0	79,9
5,0	---	1,0	4,04	71,6	81,8
4,0	---	2,0	4,23	63,6	83,8
3,0	---	3,0	4,59	38,0	90,3
2,0	---	4,0	4,75	27,8	92,9
1,0	---	5,0	5,00	25,6	93,5
0,0	---	6,0	5,16	22,0	94,4

Remarques :

1. Le volume d'eau de lixiviation ajouté aux différents mélanges est 50 cm³.
2. Le temps de réaction est 24 h.
3. La quantité de fer sorbée est exprimée en pourcentage de fer ajouté (394 ppm).

2.3.5 Essais de lixiviation des résidus miniers acides amendés avec des matériaux organiques

2.3.5.1 Influence comparée d'apports de BUE, de BFS et de SB sur les propriétés chimiques des effluents miniers

Le but principal de ces essais est d'évaluer la qualité (pH, conductivité électrique, métaux lourds) des effluents miniers, en fonction :

- 1) du type d'amendements organiques recouvrant les rejets miniers
- 2) du nombre et de l'intervalle des cycles de lixiviation
- 3) du pH de l'eau de lixiviation.

Les divers traitements évalués sont résumés dans le tableau 12. La colonne de lixiviation utilisée est illustrée à la figure 16. Les colonnes de lixiviation étaient en polypropylène et avaient 8 cm de diamètre et 30 cm de longueur. Les colonnes ont été soumises, de façon régulière, à un arrosage avec:

- 1) 1 L d'eau distillée
- 2) 1 L d'eau distillée ajustée à pH = 4,00.

Les dates de lixiviation sont les suivantes: 14 juin, 21 juin, 29 juin, 5 juillet, 12 juillet, 19 juillet, 26 juillet, 4 août, 12 août, 18 août, 24 août, 30 août, 7 septembre, 18 septembre, 2 décembre et 20 décembre 1988.

Les lixiviats recueillis les 12 juillet (5e cycle), 7 septembre (13e cycle) et 20 décembre (16e cycle) ont été analysés pour le pH, la conductivité électrique, les chlorures et les métaux.

Les données relatives aux variations de pH des effluents miniers , en fonction des traitements, du nombre de cycles de lixiviation et du pH de l'eau de lixiviation sont présentées aux tableaux 13 et 14. Pour un même traitement, les valeurs de pH des effluents miniers augmente substantiellement avec le nombre de cycles de lixiviation. Après 1 seul cycle de lixiviation, les valeurs de pH des eaux de percolation sont 2,15, 2,15, 2,15, 2,35, 2,20, 2,30, 2,35 et 2,25

TABLEAU 12. Description des traitements relatifs aux essais de lixiviation de résidus miniers acides recouverts avec de matériaux organiques appliqués en surface

No de traitement	Résidus miniers	Matériaux organiques
1	1,5 L	0 cm ³ (témoin)
2	1,5 L	390 cm ³ de SB appliqués en surface
3	1,5 L	780 cm ³ de SB appliqués en surface
4	1,5 L	390 cm ³ de BUE appliqués en surface
5	1,5 L	780 cm ³ de BUE appliqués en surface
6	1,5 L	390 cm ³ de BFS appliqués en surface
7	1,5 L	780 cm ³ de BFS appliqués en surface
8	1,5 L	390 cm ³ de SB et 390 cm ³ de BUE appliqués en surface
9	1,5 L	390 cm ³ de SB et 390 cm ³ de BFS appliqués en surface
10	0	1,5 L de SB

Abréviations : SB = sciure de bois
 BUE = boues d'usine d'épuration
 BFS = boues de fosses septiques

Remarque :

1. Les colonnes de lixiviation étaient en polypropylène et avaient 8 cm de diamètre et 30 cm de longueur.
2. Les colonnes ont été soumises, de façon régulière, à un arrosage durant six mois avec:
 - a) 1 L d'eau distillée, et
 - b) 1 L d'eau distillée acide (pH=4,00).



FIGURE 16

Colonne de lixiviation en polypropylène

Tableau 13. Evolution du pH d'effluents issus de résidus miniers acides recouverts avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation

Cycle de lixiviation	No. des traitements								
	1	2	3	4	6	7	8	9	10
1	2,15	2,15	2,15	2,35	2,20	2,30	2,35	2,25	7,30
2	2,50	2,60	2,60	3,50	2,40	2,70	3,90	2,70	7,40
3	2,80	3,00	3,00	3,50	2,30	2,90	4,30	2,90	7,30
4	2,70	3,30	3,20	3,80	2,40	3,10	3,80	3,10	7,00
5	2,50	3,30	3,40	3,40	2,50	2,95	3,40	3,25	7,00
6	2,20	3,25	3,35	3,30	2,35	2,85	3,15	3,05	7,40
7	2,20	3,20	3,35	3,40	2,40	2,85	3,40	3,10	7,40
8	2,50	3,55	3,90	3,70	3,00	3,30	3,65	3,60	7,10
9	2,40	3,50	3,60	3,30	2,65	2,95	3,95	3,20	7,20
10	2,40	3,65	3,70	3,30	2,90	3,10	3,95	3,30	7,15
11	2,65	3,60	3,75	3,35	2,90	3,20	4,00	3,35	7,20
12	----	----	----	----	----	----	----	----	----
13	----	----	----	----	----	----	----	----	----
14	----	----	----	----	----	----	----	----	----
15	----	----	----	----	----	----	----	----	----
16	2,70	3,85	4,50	3,95	3,10	3,50	4,80	4,00	7,35

Remarques :

1. La description des traitements est rapportée au tableau 12.
2. L'eau d'arrosage utilisée est l'eau distillée.

Tableau 14. Evolution du pH d'effluents issus de résidus miniers acides recouverts avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation acide

Cycle de lixiviation	No. des traitements								
	1	2	3	4	6	7	8	9	10
1	2,20	2,35	2,40	2,50	2,35	2,35	2,40	2,35	4,30
2	2,30	2,40	2,50	4,10	2,35	2,50	3,00	2,60	6,90
3	2,50	2,90	3,00	4,50	2,60	2,90	3,50	2,90	6,90
4	2,55	3,05	3,15	4,15	2,80	3,10	3,50	3,00	7,10
5	2,60	3,25	3,30	3,20	2,90	3,10	3,65	3,00	7,10
6	2,35	2,95	3,05	3,00	2,90	3,10	3,85	3,05	7,20
7	2,20	3,05	3,10	3,15	3,00	3,20	3,90	3,10	7,20
8	2,25	3,00	3,10	3,20	3,00	3,10	4,10	3,10	7,20
9	2,25	3,05	3,20	3,30	3,10	3,20	4,20	3,15	7,20
10	2,45	3,10	3,30	3,40	3,00	3,20	4,20	3,20	7,30
11	2,45	3,15	3,35	3,60	3,10	3,30	4,50	3,20	7,10
12	----	----	----	----	----	----	----	----	----
13	----	----	----	----	----	----	----	----	----
14	----	----	----	----	----	----	----	----	----
15	----	----	----	----	----	----	----	----	----
16	2,55	3,35	3,40	3,45	3,00	3,20	3,90	3,20	7,20

Remarques:

1. La description des traitements est rapportée au tableau 12.
2. L'eau d'arrosage est l'eau acide (pH = 4,00).

pour les traitements 1 à 9 avec eau distillée (tableau 12), respectivement. Par contre, après 16 cycles de lixiviation (6 mois), les valeurs de pH des eaux de percolation sont 2,70, 3,85, 4,50, 3,95, 3,10, 3,50, 4,80 et 4,00 pour les traitements 1 à 9 (eau distillée), respectivement.

D'autre part, les valeurs de pH des effluents provenant des rejets miniers recouverts de matériaux organiques sont plus élevées que celles des effluents issus de rejets miniers non recouverts avec les amendements organiques (témoin). De plus, les valeurs de pH des effluents provenant de rejets miniers arrosés avec de l'eau distillée sont légèrement supérieures à celles provenant des rejets miniers arrosés avec de l'eau acide. Il s'ensuit que l'épandage d'amendements organiques (BUE, BFS ou SB) sur les sols miniers acides contribue à augmenter légèrement le pH de leur effluent. Les résultats relatives aux variations de la conductivité électrique des effluents miniers sont présentés dans les tableaux 15 et 16. Nous notons que pour un même traitement, les valeurs de C.E.(mmhos/cm) des effluents diminuent avec le nombre de cycles de lixiviation. Ces résultats indiquent que le taux de sels dissous dans les effluents diminue avec le temps. Nous avons également déterminé le contenu en métaux lourds et autres éléments des effluents après le 5e, le 13e et le 16e cycle de lixiviation. Les résultats sont présentés dans les tableaux 17 et 18. Dans l'ensemble, les teneurs en métaux lourds diminuent progressivement jusqu'au 13e cycle de lixiviation puis augmentent légèrement au 16e cycle. Les concentrations en Al, Cu, Mn, Zn, Ni et Cd sont plus élevées au 16e qu'au 5e cycle. Seuls les métaux Fe, Pb et Cr semblent diminuer.

Il est à noter qu'après le 13e cycle de lixiviation les colonnes n'ont pas été arrosées pendant environ 2 mois puis après elles ont été soumises à 3 cycles de lixiviation. On peut supposer qu'il y a eu une solubilisation partielle des métaux provenant des boues ou des résidus miniers.

Tableau 15. Conductivité électrique d'effluents issus de résidus miniers acides recouverts avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation

Cycle de lixiviation	No. des traitements								
	1	2	3	4	6	7	8	9	10
1	7,80	10,00	10,20	12,00	7,80	8,20	9,80	8,00	0,40
2	3,00	2,50	3,10	4,10	3,80	3,00	5,50	3,00	1,00
3	2,30	2,00	2,10	2,80	3,40	2,15	3,70	2,00	0,50
4	1,90	1,25	1,20	1,60	2,60	1,68	1,95	1,35	0,45
5	2,05	0,65	0,65	1,10	2,42	1,12	1,00	0,65	0,65
6	3,00	0,65	0,60	1,25	2,35	0,95	1,15	0,55	0,55
7	2,75	0,70	0,60	0,90	2,40	0,80	0,85	0,62	0,60
8	3,60	0,80	0,65	0,90	3,00	1,00	0,90	0,65	0,38
9	2,35	0,68	0,50	0,70	2,65	0,80	0,65	0,52	0,28
10	2,05	0,68	0,40	0,60	0,80	0,60	0,40	0,48	0,30
11	1,28	0,65	0,40	0,50	0,75	0,50	0,30	0,40	0,11
12	----	----	----	----	----	----	----	----	----
13	----	----	----	----	----	----	----	----	----
14	----	----	----	----	----	----	----	----	----
15	----	----	----	----	----	----	----	----	----
16	1,35	0,55	0,58	0,98	1,30	1,10	0,50	0,60	0,10

Remarques:

1. La description des traitements est rapportée au tableau 12.
2. L'eau d'arrosage utilisée est l'eau distillée

Tableau 16. Conductivité électrique d'effluents issus de résidus miniers acides recouverts avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation acide

Cycle de lixiviation	No. des traitements								
	1	2	3	4	6	7	8	9	10
1	7,80	8,10	7,80	11,00	8,00	8,00	8,80	8,50	0,60
2	3,50	3,50	3,50	4,20	4,00	3,10	5,10	3,10	0,50
3	2,55	2,05	2,00	3,45	3,70	2,90	3,95	2,18	0,60
4	1,47	1,00	0,95	1,75	3,20	2,15	1,52	1,60	0,55
5	2,05	0,62	0,70	1,10	2,80	1,55	0,60	1,00	1,00
6	2,30	0,70	0,75	1,10	2,15	1,15	0,50	0,80	1,30
7	2,50	0,70	1,30	0,92	1,60	0,82	0,45	0,80	0,20
8	3,00	0,70	4,50	1,40	1,70	0,90	0,52	0,85	1,30
9	3,10	0,90	4,55	1,20	1,30	0,95	0,45	0,75	1,00
10	2,70	0,90	3,00	0,45	0,90	0,80	0,38	0,58	0,85
11	1,95	0,95	2,70	0,38	0,78	0,75	0,30	0,50	----
12	----	----	----	----	----	----	----	----	----
13	----	----	----	----	----	----	----	----	----
14	----	----	----	----	----	----	----	----	----
15	----	----	----	----	----	----	----	----	----
16	2,30	0,60	0,70	1,00	1,60	1,35a	0,60	0,70	0,20

Remarques:

1. La description des traitements est rapportée au tableau 12.
2. L'eau d'arrosage est l'eau acide (pH = 4,00).

TABLEAU 17. Les teneurs (ppm) en métaux des effluents miniers recueillis après plusieurs cycles de lixiviation avec de l'eau distillée

No de traitement	5e cycle					13e cycle					16e cycle				
	Volume d'effluent recueilli (L)	Fe	Al	Cu	Mn	Volume d'effluent recueilli (L)	Fe	Al	Cu	Mn	Volume d'effluent recueilli (mL)	Fe	Al	Cu	Mn
1	1,01	376,0	52,0	3,23	1,50	1,01	32,24	16,0	0,88	0,39	770	19,48	33,0	8,74	2,56
2	1,01	13,0	9,0	0,40	0,62	0,97	7,98	9,0	0,28	0,33	790	0,49	9,0	4,16	1,06
3	1,01	4,3	10,0	0,90	0,92	1,00	6,39	9,0	0,15	0,21	790	2,60	15,8	4,71	1,17
4	0,99	4,5	8,0	0,33	0,40	0,99	6,42	8,0	0,28	0,12	800	1,20	23,0	4,27	2,30
5	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
6	1,04	167,0	41,0	2,46	0,90	1,01	20,43	12,0	0,75	0,29	790	6,92	7,0	4,27	1,42
7	1,01	28,8	22,0	2,12	0,75	0,98	10,36	11,0	0,54	0,24	830	9,40	25,5	3,45	1,44
8	1,00	35,8	8,0	0,11	0,28	0,99	8,40	7,0	0,15	0,14	780	2,62	11,0	1,13	1,32
9	1,02	9,5	11,0	0,88	0,58	0,97	3,57	8,0	0,26	0,20	770	2,81	9,0	3,65	0,70
10	0,97	3,6	2,0	0,10	0,23	1,01	0,30	2,0	0,07	0,06	850	0,50	4,0	2,78	0,05

Remarques:

1. La description des traitements est rapportée au tableau 12.
2. Cinquième cycle de lixiviation: a) Les teneurs de Zn, Ni et Cd sont inférieures à 0,20 ppm tandis que les teneurs de Pb et Cr sont inférieures à 1,00 ppm.
b) La concentration des chlorures est inférieure à 10 ppm.
c) Les teneurs de Hg, As et CN totaux sont inférieures à la limite de détection.
3. Treizième et seizième cycle : Les teneurs de Zn, Ni, Cd, Pb et Cr sont inférieures à 0,50 ppm.
de lixiviation

TABLEAU 18. Les teneurs (ppm) en métaux des effluents miniers recueillis après plusieurs cycles de lixiviation avec de l'eau distillée acide (pH= 4,00)

No de traitement	5e cycle					13e cycle					16e cycle				
	Volume d'effluent recueilli (L)	Fe	Al	Cu	Mn	Volume d'effluent recueilli (L)	Fe	Al	Cu	Mn	Volume d'effluent recueilli (mL)	Fe	Al	Cu	Mn
1	1,03	620,6	62,0	3,15	1,76	1,02	36,12	45,0	2,21	0,40	745	95,42	54,0	11,04	2,92
2	0,99	27,5	16,0	1,12	0,60	0,99	14,60	12,0	1,02	0,50	820	3,08	13,0	1,42	0,23
3	0,97	27,8	16,0	0,96	0,38	1,01	14,90	15,2	1,30	0,24	845	4,82	28,0	5,69	1,55
4	1,02	86,8	8,0	0,26	0,72	0,98	12,47	8,0	1,00	0,16	790	5,94	30,0	8,92	2,31
5	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
6	1,01	390,0	410,0	1,89	1,09	1,02	22,35	29,0	0,90	1,05	720	27,32	8,0	3,70	1,45
7	1,04	120,5	180,0	1,47	0,59	1,01	11,12	33,2	0,90	0,34	740	13,11	36,0	5,46	1,50
8	1,03	74,6	7,0	0,19	0,24	0,99	10,51	6,5	0,28	0,15	830	4,52	48,0	1,16	2,04
9	1,02	17,0	13,0	1,06	0,80	0,98	10,92	9,1	0,45	0,27	760	3,67	14,0	3,68	0,99
10	1,05	6,1	2,0	0,15	0,60	1,01	0,40	1,0	0,12	0,10	850	0,15	4,0	----	0,07

Remarques:

- La description des traitements est rapportée au tableau 12.
- Cinquième cycle de lixiviation:
 - Les teneurs de Zn, Ni et Cd sont inférieures à 0,20 ppm tandis que les teneurs de Pb et Cr sont inférieures à 1,00 ppm.
 - La concentration des chlorures est inférieure à 10 ppm.
 - Les teneurs
- Treizième et seizième cycle de lixiviation: Les teneurs de Zn, Ni, Cd, Pb et Cr sont inférieures à 0,50 ppm.

D'autre part, les effluents issus de rejets miniers recouverts avec les amendements organiques contiennent des niveaux moins élevés de métaux que ceux issus de rejets miniers non recouverts (témoin). Toutefois, après 16 cycles de lixiviation, les concentrations en métaux (tableaux 17 et 18) dépassent les critères établis pour la protection de la vie aquatique ou de l'environnement minier (tableau 19). Par ailleurs, seul le Zn rencontre la norme établie pour les effluents miniers (directive 019 du MENVIQ, tableau 19).

2.3.5.2 Effet du mode d'incorporation des amendements organiques sur la qualité des effluents miniers

La description des traitements évalués est rapportée au tableau 20. Les colonnes de lixiviation utilisées avaient 10 cm de diamètre et 30 cm de longueur. Les colonnes ont été soumises, de façon régulière, durant un mois, à un arrosage avec 1 L d'eau distillée. Les effluents miniers obtenus après le 1er et le 4e cycle de lixiviation ont été analysés pour le Fe, le Zn, le Cu, le Mn et l'Al.

Les figures 17, 18, 19, 20 et 21 montrent les variations des concentrations en métaux lourds (Fe, Zn, Cu, Mn et Al) des effluents, en fonction des traitements, pour 2 cycles de lixiviation. D'une façon générale, l'incorporation de matériaux organiques dans les rejets miniers contribue à diminuer le transport des métaux lourds dans les eaux de percolation. Au début, les eaux de percolation contiennent une forte concentration de métaux lourds, surtout le fer. Ceci est dû au fait que l'eau de percolation s'acidifie au contact avec les rejets miniers et transporte les métaux dissous. Les traitements T3 et T9 (tableau 20) semblent être ceux qui ont le plus diminué la libération des métaux lourds dans les eaux de percolation (figures 17 à 21).

D'autre part, tous les effluents issus de rejets miniers amendés avec les boues contiennent des niveaux de métaux lourds moins élevés que ceux issus de rejets miniers non amendés (témoin). Ces résultats démontrent l'effet bénéfique de l'incorporation des boues aux résidus

TABLEAU 19. Critères de qualité des eaux

Paramètre	Concentrations maximales (mg/L) en éléments de l'eau acceptables pour:		Normes pour effluents de résidus miniers
	la vie aquatique ⁽¹⁾	le plein usage d'un plan d'eau ⁽²⁾	
Aluminium	0,10	0,005 (pH < 6,5)	----
Arsenic	0,05	0,0022	0,50
Cadmium	0,0002	0,0002 - 0,0018	----
Chlorures	----	25	----
Chrome	0,04	0,002	----
Cuivre	0,05	0,002 - 0,004	0,30 *
Fer	0,3	0,05	3,00
Manganèse	0,02	0,01	----
Nickel	0,025	0,025 - 0,150	0,50 *
Plomb	0,03	0,001 - 0,007	0,20 *
Zinc	0,03	0,03	0,50 *

Remarques:

1. Mc Neely et coll. (1980).

2. Directive 019 du MENVIQ (1988).

3. "*" L'addition des concentrations individuelles mesurées pour le Cu, le Ni, le Pb et le Zn ne doit pas dépasser une valeur de 1,0 mg/L.

TABLEAU 20. Description des traitements relatifs aux doses d'application et au mode d'incorporation des matériaux organiques

Types de matériaux organiques	Identification des traitements	Doses d'application et mode d'incorporation des matériaux organiques
Aucun (témoin)	T0	0 cm ³
Boues d'usine d'épuration (BUE)	T1	432 cm ³ de BUE ajoutés en surface
	T2	432 cm ³ de BUE incorporés sur une profondeur de 5 cm
	T3	865 cm ³ de BUE incorporés sur une profondeur de 10 cm
Boues d'usine d'épuration (BUE) et sciure de bois (SB)	T4	une couche (432 cm ³) de BUE suivie d'une autre couche (423 cm ³) de SB, appliquées en surface
	T5	un mélange composé de 432 cm ³ de BUE et de 432 cm ³ de SB, appliqué en surface
	T6	un mélange composé de 432 cm ³ de BUE + 432 cm ³ de SB, incorporé sur une profondeur de 10 cm
Boues de fosses septiques (BFS)	T7	432 cm ³ de BFS ajoutés en surface
	T8	432 cm ³ de BFS incorporés sur une profondeur de 5 cm
	T9	865 cm ³ incorporés sur une profondeur de 10 cm
Boues de fosses septiques (BFS) et sciure de bois (SB)	T10	une couche (432 cm ³) de BFS suivie d'une autre couche (432 cm ³) de SB appliquées en surface
	T11	un mélange composé de 432 cm ³ de BFS + 432 cm ³ de SB, appliqué en surface
	T12	un mélange composé de 432 cm ³ de BFS + 432 cm ³ de SB, incorporé sur une profondeur de 10 cm

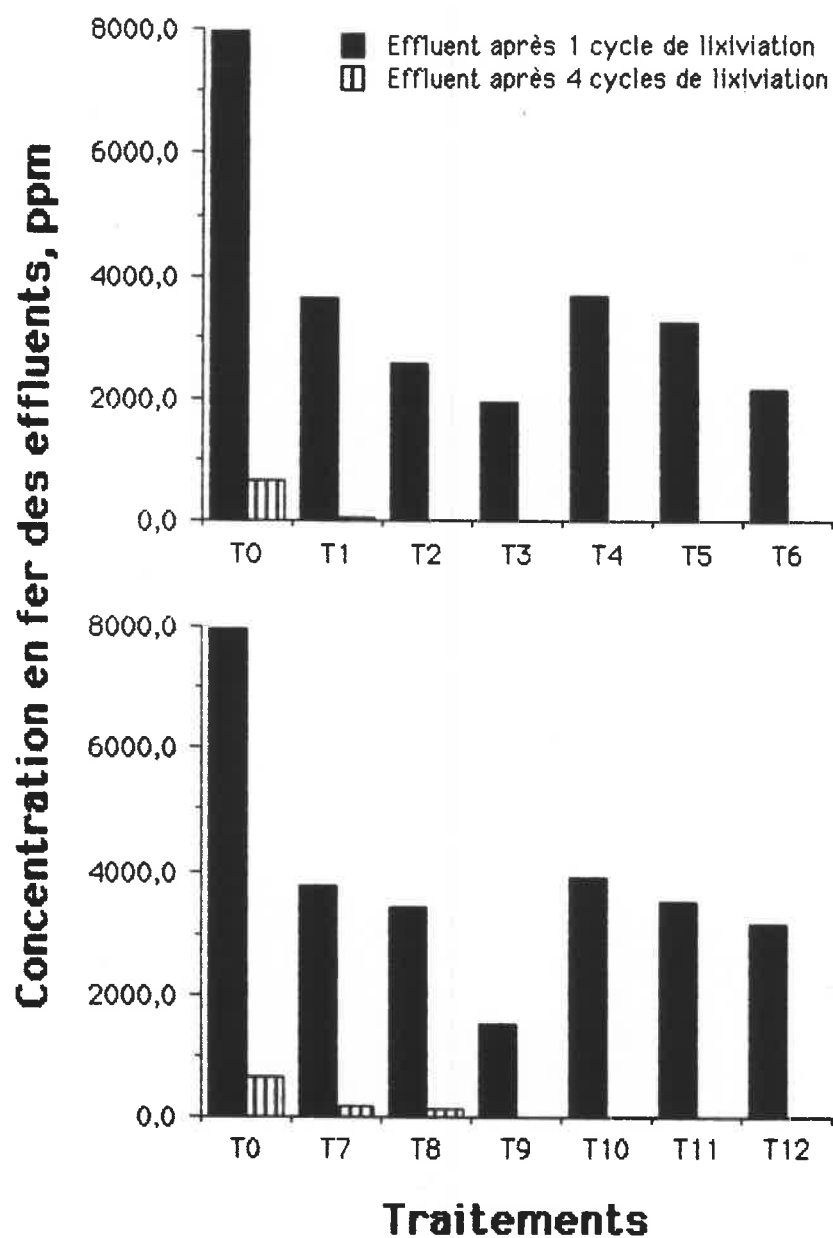


FIGURE 17

Variation de la concentration en fer des effluents provenant de résidus miniers amendés avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation

Remarque : La description des traitements T0 à T12 est rapportée au tableau 20.

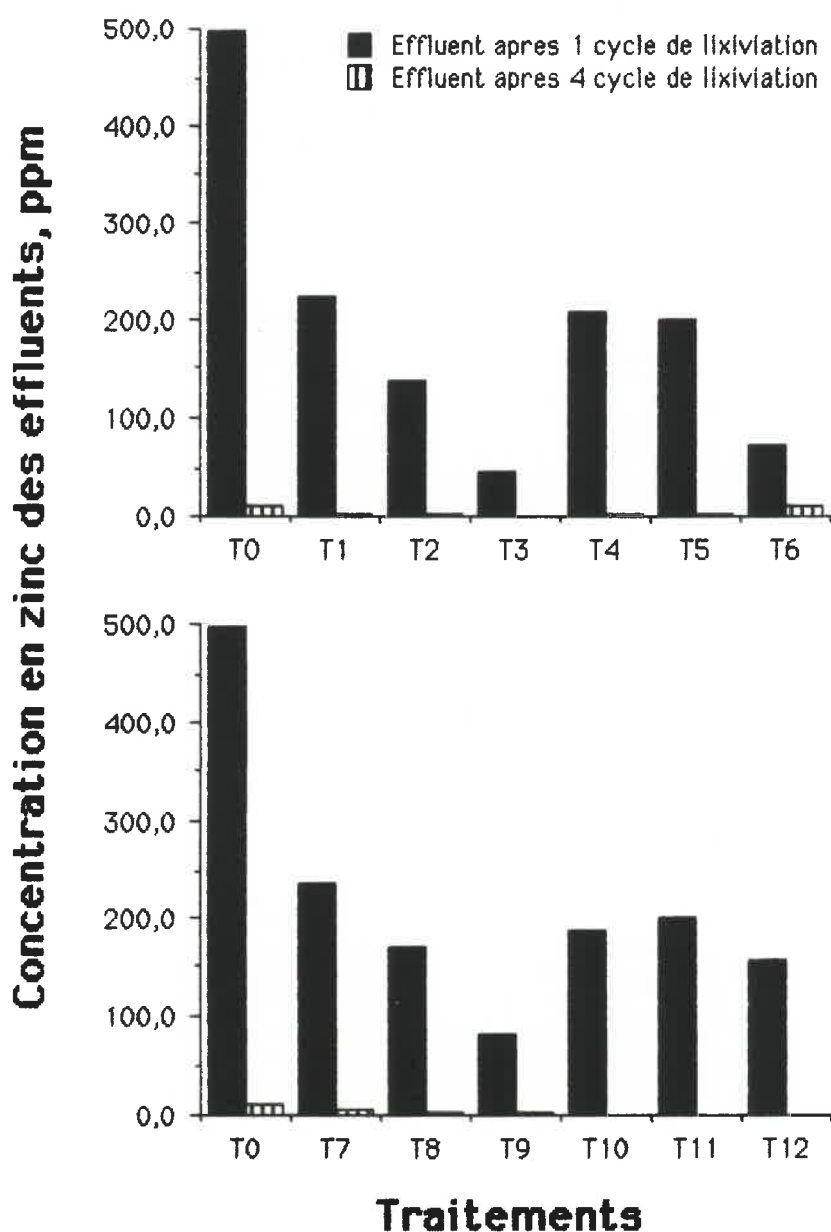


FIGURE 18

Variation de la concentration en zinc des effluents provenant de résidus miniers amendés avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation

Remarque : La description des traitements T0 à T12 est rapportée au tableau 20.

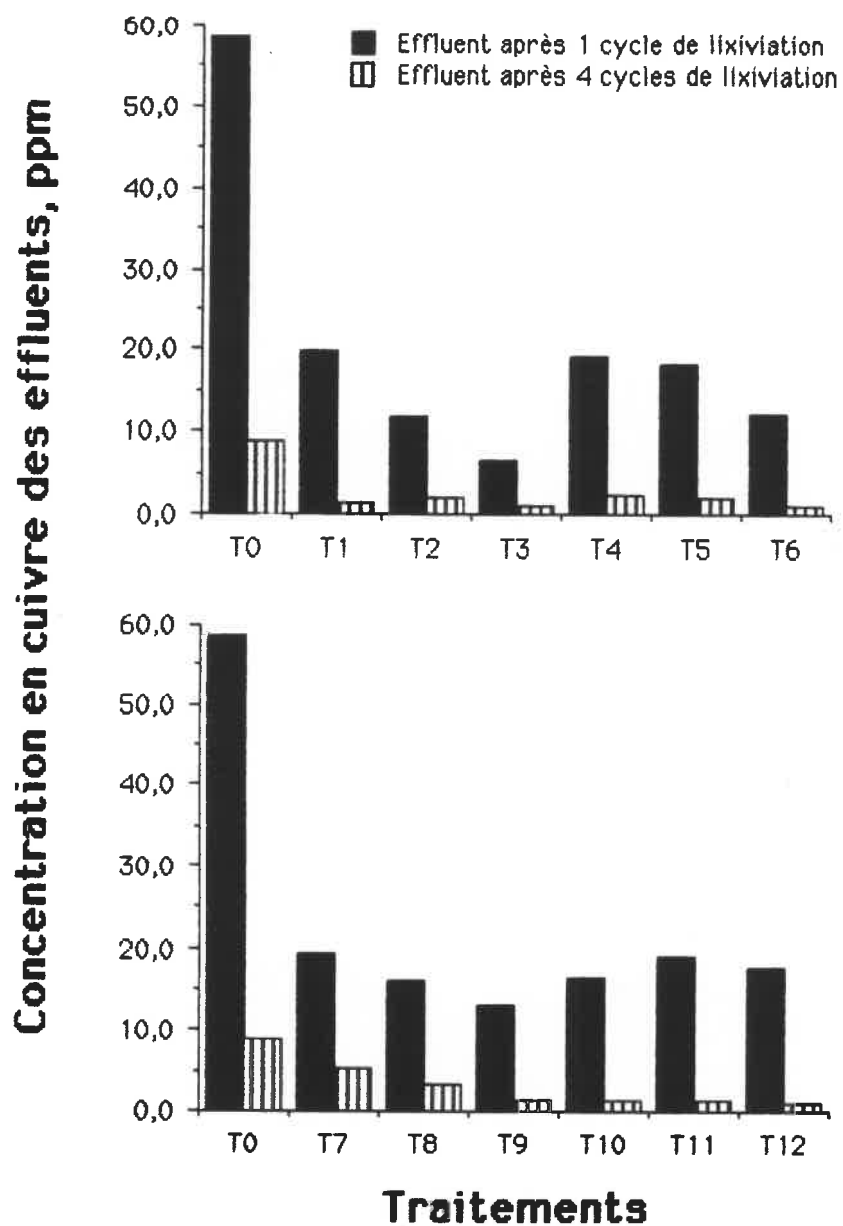


FIGURE 19

Variation de la concentration en cuivre des effluents provenant de résidus miniers amendés avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation

Remarque : La description des traitements T0 à T12 est rapportée au tableau 20.

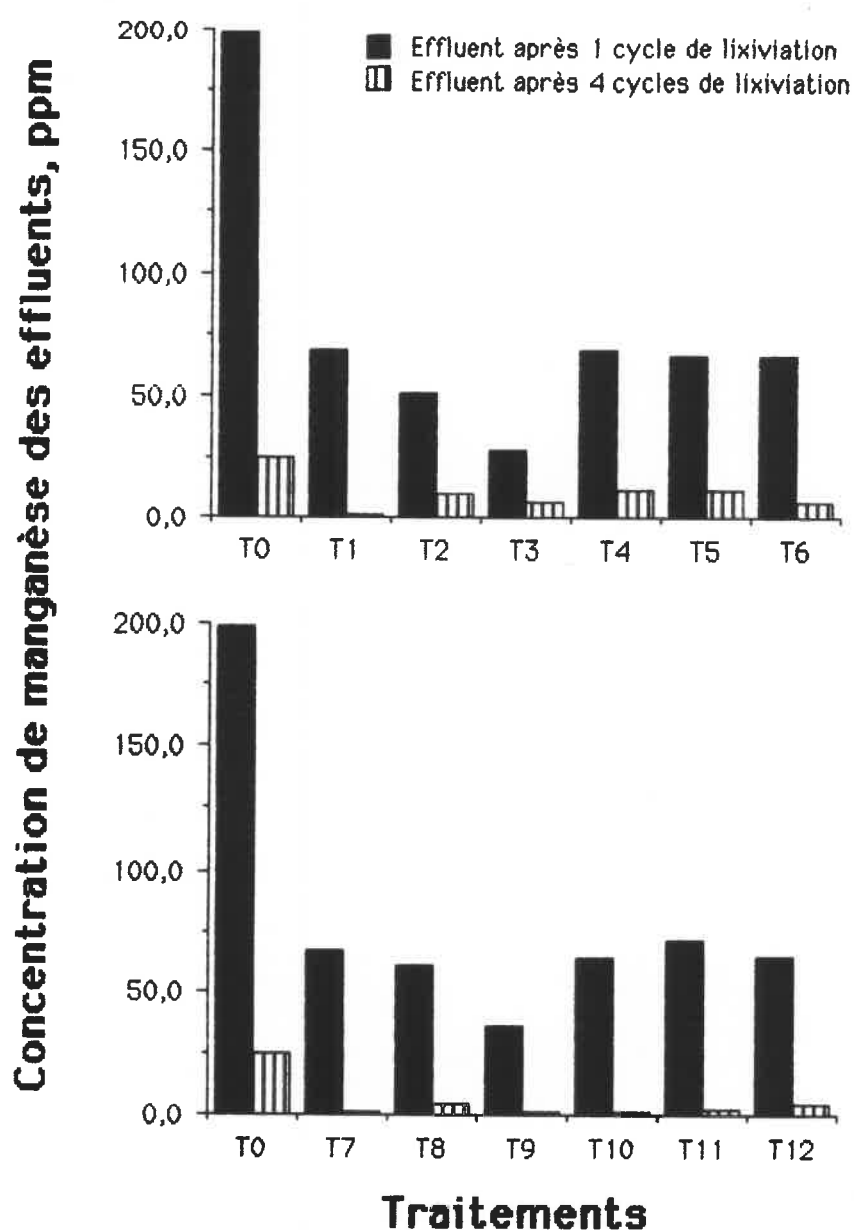


FIGURE 20

Variation de la concentration en manganèse des effluents provenant de résidus miniers amendés avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation

Remarque : La description des traitements T0 à T12 est rapportée au tableau 20.

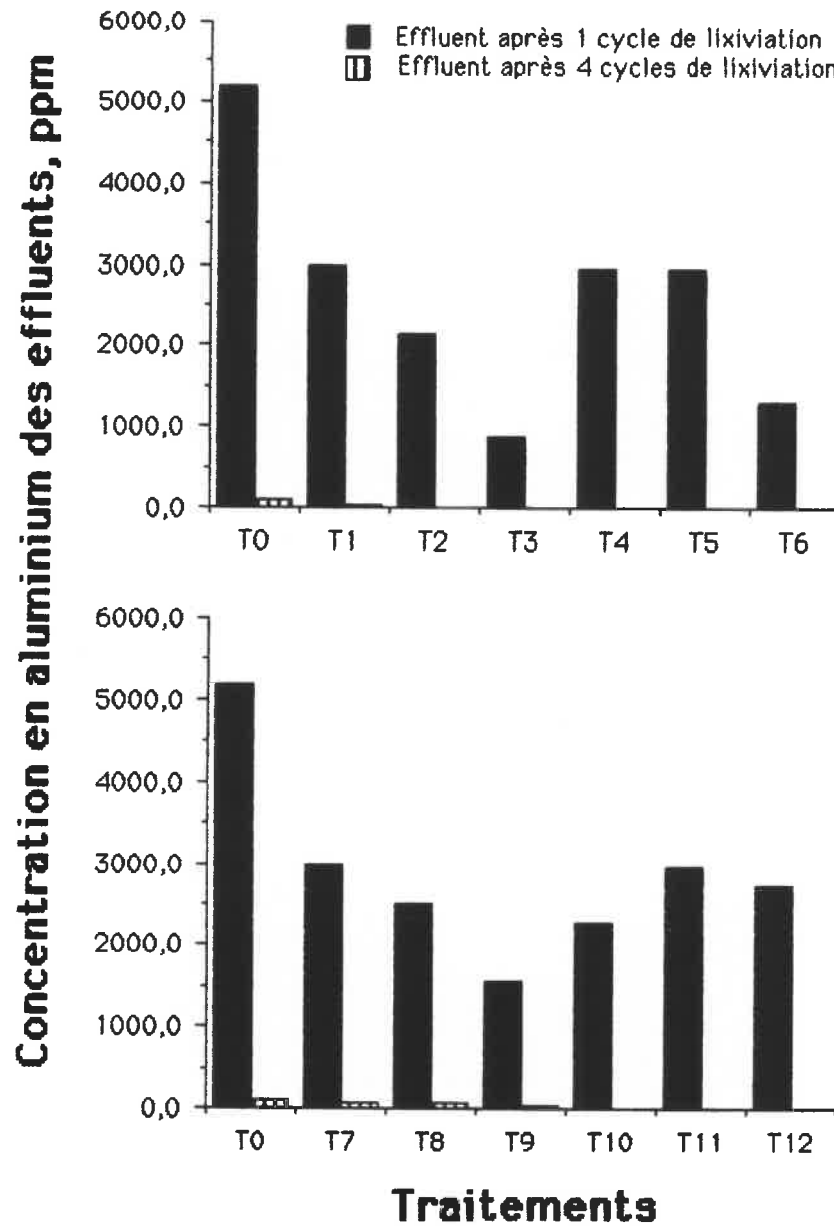


FIGURE 21

Variation de la concentration en aluminium des effluents provenant de résidus miniers amendés avec de matériaux organiques, en fonction du cycle de lixiviation

Remarque : La description des traitements T0 à T12 est rapportée au tableau 20.

miniers sur la diminution de libération de métaux lourds dans les effluents. Toutefois, il importe de souligner le fait que les concentrations des métaux dans les effluents issus de rejets miniers amendés avec les boues ne rencontrent pas les critères établis par le MENVIQ (1984) pour la qualité des effluents miniers.

2.4 CONCLUSION DE SECTION

Cette série d'expériences nous a permis de faire ressortir six points importants concernant les impacts environnementaux de matériaux organiques (BUE, BFS et SB) sur la qualité des effluents issus de résidus miniers sulfureux du site East-Sullivan:

- 1) L'eau fortement acide solubilise les métaux initialement présents dans les résidus miniers sulfureux, les sédiments de la rivière Bourlamaque et les boues (BUE et BFS).
- 2) La capacité des boues (BUE et BFS) à sorber le fer dissous est nettement supérieure à celle de la sciure de bois (SB).
- 3) L'incorporation en profondeur aux rejets miniers de doses élevées de boues contribue à diminuer l'acidité et la conductivité électrique des effluents miniers de même que le taux de métaux dissous.
- 4) L'application à la surface des rejets miniers acides de SB (pH=7,58) de BUE et de BFS ne contribue pas de façon marquée à produire d'effluents rencontrant les normes de qualité pour les effluents miniers (directive 019 du MENVIQ).
- 5) Dans les conditions expérimentales, l'incorporation des boues seules ou avec de la sciure de bois dans le sol minier n'apporte pas une concentration additionnelle significative de métaux dans les eaux de percolation.
- 6) Lorsque le sol minier mélangé avec les boues ou la sciure de bois s'acidifie avec le temps, il y a un risque potentiel de contamination des eaux par les métaux des rejets miniers et des amendements organiques.

TROISIEME PARTIE

ESSAIS DE MISE EN VEGETATION DE RESIDUS MINIERES ACIDES AMENDES AVEC DES MATERIAUX ORGANIQUES

3.1 INTRODUCTION

Les résidus miniers sablonneux confinés dans le parc avoisinant les installations de l'ancienne mine East-Sullivan génèrent certains problèmes environnementaux tel le soulèvement de poussières et leur entraînement par l'eau et/ou par le vent à l'extérieur de la zone de confinement. Or parmi les moyens susceptibles d'empêcher l'érosion de ces résidus, il y a l'implantation sur les sites d'élimination des déchets de mine d'une végétation permanente. En plus d'améliorer l'apparence du milieu, l'établissement d'un couvert végétal dense, à long terme, pourrait contribuer à restreindre la pénétration, dans le résidu minier, de l'eau et de l'oxygène ; ces deux constituants étant directement impliqués dans les réactions chimiques d'acidification.

La mise en végétation des résidus miniers hautement sulfureux est une opération complexe due à leur faible potentiel de fertilité. Les rejets miniers provenant du parc à résidus miniers East-Sullivan sont très pauvres en matière organique, en azote et en potassium et sont très acides. On peut aussi noter un contenu en fer élevé. Le succès de l'établissement d'une végétation sur ces résidus repose sur plusieurs facteurs tels l'ajustement du pH, le degré de disponibilité des éléments nutritifs (surtout l'azote) et la sélection de plantes rustiques adaptées aux conditions adverses du milieu. Parmi les procédures suggérées de mise en végétation des résidus miniers acides, il y a :

- (i) l'application d'amendements calcaires,
- (ii) l'application de fertilisants,
- (iii) le recouvrement des résidus miniers par une couche de sol ou de compost à base de résidus forestiers et de boues, et
- (iv) l'utilisation de plantes adaptées au milieu de croissance.

Les objectifs de cette troisième partie du travail consistent donc à :

1. Déterminer l'effet de l'application aux résidus miniers acides de boues d'usine d'épuration et de boues de fosses septiques conjointement avec la sciure de bois sur la croissance des plantes agronomiques.
2. Déterminer l'effet du mode d'application des amendements organiques sur la teneur en métaux lourds des effluents issus de résidus miniers cultivés ou non avec des plantes agronomiques.

3.2 ESSAIS EXPERIMENTAUX EN SERRES

3.2.1 Matériel

3.2.1.1 Résidus miniers

Les résidus miniers utilisés dans la présente étude proviennent de douze sites d'échantillonnage (figure 6) couvrant l'ensemble du parc à résidus miniers East-Sullivan. Ces échantillons ont été intimement mélangés puis homogénéisés pour en former un seul échantillon (échantillon composite). Les principales caractéristiques chimiques des résidus miniers apparaissent au tableau 4.

3.2.2.2 Amendements organiques

Les divers amendements organiques utilisés dans la présente étude sont ceux de la section 1.2. La composition chimique des trois amendements organiques (BUE, BFS et SB) apparaît au tableau 6.

3.2.2.3 Plantes agronomiques

Quatre plantes fourragères ont été sélectionnées pour être implantées dans les résidus miniers acides; ce sont la fétuque rouge traçante, la fléole des prés cv Climax, le lotier corniculé cv Léo et le maïs ensilage cv Pioneer.

(i) La fétuque rouge traçante (Festuca rubra L.)

La fétuque rouge traçante est une espèce vivace à feuilles fines, dotée d'un système racinaire fibreux très étendu. Grâce à ces racines traçantes, elle ne produit pas un gazon clairsemé à la manière des fétuques scabres, mais elle est moins envahissante que les graminacées fortement traçantes comme le brome.

Le gazon dense de la fétuque résiste au piétinement intensif et tend à pousser en touffes. Elle fait presque toujours partie des mélanges à gazon et sert souvent à regarnir les cours de fermes, chaussées, terrains de jeu et bordures de routes. Elle convient tout particulièrement à l'engazonnement des terrains à sol remanié, près des emplacements industriels.

La fétuque rouge traçante pousse bien sur une grande variété de sols et préfère les régions humides. Elle prospère sur les bons sols, mais comme les autres sortes de fétuques, elle réussit aussi sur les sols plutôt pauvres en éléments nutritifs. Elle croît mieux que la fléole des prés sur les sols pauvres et n'exige pas autant d'humidité que cette dernière. Elle est plus tolérante aux sols acides (environ pH=4,5) que la fléole des prés ou le maïs.

Cette plante à gazon dense est très utile pour la mise en valeur des sols. Sa croissance débute tôt au printemps, ralentit à la mi-été, puis reprend avec vigueur de la fin de l'été jusqu'au gel de l'automne.

(ii) La fléole des prés (Phleum pratense L.)

La fléole des prés, appelée mil en langage populaire, est une espèce vivace qui s'adapte bien aux climats frais et humides. Cependant, en raison de son système racinaire peu abondant et superficiel, la fléole est sensible à la sécheresse. La fléole s'établit facilement dans les sols. On peut l'ensemencer tôt au printemps ou à la fin de l'été.

(iii) Le lotier corniculé (Lotus corniculatus)

Le lotier corniculé est une légumineuse rustique qui présente le plus d'intérêt pour les conditions adverses du milieu. Il se comporte mieux que les autres légumineuses en sol acide et appauvri. Sa tolérance à l'acidité est bonne (pH de 5,5 à 6,5). Il démarre tard au printemps et repousse lentement après la coupe. La vitesse d'établissement du lotier est très lente. Le lotier peut fixer l'azote de l'air par le biais des bactéries des nodosités ce qui permet une économie importante d'engrais azotés, même si la plante peut aussi assimiler l'azote apporté par les engrais. L'inoculation de la semence avec une souche

spécifique et efficace de *Rhizobium* favorise un meilleur établissement.

(iv) Le maïs (*Zea mays* L.)

Le maïs est une plante annuelle à très grand développement végétatif: la plante peut atteindre de 1 m à 4 m de hauteur (généralement de 1,5 m à 2 m). Le maïs est une plante très exigeante en eau et en chaleur. Il peut croître dans les types de sols profonds. Le maïs semble préférer les sols riches en éléments nutritifs, à pH de tendance légèrement acide (6,5 à 5,5). De plus, le maïs tolère mal le mauvais drainage.

3.2.2 Essais de fertilisation des résidus miniers amendés avec des matériaux organiques

3.2.2.1 Résidus miniers recevant des boues de fosses septiques et de sciure de bois

L'échantillon composite de résidus miniers acides (section 3.2.1.1) a été séché à l'air avant d'être mis dans des pots de plastique de 155 mm de diamètre à raison de 1,5 kg/pot.

Le dispositif expérimental pour chaque type de cultures comprenait 12 traitements répétés 2 fois pour un total de 24 pots par culture (3 doses de boues de fosses septiques x 4 doses de sciure de bois x 2 répétitions). Le tableau 21 résume les différents traitements.

Tous les milieux de croissance ont reçu, des quantités de chaux (carbonate de calcium, qualité analytique) et de fertilisant commercial (17-17-17) correspondant à 4,77 t/ha et 795 kg/ha, respectivement. La quantité de chaux était très inférieure à celle utilisée par plusieurs chercheurs (Paquet, 1984; Cescas, 1987) dans des études semblables.

Le but de l'ajout d'une quantité peu élevée de chaux est d'apporter du calcium, élément majeur, pour la croissance normale des plantes.

Il est bien connu que le calcium " est essentiel à la formation de la cellule végétale, agit comme un ciment pour lier ensemble les différentes couches de la cellule, neutralise les acides organiques de la sève des plantes qui pourraient devenir nocives, aide les légumineuses à fixer l'azote de l'air, en favorisant la croissance des bacté-

TABLEAU 21. Doses de boues de fosses septiques et de sciure de bois utilisées lors des essais cultureux en serre

No de traitement	Matériaux organiques ajoutés (g/pot)	
	Sciure de bois (S.B.)	Boues de fosses septiques (B.F.S.)
1	0	0
2	75	0
3	150	0
4	300	0
5	0	75
6	75	75
7	150	75
8	300	75
9	0	150
10	75	150
11	150	150
12	300	150

ries " (Scott, 1968). La chaux améliore également les propriétés chimiques et physiques du sol. Dans une étude sur l'utilisation des boues comme amendements organiques des résidus miniers acides aux Etats-Unis, Pietz et coll. (1989) ont trouvé que le traitement boues plus chaux était plus efficace que les traitements boues ou chaux seuls, à réduire l'acidité totale des rejets miniers. Par ailleurs, la quantité de fertilisant utilisé se rapproche de celle utilisée par d'autres chercheurs (Joost et coll., 1983) dans des études semblables (1100 kg/ha d'un fertilisant de formule 13-13-13 plus boues d'égout plus chaux).

Une semaine après l'addition de matériaux organiques, de chaux et d'engrais, chaque pot a reçu plusieurs graines de fléole des prés ou de fétuque rouge. La période de croissance (environ 19 semaines) a débuté le 18 juillet 1988 et la récolte a eu lieu le 25 novembre 1988. Les répétitions ont été réparties en blocs aléatoires et les traitements distribués au hasard sur des tables dans la serre. La température dans la serre variait de 22 à 25°C, sous un éclairage aux tubes fluorescents de 16 h/jour.

Les parties aériennes des plants ont été récoltées en coupant à 1 cm environ au-dessus du sol; elles ont été séchées à 70°C pendant 72 h (Jones et Steyn, 1973) et la quantité de matière sèche a été obtenue par pesée. Ceci donnait le rendement en matière sèche lequel est l'indice de la croissance des végétaux. Le matériel végétal séché à 70°C a été broyé à 1 mm et le produit broyé fut soumis à la digestion humide en utilisant les acides nitrique et perchlorique concentrés (Isaac et Kerber, 1971). Les métaux lourds (Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Mn, Pb et Zn) ont été dosés dans les extraits par spectrométrie d'absorption atomique. Quelques caractéristiques chimiques des sols miniers après la récolte furent également déterminées. Les résultats sont présentés dans les tableaux 1A et 2A, en Annexe.

La figure 22 montre le développement de la fétuque rouge, en fonction de quelques traitements. D'une façon générale, les différentes espèces végétales se sont bien développées dans les milieux de croissance surtout ceux ayant reçu les amendements organiques. Toutefois,

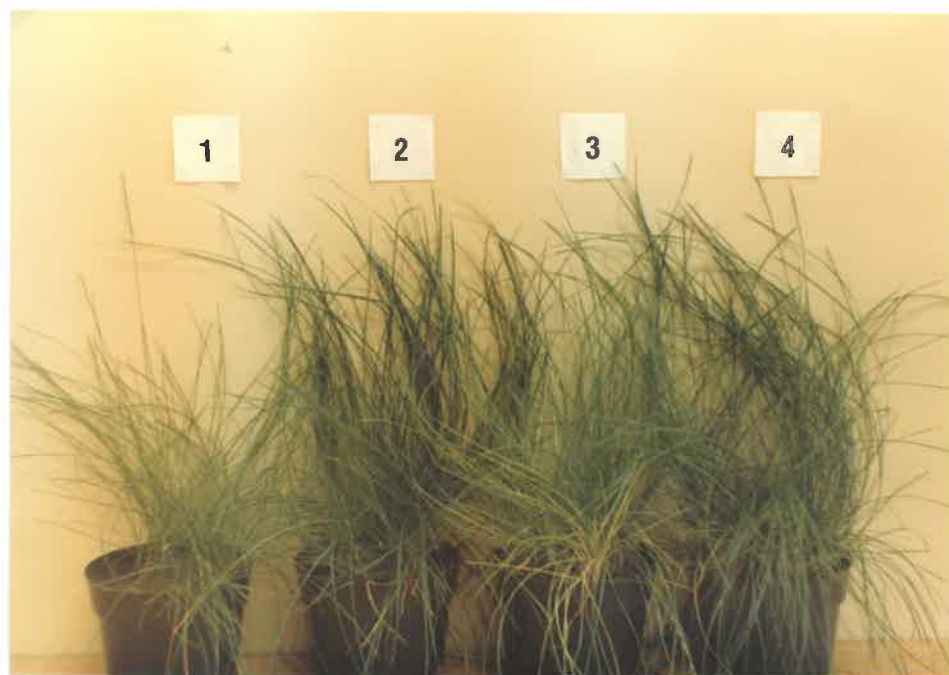


FIGURE 22

Effet de l'application de boues de fosses septiques et de sciure de bois sur la capacité des résidus miniers acides à supporter la croissance de la fétuque rouge

Remarque: La description des traitements est rapportée au tableau 21.

quelques plants de fétuque rouge ou de fléole des prés ont présenté des symptômes de carences nutritives en azote ou en potassium. Ceci pourrait être attribué à la compétition entre les microorganismes décomposeurs et les plantes pour ces éléments. Les productions moyennes en matières sèches pour les différentes espèces cultivées sont présentées dans le tableau 22. L'apport de doses croissantes de boues de fosses septiques sans sciure de bois (traitements 1, 5 et 9), a augmenté de façon graduelle les rendements en matière sèche de la fétuque rouge et de la fléole des prés. L'addition de quantités croissantes de sciure de bois (traitements 1, 2, 3 et 4) a aussi augmenté les rendements en matière sèche des deux espèces. D'autre part, l'effet de l'addition de sciure de bois aux boues de fosses septiques sur le rendement a également été mis en évidence. D'après les résultats obtenus, on peut noter que les apports de BFS seuls, SB seuls ou les mélanges BFS + SB permettent l'obtention d'une meilleure production que le traitement sans addition d'amendements organiques (témoin). Les traitements 12 et 11 semblent être ceux qui ont le plus favorisé la production de matière sèche chez la fétuque rouge (maximum atteint 13,1 g/pot) et la fléole des prés (maximum atteint 16,0 g/pot), respectivement. D'autre part, la valeur de pH du milieu de croissance n'ayant pas reçu d'amendements organiques était très faible ; 4,10 pour la fétuque rouge et 4,30 pour la fléole des prés. Par contre, les milieux de croissance ayant reçu des doses croissantes d'amendements organiques avaient des valeurs de pH variant entre 6,56 et 7,48 (tableaux 1A et 2A, en Annexe).

Les résultats analytiques concernant les teneurs en métaux lourds des plantes sont présentés dans les tableaux 23 et 24. Les résultats montrent que le taux de prélèvement des métaux lourds par la fétuque rouge et la fléole des prés augmente dans l'ordre suivant :

$Cu = Zn < Fe < Al < Mn$.

Il est à noter que les quantités de Cu ou de Zn prélevées par pot pour les traitements incluant les apports d'amendements organiques sont, à quelques exceptions près, plus élevées que celles pour les traitements sans amendements organiques. Ces résultats corroborent

TABLEAU 22. Rendements en matières sèches (g/pot) de plantes fourragères cultivées en serre sur des rejets miniers traités avec des matériaux organiques

No. de traitement	Boues de fosses septiques +	
	sciure de bois	
	Fléole des prés	Fétuque rouge
1	6,10	6,55
2	5,92	6,95
3	6,80	6,67
4	8,60	8,20
5	9,55	8,15
6	12,80	9,30
7	15,25	11,10
8	16,75	10,75
9	10,20	9,40
10	12,90	9,65
11	16,00	12,40
12	14,20	13,10

Remarque: La description des traitements est rapportée au tableau 21.

TABLEAU 23. Teneurs en éléments majeurs et mineurs de la partie aérienne de la fétuque rouge cultivée sur des rejets miniers sulfureux amendés de boues de fosses septiques et de sciure de bois.

No. de traitement	Éléments majeurs (%)					Métaux lourds (mg/kg.sec)				
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	Al
1	1,04	0,32	1,79	0,78	0,20	87,5	6,5	8,6	155,6	100,4
2	1,46	0,39	2,27	0,82	0,16	80,2	7,1	8,9	162,8	90,5
3	1,57	0,37	2,95	0,78	0,14	61,4	7,6	8,8	178,1	80,7
4	1,71	0,34	2,15	0,92	0,15	44,6	7,5	9,9	204,5	80,6
5	1,22	0,33	1,59	0,79	0,20	53,1	7,8	8,1	164,7	60,4
6	1,80	0,36	1,85	0,81	0,17	84,5	10,9	11,2	234,8	105,3
7	1,71	0,38	1,98	0,84	0,21	48,6	12,4	11,3	186,3	102,3
8	1,99	0,34	2,13	0,88	0,22	32,4	11,6	11,0	263,5	80,4
9	1,30	0,40	1,58	0,89	0,22	68,3	17,0	11,0	242,6	86,2
10	1,94	0,42	1,78	0,95	0,22	65,4	14,7	12,7	259,7	84,1
11	1,85	0,40	1,54	1,04	0,26	73,4	15,4	10,7	210,8	112,8
12	2,13	0,39	1,99	1,01	0,24	62,5	18,2	12,4	280,1	105,7

Remarques:

1. La description des traitements est rapportée au tableau 21.
2. La concentration des éléments est sur la base du matériel végétal séché à l'étuve (70°C).
3. Les concentrations de Cd, Cr, Ni et Pb sont inférieures à 1,00 mg/kg.

TABLEAU 24. Teneurs en éléments majeurs et mineurs de la partie aérienne de la fléole des prés cultivée sur des rejets miniers sulfureux amendés de boues de fosses septiques et de sciure de bois.

No. de traitement	Éléments majeurs (%)					Métaux lourds (mg/kg.sec)				
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	Al
1	0,90	0,21	1,44	0,68	0,14	62,5	6,2	8,8	150,3	80,7
2	0,95	0,26	2,40	0,65	0,14	54,5	8,1	9,2	140,4	120,3
3	1,20	0,26	2,35	0,79	0,16	57,5	9,4	14,2	170,1	160,6
4	1,06	0,23	2,23	0,81	0,17	53,5	8,3	13,5	174,2	100,4
5	0,81	0,20	1,41	0,71	0,15	81,0	9,8	9,7	140,2	130,7
6	1,01	0,23	1,62	0,79	0,17	98,1	12,4	11,6	127,4	162,6
7	1,37	0,26	1,50	0,81	0,16	74,3	13,0	12,2	144,3	130,5
8	1,18	0,21	1,24	0,98	0,21	59,8	13,1	11,7	148,6	110,2
9	0,81	0,19	1,34	0,75	0,19	70,5	12,1	7,7	122,0	100,4
10	1,27	0,25	1,51	0,91	0,18	93,2	15,6	11,5	128,0	160,2
11	1,44	0,28	1,35	0,92	0,27	91,3	16,7	13,8	128,6	160,2
12	1,40	0,25	1,50	0,94	0,24	86,5	16,8	13,7	182,0	140,5

Remarques:

1. La description des traitements est rapportée au tableau 21.
2. La concentration des éléments est exprimée sur la base du matériel végétal séché à l'étuve (70°C).
3. les concentrations de Cd, Cr, Ni et Pb sont inférieures à 1,00 mg/kg.

ceux de Cescas (1987) et Fuller et Lanspa (1975).

Les teneurs en métaux lourds des espèces cultivées ne semblent pas causer des effets phytotoxiques. Au pH (4,1), auquel a été faite la mise en végétation, on ne s'attend pas à des différences importantes dans l'absorption des métaux lourds dont l'activité est réduite au maximum. Chaney (1982) a compilé des données sur les teneurs des plantes en métaux lourds qui peuvent être considérées "normales" et celles qui sont "toxiques" (tableau 25). En comparant ces données avec celles obtenues dans la présente étude (tableaux 23 et 24), nous notons que les teneurs en métaux lourds des espèces végétatives sont normales.

3.2.2.2 Résidus miniers recevant des boues d'usine d'épuration et de sciure de bois

Des pots de plastique de 115 mm de diamètre ont été remplis de 0,5 kg de résidus miniers (échantillon composite). Le dispositif expérimental pour chacune des espèces végétatives utilisées comprenait 12 traitements répétés 3 fois pour un total de 36 pots par plante (3 doses de boues d'usine d'épuration x 4 doses de sciure de bois x 3 répétitions). Le tableau 26 résume les différents traitements. Tous les pots ont reçu une quantité de chaux équivalant à 2,89 t/ha. On a appliqué et incorporé l'équivalent de 481 kg/ha de fertilisant de formule 17-17-17 pour la fléole des prés et la fétuque rouge. Les contenus des pots réservés pour la culture du maïs ont reçu des quantités d'engrais à base d'azote (46-0-0), de phosphore (0-40-0) et de potassium (0-0-60) selon les doses recommandées par la Commission des Productions Végétales du Québec (1984) pour le maïs.

De la fléole des prés, de la fétuque rouge et du maïs ensilage ont été semés, à raison de 200 mg, 150 mg et 1 graine par pot, respectivement. La période de croissance a débuté le 8 août 1988 et les semis furent récoltés le 31 octobre 1988 pour le maïs ensilage et le 18 novembre 1988 pour la fléole des prés et la fétuque rouge. Les rendements en matière sèche des parties aériennes ont été

TABLEAU 25. Teneurs (mg/kg) en métaux lourds du feuillage des plantes
(Chaney, 1972)

Elément	Teneur "normale" (mg/kg)	Teneur "toxique" (mg/kg)
Cd	0,01 - 1	5 - 700
Cu	3 - 20	25 - 40
Fe	30 - 300	-----
Mn	15 - 150	400 - 2000
Ni	0,1 - 5	50 - 100
Pb	2 - 5	-----
Zn	15 - 150	500 - 1500

TABLEAU 26. Doses de boues d'usine d'épuration et de sciure de bois utilisées lors des essais culturels en serre

No de traitement	Matériaux organiques ajoutés (g/pot)	
	Sciure de bois (S.B.)	Boues d'usine d'épuration (B.U.E.)
1	0	0
2	25	0
3	50	0
4	100	0
5	0	25
6	25	25
7	50	25
8	100	25
9	0	50
10	25	50
11	50	50
12	100	50

mesurés après séchage à l'étuve à 70°C. Les plants ont été broyés à 1 mm et la teneur en éléments majeurs et en métaux lourds des tissus fut déterminée selon les méthodes usuelles d'analyse.

Quelques caractéristiques chimiques des résidus miniers après la récolte furent également déterminées. Les résultats sont présentés dans les tableaux 3A, 4A et 5A, en Annexe.

Les essais indicatifs montrent que les plantes agronomiques ont eu une bonne croissance sur les résidus miniers traités avec les amendements organiques (figures 23 et 24). Le tableau 27 présente les résultats des rendements en matière sèche de la fétuque rouge, de la fléole des prés et du maïs ensilage. L'apport de doses croissantes de boues d'usine d'épuration conjointement avec la sciure de bois, augmente de façon graduelle les rendements en matière sèche des espèces cultivées. L'examen du tableau 27 permet de constater la supériorité des traitements 11 et 12. Les résultats rejoignent donc ceux de l'expérimentation avec les résidus miniers amendés avec les boues de fosses septiques et de sciure de bois (section 3.2.2.1).

Les tableaux 28, 29 et 30 donnent les teneurs en métaux lourds de la partie aérienne des végétaux. Là encore les résultats sont similaires à ceux obtenus précédemment.

3.2.3 Essais de lixiviation: effet du mode d'incorporation des amendements organiques sur la teneur en métaux lourds des eaux de percolation issus de résidus miniers cultivés avec des plantes agronomiques

Des colonnes de lixiviation de 10 cm de diamètre et 30 cm de longueur sont remplies de 1,96 L de résidus miniers acides (échantillon composite). Le tableau 31 résume les différents traitements. On a appliqué et incorporé sur une profondeur de 5 cm l'équivalent de 509 kg/ha d'un fertilisant de formule 0-20-20 pour le lotier corniculé. Les contenus des colonnes réservées à la culture du maïs



FIGURE 23

Effet de l'application de boues d'usine d'épuration et de sciure de bois sur la capacité des résidus miniers acides à supporter la croissance de la fléole des prés

Remarque: La description des traitements est rapportée au tableau 26.



FIGURE 24

Effet de l'application de boues d'usine d'épuration et de sciure de bois sur le pouvoir d'implantation du maïs ensilage dans les résidus miniers acides

Remarque: La description des traitements est rapportée au tableau 26.

TABLEAU 27. Rendements en matières sèches (g/pot) de plantes fourragères cultivées en serre sur des rejets miniers traités avec des matériaux organiques

No. de traitement	Boues	d'usine d'épuration +	
		sciure de bois	
		Fléole des prés	Fétuque rouge
			Mais ensilage
1	2,56	2,28	5,56
2	2,94	3,10	6,70
3	3,12	3,60	6,96
4	3,34	3,65	8,97
5	3,20	3,42	7,92
6	3,55	3,92	8,84
7	3,58	4,15	9,95
8	3,46	4,00	11,64
9	3,40	3,80	8,52
10	3,60	4,15	8,51
11	3,65	4,27	10,24
12	3,65	4,08	13,27

Remarque: La description des traitements est rapportée au tableau 26.

TABLEAU 28. Teneurs en éléments majeurs et mineurs de la partie aérienne de la fétuque rouge cultivée sur des rejets miniers sulfureux amendés avec des boues d'usine d'épuration et de sciure de bois.

No. de traitement	Éléments majeurs (%)					Métaux lourds (mg/kg.sec)				
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	Al
1	1,80	0,29	1,70	0,66	0,20	13,2	3,3	19,7	48	90
2	2,49	0,38	1,62	0,94	0,27	12,6	4,9	14,6	136	70
3	1,95	0,39	1,59	1,38	0,34	13,6	3,8	13,8	153	80
4	1,98	0,38	2,10	1,15	0,30	15,6	2,7	15,4	137	60
5	2,27	0,56	2,04	1,07	0,31	9,8	5,8	14,3	150	30
6	2,40	0,47	2,46	0,88	0,24	13,2	5,8	15,1	235	60
7	2,80	0,53	2,04	0,94	0,21	13,0	7,1	11,2	365	80
8	1,92	0,46	2,94	1,05	0,24	14,6	6,3	13,0	278	60
9	1,93	0,57	2,99	0,96	0,23	14,8	7,3	15,8	277	70
10	2,60	0,49	1,63	1,14	0,24	25,4	6,9	13,5	283	92
11	2,44	0,69	2,40	1,13	0,22	20,2	6,9	12,5	332	70
12	1,85	0,47	2,92	1,02	0,23	21,4	6,7	14,2	287	90

Remarques:

1. La description des traitements est rapportée au tableau 26.
2. La concentration des éléments est exprimée sur la base du matériel végétal séché à l'étuve (70 °C)
3. Les concentrations de Cd, Cr, Ni et Pb sont inférieures à 1,00 mg/kg.

TABLEAU 29. Teneurs en éléments majeurs et mineurs de la partie aérienne de la fléole des prèes cultivée sur des rejets miniers sulfureux amendés avec des boues d'usine d'épuration et de sciure de bois.

No. de traitement	Éléments majeurs (%)					Métaux lourds (mg/kg.sec)				
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	Al
1	1,57	0,33	1,89	0,90	0,20	89,0	4,4	13,7	114	180
2	1,72	0,40	2,18	0,99	0,22	65,6	4,9	12,4	134	150
3	1,64	0,39	2,31	0,93	0,22	44,8	3,8	12,4	92	100
4	1,75	0,33	1,89	1,12	0,26	19,2	3,0	13,1	110	210
5	2,38	0,47	1,96	1,22	0,22	73,4	6,4	17,2	146	340
6	1,76	0,55	2,74	1,12	0,20	68,8	6,6	14,4	171	160
7	1,82	0,47	2,10	1,12	0,24	83,1	7,5	14,1	212	280
8	1,60	0,41	2,44	0,98	0,20	65,0	5,5	10,4	169	100
9	1,82	0,59	2,18	1,16	0,20	85,2	7,4	15,7	211	260
10	1,85	0,37	2,04	0,94	0,21	69,3	8,1	15,2	250	310
11	1,61	0,42	2,57	0,95	0,19	77,8	7,0	9,6	234	100
12	1,57	0,49	3,06	1,00	0,21	62,4	9,3	16,3	201	170

Remarques:

1. La description des traitements est rapportée au tableau 26.
2. La concentration des éléments est exprimée sur la base du matériel végétal séché à l'étuve (70°C).
3. Les concentrations de Cd, Cr, Ni et Pb sont inférieures à 1,00 mg/kg.

TABLEAU 30. Teneurs en éléments majeurs et mineurs de la partie aérienne du maïs ensilage cultivé sur des rejets miniers sulfureux amendés avec des boues d'usine d'épuration et de sciure de bois.

No.de traitement	Éléments majeurs (%)					Métaux lourds (mg/kg.sec)				
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	Al
1	1,13	0,23	1,56	0,65	0,34	38,8	8,2	11,8	73,0	60,2
2	1,35	0,18	1,22	0,70	0,34	28,7	3,9	9,6	68,0	50,5
3	1,72	0,20	1,47	1,00	0,38	40,3	5,2	11,3	63,0	40,4
4	1,30	0,13	1,12	0,99	0,40	46,0	6,3	10,6	51,0	50,1
5	1,24	0,13	1,33	0,77	0,40	41,5	9,0	11,5	102,4	70,2
6	1,85	0,15	1,21	0,81	0,35	49,5	8,7	10,9	93,5	70,8
7	1,47	0,14	1,19	0,85	0,36	45,3	6,8	11,1	92,1	50,4
8	1,37	0,17	1,40	0,82	0,36	48,1	5,4	9,8	90,5	70,7
9	1,95	0,21	1,52	0,82	0,39	43,6	10,3	11,4	110,2	60,5
10	2,84	0,24	1,44	0,67	0,31	48,2	15,7	13,2	126,0	60,0
11	2,24	0,26	1,44	0,78	0,32	47,5	13,5	12,9	127,2	80,1
12	2,09	0,20	1,20	0,70	0,32	48,3	12,7	10,8	125,8	50,2

Remarques:

1. La description des traitements est rapportée au tableau 26.
2. La concentration des éléments est exprimée sur la base du matériel végétal séché à l'étuve (70°C).
3. Les concentrations de Cd,Cr,Ni et Pb sont inférieures à 1,00 mg/kg.

TABLEAU 31. Description des traitements relatifs aux essais de lixiviation de résidus miniers cultivés avec de plantes agronomiques

Types de matériaux organiques	Identification des traitements	Doses d'application et mode d'incorporation des matériaux organiques
Boues d'usine d'épuration (BUE) et sciure de bois (SB)	T1	432 cm ³ de BUE + SB ajoutés en surface
	T2	432 cm ³ de BUE + SB incorporés sur une profondeur de 5 cm
	T3	432 cm ³ de BUE + SB incorporés sur une profondeur de 10 cm
	T4	864 cm ³ de BUE + SB incorporés sur une profondeur de 10 cm
Boues de fosses septiques (BFS) et sciure de bois	T5	432 cm ³ de BFS + SB ajoutés en surface
	T6	432 cm ³ de BFS + SB incorporés sur une profondeur de 5 cm
	T7	432 cm ³ de BFS + SB incorporés sur une profondeur de 10 cm
	T8	864 cm ³ de BFS + SB incorporés sur une profondeur de 10 cm

ensilage ont reçu des quantités d'engrais à base d'azote, de phosphore et de potassium selon les doses recommandées par le C.P.V.Q. (1984) pour le maïs. Le rapport boues : sciure de bois des mélanges BUE + SB et BFS + SB était de 1:3. Les colonnes ont également reçu une petite dose de chaux (l'équivalent de 1,27 t/ha). Après une semaine de l'application d'amendements organiques , de fertilisant et de chaux, une série de colonnes ont été semées avec du lotier corniculé (0,32 g/colonne) ou du maïs ensilage (2 graines/colonne). La date de semis était le 18 juillet 1988 tandis que les dates de récolte du maïs et du lotier étaient respectivement le 3 septembre 1988 et le 18 novembre 1988. Les colonnes ont été soumises durant la période de croissance à un arrosage avec environ 400 mL d'eau distillée selon les besoins de chaque espèce végétative.

Les rendements en matière sèche des parties aériennes ont été mesurés après séchage à l'étuve à 70°C. Le contenu en métaux lourds des effluents recueillis après le 1er cycle (une semaine après le semis) et le dernier cycle (avant la récolte) de lixiviation a été déterminé par spectrométrie d'absorption atomique. Nous avons également suivi l'évolution du contenu en métaux lourds des effluents miniers issus de colonnes témoins ayant reçu les mêmes traitements que les colonnes en culture maïs en absence de plantes.

Les variations de pH des effluents issus de résidus miniers amendés avec des matériaux organiques, en fonction de la durée de croissance des plantes sont représentées à la figure 25. De façon générale, les valeurs de pH des effluents obtenus avant la récolte sont plus élevées que celles des effluents en début de croissance des plantes. On peut noter, à peu d'exceptions près, que les valeurs de pH les plus élevées sont obtenues avec les traitements T4 et T8. D'après les résultats du tableau 32, le pH des résidus miniers baisse de façon graduelle avec la profondeur . Il convient de souligner que les valeurs de pH des échantillons de résidus miniers prélevés dans la couche 20-30 cm sont généralement plus élevées que le pH du résidu minier initial (pH = 2,41).

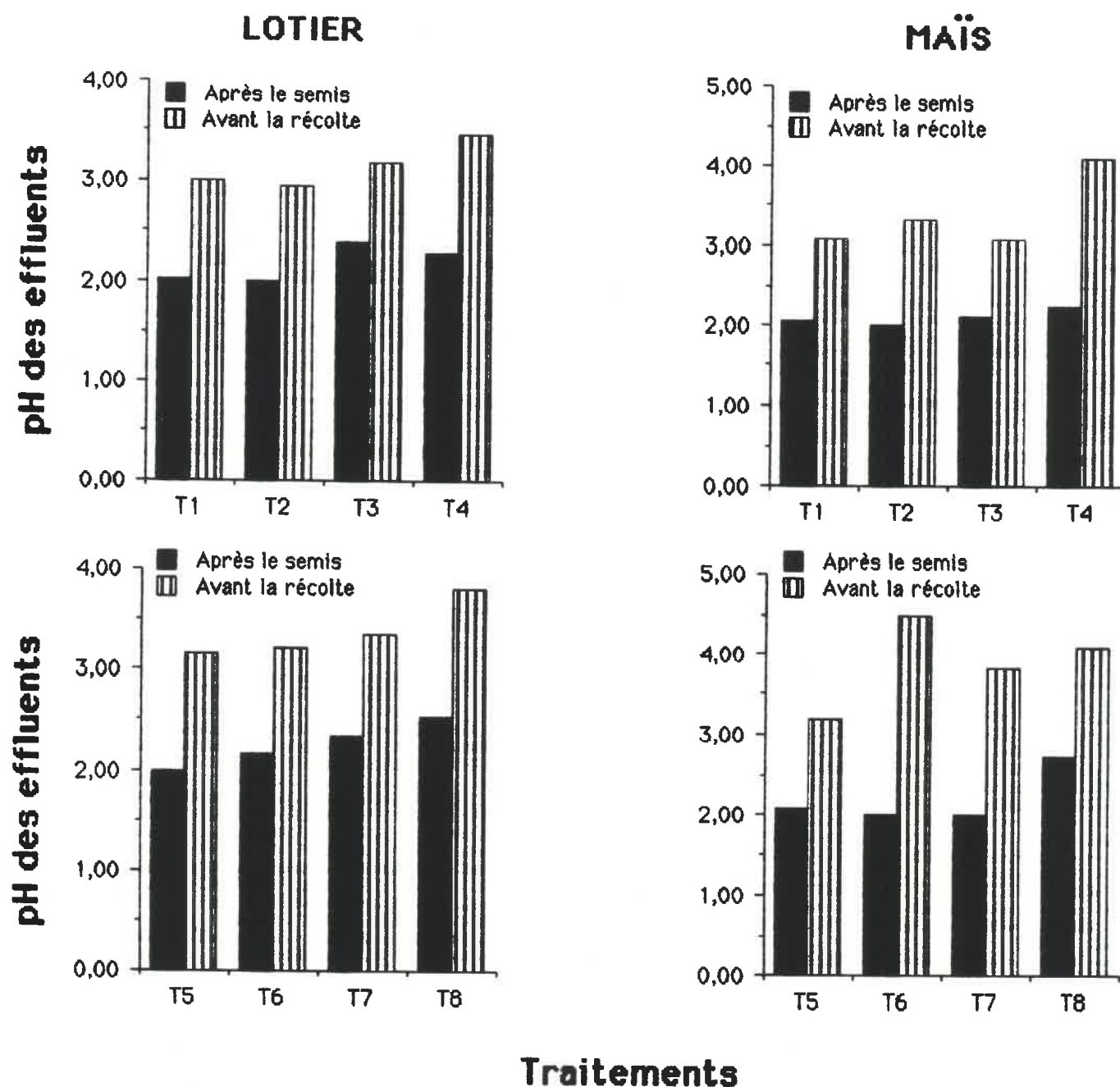


FIGURE 25

Comparaison entre les valeurs de pH des effluents provenant de résidus miniers amendés avec de matériaux organiques et cultivés avec du lotier ou du maïs, après le semis et avant la récolte.

Remarque: La description des traitements T1 à T8 est rapportée au tableau 31.

TABLEAU 32. Valeurs de pH des échantillons de rejets miniers prélevés à trois profondeurs dans la colonne de lixiviation après la récolte du lotier et du maïs

Type de culture	Identification des traitements	pH des échantillons de rejets miniers après la récolte		
		Couche 0-10 cm	Couche 10-20 cm	Couche 20-30cm
Lotier corniculé	T1	4,85	3,09	3,06
	T2	5,26	3,16	3,08
	T3	4,57	3,58	3,22
	T4	5,30	4,56	3,75
	T5	6,95	3,40	3,26
	T6	5,57	3,74	3,36
	T7	4,74	4,23	3,38
	T8	5,32	5,00	4,05
Maïs ensilage	T1	5,10	3,85	3,50
	T2	4,93	3,98	3,60
	T3	4,21	4,76	3,75
	T4	5,39	5,00	3,98
	T5	6,90	3,95	3,42
	T6	4,89	4,00	3,67
	T7	4,20	4,20	3,82
	T8	5,55	5,14	4,13

Remarques :

1. La description des traitements T1 à T8 est rapportée au tableau 31.
2. Les durées de croissance du lotier et du maïs étaient de 18 et 7 semaines, respectivement.

Les résultats d'analyse chimique des effluents sont présentés au tableau 33. Nous noterons que la quantité de fer relâché dans l'eau de percolation baisse considérablement après plusieurs cycles d'arrosage avec de l'eau distillée. Les traitements T4 et T8 semblent être ceux qui ont le plus empêché la libération de métaux lourds (Fe, Zn et Cu) dans les eaux de percolation. De plus, les traitements T4 et T8 ont favorisé l'obtention de hauts rendements en matière sèche chez le lotier (tableau 34) et le maïs (tableau 35). De façon générale, le lessivage des métaux lourds n'a pas affecté de façon marquée la croissance des plantes. Comme l'indique la figure 26, le lotier s'est bien développé dans les différents milieux de croissance. Toutefois, les traitements T1 et T5 ont donné de faibles rendements. Ceci peut être attribuable au fait que les amendements organiques n'étaient pas intimement mélangés avec les résidus miniers (amendements appliqués en surface). D'autre part, les concentrations de Fe, de Zn et de Cu dans les effluents miniers issus des colonnes témoins sans plante sont comparables à celles des effluents issus des colonnes avec plantes (tableau 33). Ces observations semblent indiquer que la mise en végétation des parcs à résidus miniers sulfureux affecte peu les propriétés chimiques des eaux de percolation.

3.3 CONCLUSION DE SECTION

D'une façon générale, les différentes espèces végétaives supportent bien les résidus miniers sulfureux amendés avec de matériaux organiques. L'apport des boues conjointement avec la sciure de bois n'a pas d'effet nuisible à la croissance des plantes tels le lotier corniculé, le maïs ensilage, la fétuque rouge traçante et la fléole des prés. Les plantes n'ont pas manifesté, en cours de croissance, de symptômes de toxicité prononcées en métaux lourds dû vraisemblablement aux conditions non acides des milieux de croissance. En effet, l'apport aux résidus miniers sulfureux d'amendements organiques a contribué à augmenter le pH du milieu de croissance. Etant donné que le pH influe fortement sur la sorption des métaux par les constituants du sol, il a un effet prépondérant sur leur solubilité et sur leur

TABLEAU 33. Concentrations de métaux lourds (ppm) dans les effluents provenant de résidus miniers recouverts avec de matériaux organiques et cultivés avec deux cultures

Type de culture	Identification des traitements	Effluents obtenus après une semaine du semis			Effluents obtenus avant la récolte		
		Fe	Zn	Cu	Fe	Zn	Cu
Lotier corniculé	T1	6628,0	27,7	348,0	47,7	1,5	9,9
	T2	5156,0	28,9	424,0	45,4	2,3	8,0
	T3	4636,0	15,6	346,0	6,5	2,6	12,3
	T4	2214,0	24,4	185,0	2,1	1,4	1,8
	T5	7944,0	34,0	460,0	49,6	1,2	4,2
	T6	6068,0	35,9	327,0	5,3	3,5	8,8
	T7	4435,0	36,0	222,0	2,8	3,0	7,2
	T8	3199,0	22,0	142,0	1,6	2,0	1,7
Maïs ensilage	T1	6248,0	37,0	463,0	37,8	1,8	7,9
	T2	6206,0	38,6	410,0	70,5	5,2	10,3
	T3	4250,0	40,1	385,0	14,7	6,1	7,4
	T4	2960,0	28,0	283,0	7,1	2,8	4,0
	T5	6392,0	22,0	282,0	12,8	1,7	2,9
	T6	5848,0	29,8	302,0	10,6	2,8	4,5
	T7	4252,0	33,0	229,0	5,3	2,2	3,3
	T8	2100,0	12,0	165,0	2,8	1,0	1,2
Sans végétation	T1	6492,0	36,4	380,0	30,4	1,8	3,4
	T2	5424,0	37,8	405,0	34,6	1,7	3,7
	T3	4246,0	36,8	362,0	9,5	1,5	4,5
	T4	2397,0	20,4	168,0	5,9	1,5	2,1
	T5	6659,0	39,2	382,0	36,5	1,4	3,2
	T6	5992,0	26,8	339,0	14,0	1,9	2,1
	T7	4375,0	30,8	316,0	8,6	1,8	2,5
	T8	2416,0	17,2	194,0	2,9	1,2	1,4

Remarques :

1. La description des traitements T1 à T8 est rapportée au tableau 31.
2. Les durées de croissance du lotier et du maïs étaient de 18 et 7 semaines, respectivement.
3. Les effluents issus de résidus miniers non recouverts avec une végétation ont été obtenus après une semaine et 18 semaines du **semis**.

TABLEAU 34. Rendements et composition chimique du lotier corniculé cultivé en serre dans des colonnes contenant des résidus miniers sulfureux amendés avec des matériaux organiques

Amendements organiques	No. de traitement	Rendements en matière sèche (g/colonne)	Éléments majeurs (%)					Métaux lourds (mg/kg sec)				
			N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	Al
B.U.E. + S.B.	T1	6,05	3,26	0,16	0,90	1,11	0,28	128	65	20	205	300
	T2	7,79	3,45	0,18	0,70	1,37	0,18	144	32	17	127	170
	T3	6,71	3,11	0,16	0,92	1,28	0,12	173	39	15	58	170
	T4	8,22	4,42	0,14	0,79	1,14	0,20	164	54	23	144	190
B.F.S. + S.B.	T5	5,52	3,70	0,22	1,23	1,91	0,25	85	41	9	50	100
	T6	6,91	3,70	0,24	0,99	1,86	0,18	125	52	13	107	140
	T7	6,35	3,90	0,27	1,65	1,58	0,13	280	53	18	45	210
	T8	9,29	3,94	0,19	0,82	1,52	0,23	175	62	11	88	110

Remarques:

1. La description des traitements T1 à T8 est rapportée au tableau 31.
2. La concentration des éléments est exprimée sur la base de poids du matériel végétal séché à l'étuve (70 °C).
3. Les teneurs de Cd, Cr, Ni et Pb dans les plants de lotier sont inférieures à 1,00 mg/kg.

TABLEAU 35. Rendements et composition chimique du maïs ensilage cultivé en serre dans des colonnes contenant des résidus miniers sulfureux amendés avec des matériaux organiques

Amendements organiques	No. de traitement	Rendements en matière sèche (g/colonne)	Eléments majeurs (%)					Métaux lourds (mg/kg sec)				
			N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	Al
B.U.E. + S.B.	T1	13,26	1,46	0,20	1,40	0,55	0,19	99	30	11	85	140
	T2	22,23	3,23	0,23	1,34	0,58	0,25	40	50	22	131	110
	T3	18,37	2,97	0,22	1,31	0,41	0,19	80	53	23	85	110
	T4	25,60	3,42	0,28	1,69	0,75	0,29	86	102	14	91	100
B.F.S. + S.B.	T5	11,16	1,36	0,21	1,32	0,50	0,20	66	24	10	34	90
	T6	17,13	2,58	0,27	1,29	0,57	0,23	78	31	10	72	90
	T7	15,99	3,12	0,35	1,96	0,60	0,20	152	37	32	63	180
	T8	21,56	3,58	0,43	4,65	1,11	0,21	196	77	15	77	120

Remarques:

1. La description des traitements T1 à T8 est rapportée au tableau 31.
2. La concentration des éléments est exprimée sur la base de poids du matériel végétal séché à l'étuve (70 °C).
3. Les teneurs de Cd, Cr, Ni et Pb dans les plants de maïs sont inférieures à 1,00 mg/kg.



FIGURE 26

Effet du mode d'incorporation des amendements organiques sur la croissance du lotier corniculé

Remarque: La description des traitements est rapportée au tableau 31.

phytotoxicité.

Les résultats obtenus suggèrent que l'application d'une dose élevée d'amendements organiques en profondeur contribue à augmenter le pH des résidus miniers et de leurs effluents.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

A partir des résultats obtenus, on peut considérer que l'incorporation aux rejets miniers du parc East-Sullivan de matériaux organiques alcalinisants et ayant une forte affinité pour les métaux, aurait un effet bénéfique sur la diminution de l'acidité du milieu recep- teur de même que sur la diminution du taux de libération de métaux lourds dans les effluents miniers.

D'une manière approximative, nous pouvons dire que l'épandage d'amendements organiques sur la surface des rejets miniers ne contribue pas à réduire de façon marquée l'acidité de la couche d'oxydation du profil de sol minier ni le taux de libération des métaux lourds. Les boues devraient être mélangées avec les rejets miniers pour ralentir le processus d'oxydation des minéraux sulfurés.

Les rejets miniers acides doivent être amendés de façon à obtenir un pH voisin de la neutralité. La réaction ne doit pas être réversible. Dans cette perspective, les boues stabilisées à la chaux et à faible teneur en métaux lourds pourraient constituer un amendement organique intéressant à recycler en milieu industriel.

Il importe de souligner que les boues ou les sciures de bois peuvent libérer des métaux lourds ou autres contaminants organiques dans le milieu si, par exemple, le pH du sol minier amendé vient à diminuer ou si les conditions contrôlant la formation d'acide dans les résidus miniers se modifient. Il faut donc s'assurer que l'effet ne soit pas réversible, à moyen et à long terme.

Bien que l'effet positif des amendements organiques sur la diminution de l'acidité des rejets miniers ait été démontré, il ne faut pas créer un problème de pollution d'un autre ordre. Une étude de terrain, utilisant des cases lysimétriques pour évaluer la qualité des effluents issus des résidus miniers amendés, serait

à faire avant de pratiquer l'épandage des boues et des sciures de bois à grande échelle.

Nous estimons qu'il est absolument essentiel d'entreprendre des recherches tant fondamentales que pratiques pour :

- 1) déterminer les conditions d'utilisation des boues et des sciures de bois déposées sur le parc;
- 2) s'assurer que l'utilisation des boues de fosses septiques soit saine et sécuritaire;
- 3) étudier la transformation de la matière organique de même que la biodisponibilité des métaux lourds et des contaminants organiques dans les rejets miniers traités avec les divers matériaux organiques;
- 4) développer des méthodes améliorées pour prévoir la qualité des effluents issus des rejets miniers amendés incluant la simulation par modèle.

Pour des raisons de contrôle de l'érosion du sol minier et de valeur esthétique de l'environnement, nous croyons que la restauration du parc à résidus miniers East-Sullivan par voie végétative serait un choix approprié. Cette restauration pourra inclure plus d'une méthode de neutralisation du taux d'acidité potentielle des rejets miniers avant de procéder à la mise en végétation du site.

REFERENCES CONSULTÉES

- Arafat, N. 1985. The impact of mining and smelting on trace metal distribution in lake sediments around Rouyn-Noranda, Quebec. *Water Pollution Res. J. Canada* 20(1): 1-8.
- Arafat, N. et J.O. Nriagu. 1986. Simulated mobilization of metals from sediments in response to lake acidification. *Water, Air, and Soil Pollution*, 31: 991-998.
- Azzaria, L.M. et G. Fréchette. 1987. Natural and industrial sources of trace elements, Rouyn-Noranda-Val d'Or mining area, Québec, Canada. Dans *The Practical Applications of Trace Elements and Isotopes to Environmental Biogeochemistry and Mineral. Theophrastus*, p.3-26.
- Azzaria, L.M. et C. Potvin. 1979. Qualités physico-chimiques de l'eau de Rouyn-Noranda. *Les cahiers de Centre de recherche sur l'eau*, 3(1). 51p.
- Barth, R.C. et B.K. Martin. 1981. Reclamation of phytotoxic tailing. *Min. Environ.* 3:55-65.
- Cescas, M.P. 1987. Mise en végétation des résidus miniers acides des mines Solbec et Cupra. 26p.
- Chaney, R.L. 1982. Fate of toxic substances in sludge applied to cropland. *Proc. Int. Symp. Land Appl. of Sewage Sludge*, 13 au 15 octobre 1982. Tokyo, Japon.
- Chaney, R.L. et P.M. Giordano. 1977. Microelemnts as related to plant deficiencies and toxicities, pp. 234-279. Dans L.F. Elliot et F.J. Stevenson (éds.) *Soils for management of organic wastes and waste waters*. SSSA, Madison, Wisconsin.
- Commission des Productions Végétales du Québec. 1984. Maïs. Agdex 111/20.
- Corey, R.B., King, L.D., Lue-Hing, C. et coll. 1987. Effects of sludge properties on accumulation of trace elements by crops. pp.22-51. Dans *Land application of sludge*. Lewis Publ., Chelsea, Mi.
- Fuller, W.H. et K. Lanspa. 1975. Uptake of iron and copper by sorghum from mine tailings. *J. Environ. Qual.* 4: 417-422.
- Haghiri F. et P. Sutton. 1983. Chapter 30. Dans W.E. Sopper, E.M. Seaker et R.K. Bastian. *Land Reclamation and biomass production with municipal wastewater and sludge*. The Pennsylvania State University Press.
- Halderson, J.L. et D.R. Zenz. 1978. Chapter 20. Dans F.W. Schaller et P. Sutton (éds.) *Reclamation of Drastically Disturbed Lands*. SSSA, Madison, Wisconsin.
- Isaac, R.A. et J.D. Kerber. 1971. Atomic absorption and flame photometry: techniques and uses in soil, plant and water analysis. Dans L.M. Walch (éd.) *Instrumental methods for analysis of soils and plant tissue*. pp. 17-37. SSSA, Madison, Wisconsin.

- Jones, J.B. et W.J.A. Steyn. 1973. Sampling, handling and analyzing plant tissue samples. pp. 249-270. Dans L.M. Walch et J.D. Beaton (éds.) Soil Testing and Plant Analysis. SSSA, Madison, Wisconsin.
- Joost, R.E., Olsen, F.J., Jones, J.H. et D. Stiles. 1983. Revegetating acid coal mining sites. BioCycle, January/February. p.47-50.
- Kishk, F.M. et M.N. Hassan. 1973. Sorption and desorption of copper by and from clay minerals. Plant and Soil, 39:497-505.
- Lalonde, J.P. 1978. Etude et implications des éléments traces dans les précipitations de la région de Rouyn-Noranda. Ministère des Richesses Naturelles du Québec. DPV-643. 38p.
- Levinson, A.A. 1974. Introduction to exploration geochemistry. Applied Publishing.
- McNeely, R.N., Neimanis, V.P. et L. Dwyer. 1980. Références sur la qualité des eaux. Guide des paramètres de la qualité des eaux. Direction générale des eaux intérieures. Dir. qual. des eaux, Envir. Canada. 100p.
- Mudroch, A. et J. Capobianco. 1980. Impact of past mining activities on aquatic sediments in Moira river basin. Ontario J. Great Lakes Res.6(2): 121-128.
- Murray, D. Webber, B. et E. Larocque. 1978. Reclamation of lower Williams lake tailings area of Denison mines limited. Canmet, Energy, Mines and Ressources of Canada.
- Nriagu, J.O. Wong, H.K.T. et R.D. Coker. 1982. Deposition and chemistry of pollutant metals in lakes around smelters at Sudbury, Ontario. Environ. Sc. and Technol. 16(9): 551-560.
- Paquet, A. 1984. Mise en végétation de rejets miniers acides et alcalins du Québec: essais en serre. Thèse de maîtrise. Université Laval.
- Pietz, R.I. Carlson, Jr., C.R., Peterson, J.R. et coll. 1989. Application of sewage sludge and other amendments to coal refuse material: 1. Effects on chemical composition. J. Environ. Qual. 18: 164-169.
- Planigram inc. 1987. Etude de caractérisation du parc à résidus miniers East-Sullivan.
- Roche Ltée. Groupe- Conseil. 1987. Assainissement des eaux et revitalisation des terrils : Parc à résidus des mines Solbec et Cupra.
- Scott, A. 1968. Les sols. Librairie Beauchemin Limitée. Montréal. Québec.
- Sommers, L.E., Nelson, D.W., Kirleis, A.W. et coll. 1984. Characterization of sewage sludge and sewage sludge-soil systems. USEPA, REP.EPA-600/2-84-046. Cincinnati, OH.
- St-Yves, A. 1984. La valorisation agricole des boues de stations d'épuration. Assises annuelles 1984. L'eau, notre héritage. MENVIQ.

Topper, K.F. et B.R. Sabey. 1986. Sewage sludge as a coal mine spoil amendment for revegetation in Colorado. J. Environ. Qual. 15: 44-49.

Watkin, E.M. et J.A. Watkin. 1982. Tailings Reclamation in Eastern Canada. Miller Freeman Publications.

Zahary, G., Murray, D. et B. Hoare. 1977. La restauration: Un défi à l'exploitation à ciel ouvert au Canada. L'ingénieur, mars-avril. p.3-8.

A N N E X E

TABEAU 1A. Propriétés chimiques des rejets miniers sulfureux amendés avec de BFS + SB et cultivés avec de la fétuque rouge.

Paramètres	No. de traitement											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
pH (eau)	4,10	6,90	6,99	7,18	7,21	6,62	7,05	7,28	6,75	6,88	7,08	7,36
Carbone organique (%)	0,00	0,72	1,44	2,95	0,02	1,32	1,36	3,07	0,24	1,40	1,46	3,27
Bases échangeables (meq/100g)												
Ca	7,63	6,79	7,29	9,16	11,48	4,89	7,53	10,37	10,43	8,83	11,50	8,68
Mg	0,07	0,07	0,09	0,12	0,09	0,04	0,07	0,07	0,11	0,06	0,08	0,08
K	0,28	0,59	0,66	0,77	0,38	0,41	0,41	1,07	0,43	0,46	0,59	0,92
Oligo- éléments (mg/kg)												
Fe	125,0	44,1	38,1	28,5	55,2	40,2	38,1	29,7	70,2	47,4	28,8	26,4
Zn	0,39	0,30	0,27	0,36	0,90	0,57	1,02	0,99	1,32	0,75	1,04	1,20
Cu	5,31	2,40	2,76	3,30	2,70	2,82	2,21	3,45	4,41	2,85	2,67	3,38
Mn	1,02	1,02	0,96	0,89	0,74	1,35	0,79	2,25	1,29	1,41	1,38	1,40

Remarques:

1. La description des traitements est rapportée au tableau 21.

2. Les analyses chimiques du sol minier ont été effectuées après la récolte.

TABLEAU 2A. Propriétés chimiques des rejets miniers amendés avec de BFS + SB et cultivés avec de la fléole des prés.

Paramètres	No. de traitement											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
pH (eau)	4,30	6,56	6,83	6,90	6,71	6,85	6,99	7,20	7,08	6,97	7,41	7,48
Carbone organique (%)	0,01	0,80	1,76	2,87	0,08	0,96	1,90	3,00	0,15	1,99	2,16	3,15
Bases échangeables (méq/100g)												
Ca	8,68	4,10	5,14	7,10	8,88	8,33	8,48	9,10	9,20	9,83	10,20	10,00
Mg	0,09	0,07	0,09	0,08	0,12	0,08	0,08	0,11	0,12	0,09	0,07	0,07
K	0,26	0,49	0,51	1,10	0,26	0,36	0,56	0,72	0,33	0,41	0,46	0,69
Oligo-éléments (mg/kg)												
Fe	117,3	46,2	38,7	24,6	39,0	26,4	24,6	23,7	49,2	38,1	28,2	24,9
Zn	0,21	0,30	0,52	0,36	0,60	0,60	0,74	0,75	0,87	0,87	1,20	1,32
Cu	3,36	2,40	3,33	3,04	2,24	1,91	2,64	3,36	3,02	2,76	2,70	3,87
Mn	0,97	0,95	1,20	1,27	0,80	0,65	1,22	1,74	0,75	1,43	1,75	1,86

Remarques:

1. La description des traitements est rapportée au tableau 21.
2. Les analyses chimiques du sol minier ont été effectuées après la récolte.

**TABEAU 3A. Propriétés chimiques des rejets miniers sulfureux amendés avec de
BUE + SB et cultivés avec de la fétuque rouge.**

Paramètres	No. de traitement											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
pH (eau)	5,61	5,46	6,86	7,32	5,59	6,89	6,97	7,47	6,90	6,96	6,90	7,61
Carbone organique (%)	0,01	0,64	1,76	3,11	0,01	0,60	1,72	3,39	0,08	0,88	1,80	3,40
Bases échangeables (meq/100g)												
Ca	5,14	3,20	4,34	5,84	7,78	4,04	6,74	10,00	6,24	9,20	7,74	11,08
Mg	0,03	0,09	0,10	0,14	0,04	0,08	0,09	0,12	0,09	0,10	0,10	0,17
K	0,28	0,45	0,44	0,79	0,36	0,49	0,50	1,00	0,46	0,59	0,54	1,51
Oligo-éléments (mg/kg)												
Fe	56,1	65,4	20,4	22,5	59,7	64,5	57,0	24,6	28,5	40,8	46,2	35,1
Zn	0,34	0,27	0,26	0,29	0,53	1,11	0,70	0,86	0,61	0,60	0,99	1,47
Cu	2,40	3,30	2,22	3,02	3,66	3,48	3,33	4,56	3,80	3,90	6,48	5,10
Mn	0,36	0,99	1,05	1,50	1,02	2,70	1,80	1,86	1,64	2,24	3,20	3,00

Remarques:

1. La description des traitements est rapportée au tableau 26.
2. Les analyses chimiques du sol minier ont été effectuées après la récolte.

TABEAU 4A. Propriétés chimiques des rejets miniers sulfureux amendés avec de BUE + SB et cultivés avec de la fléole des prés.

Paramètres	No. de traitement											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
pH (eau)	5,13	6,12	6,30	6,32	6,52	6,99	7,06	7,44	6,42	6,77	7,09	7,55
Carbone organique (%)	0,01	0,64	1,83	3,80	0,02	0,96	1,79	3,27	0,05	0,92	1,72	3,95
Bases échangeables (meq/100g)												
Ca	3,99	4,05	4,69	8,78	5,29	5,34	6,24	9,73	6,54	7,04	7,63	7,65
Mg	0,10	0,10	0,13	0,19	0,07	0,07	0,11	0,12	0,10	0,10	0,09	0,13
K	0,33	0,36	0,43	0,72	0,42	0,43	0,64	0,84	0,39	0,54	0,84	1,41
Oligo-éléments (mg/kg)												
Fe	78,0	45,0	34,2	26,7	50,4	49,8	39,3	30,0	45,6	43,5	45,3	39,0
Zn	0,36	0,45	0,30	0,42	0,54	1,01	0,60	0,72	0,78	0,54	1,04	2,10
Cu	2,73	3,21	2,54	2,94	3,21	3,39	4,29	4,53	3,90	3,39	6,39	9,20
Mn	0,89	1,08	1,12	1,95	1,59	3,00	2,40	3,09	2,04	2,80	3,60	3,45

Remarques:

1. la description des traitements est rapportée au tableau 26.
2. Les analyses chimiques du sol minier ont été effectuées après la récolte.

TABLEAU 5A. Propriétés chimiques des rejets sulfureux amendés avec de BUE + SB et cultivés avec du maïs ensilage.

Paramètres	No. de traitement											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
pH (eau)	5,12	6,16	6,56	7,00	6,03	6,68	6,79	7,20	6,21	6,69	6,87	7,25
Carbone organique (%)	0,01	1,12	2,07	3,99	0,12	1,16	2,19	4,67	0,28	1,20	2,11	3,91
Bases échangeables (méq/100g)												
Ca	10,97	11,67	9,38	9,98	11,67	9,68	13,07	11,57	9,88	11,87	10,37	12,47
Mg	0,07	0,09	0,14	0,13	0,11	0,08	0,08	0,12	0,08	0,07	0,08	0,15
K	0,26	0,41	0,54	0,84	0,46	0,36	0,36	1,02	0,51	0,49	0,59	0,77
Oligo-éléments (mg/kg)												
Fe	46,0	15,0	13,4	12,4	42,0	30,6	28,5	15,9	40,6	39,5	31,1	24,4
Zn	0,15	0,20	0,20	0,52	0,48	0,46	0,35	0,67	0,76	1,00	0,93	1,09
Cu	1,89	2,36	2,01	2,57	3,11	3,15	4,15	4,36	4,20	6,07	5,43	6,33
Mn	0,63	0,85	0,88	1,07	1,40	1,55	1,51	2,29	1,91	2,68	3,31	2,85

Remarques:

1. La description des traitements est rapportée au tableau 26.
2. les analyses chimiques du sol minier ont été effectuées après la récolte.