

**Évaluation des risques et des avantages écologiques de la revégétalisation
des sites miniers de la région de Thetford Mines – phase 1**

Rapport final

**Par :
Yonghong Wu**

**Travail réalisé pour :
CanmetMINES**

Projet : 603809

Rapport : LSM 11-041

Version : octobre 2011

RÉSUMÉ

Le Programme de fermeture des mines et de gestion des risques pour les écosystèmes a reçu pour mandat de contribuer à l'amélioration de la performance environnementale du secteur de l'exploitation des mines d'amiante dans la région de Thetford Mines. La proposition de projet a été approuvée en mai 2010. Le premier rapport provisoire (LMSM 11-040), une revue de la littérature, a été terminé en juillet 2010. Le présent rapport est le deuxième rapport, et il s'agit du rapport final présentant les principales constatations faites lors des deux visites des lieux, ainsi que les résultats des essais de laboratoire en pots.

La revégétalisation peut aider à ralentir, dans les résidus d'amiante laissés à l'abandon, les processus d'érosion qui peuvent, à long terme, détériorer la qualité de l'air, de l'eau et du sol environnants. Le présent projet constitue la phase 1 d'une évaluation en plusieurs phases. La phase 1 comprend la revue de la littérature susmentionnée visant à repérer les lacunes dans les connaissances, et une étude de laboratoire sur la végétalisation de résidus miniers échantillonnés dans des haldes choisies de la région de Thetford Mines.

Dans l'étude de laboratoire, une exposition artificielle à l'eau et à la lumière a été utilisée pour simuler l'érosion pluviale naturelle des résidus miniers nus. Les risques liés à l'érosion découlent principalement de deux phénomènes : la lixiviation (lessivage des résidus du fait de la percolation de l'eau), et la migration du magnésium des haldes de résidus dans le milieu environnant et au-delà. Par ailleurs, on a constaté que le nickel que renferment les résidus reste lié au réseau minéral et ne pollue pas l'eau tant que les résidus demeurent alcalins.

Les essais de laboratoire en pots ont produit des données utiles aux fins d'évaluation des avantages de l'implantation d'un couvert végétal sur les résidus miniers en termes de piégeage du carbone et de fixation de l'azote. Ces essais indiquent que les plantations aident à fixer l'azote et à piéger le dioxyde de carbone. Les traitements les plus efficaces pour la production de biomasse, la fixation de l'azote et le piégeage du carbone ont été déterminés.

Les problèmes chimiques de la revégétalisation ont été clarifiés plus avant et pour la plus grande part bien réglés, les principales difficultés en ce qui concerne l'implantation de couverts végétaux demeurent les caractéristiques physiques des haldes de résidus, principalement les pentes abruptes et la croûte dure formée à la surface. En outre, le risque de relargage des fibres d'amiante que font courir les travaux de revégétalisation demeure à évaluer.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
AVIS DE NON-RESPONSABILITÉ.....	Error! Bookmark not defined.
TABLEAUX	iv
FIGURES.....	iv
ANNEXES	iv
INTRODUCTION.....	1
VOLET EXPÉRIMENTAL.....	3
RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	10
CONCLUSIONS	57
REMERCIEMENTS	60
RÉFÉRENCES.....	61

TABLEAUX

TABLEAU 1. LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE DE SITES CHOISIS AUX FINS D'INVENTAIRE DE LA VÉGÉTATION ET D'ÉCHANTILLONNAGE.	4
TABLEAU 2. MATRICE DES TRAITEMENTS POUR LES ESSAIS EN POTS.	6
TABLEAU 3. INVENTAIRE DE LA VÉGÉTATION À SIX SITES MINIER CHOISIS.	12
TABLEAU 4. TENEUR EN DIVERS ÉLÉMENTS DE TISSUS DE PLANTES RECUEILLIES À DES SITES DE RÉSIDUS MINIER. ...	25
TABLEAU 5. CHIMIE DE L'EAU D'ÉTANG RECUEILLIE AU SITE NORMANDIE.	26
TABLEAU 6. ANALYSE CHIMIQUE DES RÉSIDUS MINIER, DU SOL ORDINAIRE ET DU COMPOST.	26
TABLEAU 7. QUANTITÉ TOTALE D'EAU PERCOLÉE EN 90 JOURS ET DE CARBONE ORGANIQUE LESSIVÉ.	29
TABLEAU 8. POURCENTAGE D'EAU PERCOLÉE EN 90 JOURS DANS LES POTS AVEC COUVERT VÉGÉTAL.	29
TABLEAU 9. QUANTITÉ TOTALE DE NI, FE, MO, MG ET CA LESSIVÉE EN 90 JOURS.	31
TABLEAU 10. HAUTEUR ET POIDS SEC DES PLANTES AU JOUR 90.	43
TABLEAU 11. AZOTE TOTAL DANS LES RÉSIDUS MINIER APRÈS 90 JOURS.	44
TABLEAU 12. AZOTE TOTAL DANS LES PLANTS D'UN POT APRÈS ESSAI DE CROISSANCE DE 90 JOURS.	45
TABLEAU 13. CARBONE TOTAL DANS UN POT APRÈS ESSAI DE CROISSANCE DE 90 JOURS.	46

FIGURES

FIGURE 1. PRINCIPALES ESPÈCES D'ARBRES DANS LA RÉGION DE THETFORD MINES.	11
FIGURE 2. VÉGÉTATION AUTOUR DE LA MINE FLINTKOTE ABANDONNÉE.	14
FIGURE 3. VÉGÉTATION À LA MINE SOUTERRAINE BELL.	15
FIGURE 4. VÉGÉTATION AU SITE DU CTMP SUR DES RÉSIDUS MINIER AMENDÉS AVEC DES BOUES D'ÉPURATION MUNICIPALES.	17
FIGURE 5. VÉGÉTATION AU SITE MINIER BRITISH CANADIAN I.	19
FIGURE 6. VÉGÉTATION AU SITE MINIER KING-BEAVER.	23
FIGURE 7. VÉGÉTATION AU SITE MINIER NORMANDIE.	24
FIGURE 8. PLANTES SUR RÉSIDUS MINIER, RÉSIDUS MINIER RECOUVERTS DE SOL, ET RÉSIDUS MINIER RECOUVERTS DE COMPOST.	38
FIGURE 9. PÉNÉTRATION RACINAIRE DU SOL AUX RÉSIDUS MINIER, ET DU COMPOST AUX RÉSIDUS MINIER.	40
FIGURE 10. LES RACINES CROISSENT LE LONG DE LA PAROI DU CONTENANT MAIS NE PEUVENT PÉNÉTRER PROFONDÉMENT DANS LA PARTIE CENTRALE DES RÉSIDUS MINIER.	42
FIGURE 11. HALDES DE RÉSIDUS MINIER À PENTES ABRUPTES ET VÉGÉTATION.	49
FIGURE 12. ÉROSION DES HALDES DE RÉSIDUS MINIER.	51
FIGURE 13. FRUITS PRODUITS APRÈS 90 JOURS.	56

ANNEXES

ANNEXE A L'ENCEINTE DE TYPE 2 ET LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.	62
ANNEXE B ÉVOLUTION DE LA CHIMIE DES LIXIVIATS ISSUS DES POTS RENFERMANT DES RÉSIDUS MINIER SEULEMENT ET DES POTS RENFERMANT DES RÉSIDUS MINIER AMENDÉS AVEC DU SOL OU DU COMPOST.	63

INTRODUCTION

Le Programme de fermeture des mines et de gestion des risques pour les écosystèmes a reçu pour mandat de proposer un projet contribuant à l'amélioration de la performance environnementale du secteur de l'exploitation des mines d'amiante dans la région de Thetford Mines. La proposition intitulée *Évaluation des risques et des avantages écologiques de la revégétalisation des sites miniers de la région de Thetford Mines – phase 1* a été approuvée en mai 2010. Le premier rapport provisoire (LMSM 11-040), une revue de la littérature, a été terminé en juillet 2010. Le présent rapport est le deuxième rapport, et il s'agit du rapport final, conformément à la planification du projet. Il présente les principales constatations faites lors de l'inventaire de la végétation, ainsi que les résultats des essais de laboratoire en pots.

Le présent projet constitue la phase 1 d'une évaluation en plusieurs phases. La phase 1 comprend les deux premières des quatre principales étapes d'un plan de remise en état d'un site minier. Ces quatre étapes sont :

- 1) Revue de la littérature pour faire le point sur l'état des travaux, repérer les lacunes dans les connaissances et recenser les pratiques optimales.
- 2) Analyse des résidus miniers et étude de techniques de végétalisation en laboratoire. L'étude de laboratoire permet d'estimer les risques au chapitre de l'érosion des résidus nus ainsi que les avantages au chapitre de la préservation de l'eau, du piégeage du carbone et de la fixation de l'azote associés à l'implantation de couverts végétaux. En outre, les essais en pots permettent d'établir les options en matière d'amendement des résidus et d'élucider les facteurs qui déterminent l'efficacité de ces différentes options.
- 3) Application des résultats des essais de laboratoire en pots à des expériences en parcelles sur le terrain. Évaluation pratique des problèmes matériels et logistiques de la remise en état des sites miniers. Une caractérisation exhaustive des différents sites aidera à élaborer des méthodes de remise en état efficaces et économiques.
- 4) Remise en état des sites sur la base des acquis des étapes précédentes.

Les résidus miniers laissés à l'abandon peuvent subir des processus de météorisation qui peuvent, à long terme, détériorer la qualité de l'air, de l'eau et du sol environnants. Leur

végétalisation peut aider à ralentir les processus d'érosion. Cependant, des fibres d'amiante peuvent temporairement être libérées dans l'atmosphère durant les travaux de végétalisation si les haldes de résidus aux pentes abruptes doivent être nivelées ou autrement modifiées avant la plantation. Le présent projet ne traite pas de l'estimation du risque de relargage des fibres d'amiante.

La revue de la littérature a révélé qu'un certain nombre de projets menés dans le passé dans la région de Thetford Mines ont couvert un vaste ensemble de connaissances relatives à la végétalisation des résidus d'amiante. La caractérisation minéralogique et l'analyse physico-chimique des résidus d'amiante ont permis d'élucider les facteurs qui limitent l'établissement de la végétation. Des espèces végétales propices à la revégétalisation ont été trouvées et diverses techniques d'amendement ont été élaborées pour la remise en état des sites à grande échelle. Malgré cela, il faut encore répondre à la question fondamentale suivante :

Vaut-il mieux simplement laisser les haldes de résidus à pentes abruptes en l'état plutôt que de les végétaliser, étant donné les risques associés au relargage des fibres et les coûts et difficultés techniques de la végétalisation?

Pour répondre à cette question, davantage de recherches doivent être réalisées pour connaître les effets à long terme de la météorisation sur les haldes de résidus d'amiante nus. Les risques écologiques potentiels de l'érosion et les avantages de l'implantation d'un couvert végétal en termes de piégeage du carbone et de fixation de l'azote doivent être quantifiés. La présente étude vise précisément à améliorer nos connaissances dans ce domaine.

Vu les ressources limitées et les échéances serrées du présent projet, l'estimation des risques liés à l'érosion se limite à l'étude de l'effet de l'exposition à l'eau et au rayonnement solaire sur la percolation de l'eau et la lixiviation d'éléments préoccupants, comme le nickel et le magnésium. Par ailleurs, l'évaluation des avantages de la végétalisation consiste ici en l'étude de l'effet de l'implantation de couverts végétaux sur la fixation de l'azote et le piégeage du carbone.

VOLET EXPÉRIMENTAL

Le volet expérimental de ce projet comprend un bref inventaire et un échantillonnage de la végétation, un échantillonnage des résidus miniers de sites choisis, ainsi qu'une série d'essais en pots de 90 jours effectués dans une chambre environnementale d'un laboratoire des LMSM.

1. Inventaire de la végétation et échantillonnage

Deux visites sur le terrain ont permis de recueillir de l'information sur l'état actuel de la végétation sur les haldes de résidus et aux alentours dans la région de Thetford Mines. La première visite a eu lieu le 15 juin 2010. Le CTMP (Centre de Technologie Minérale et de Plasturgie inc.) a coordonné les visites d'une mine abandonnée (Flintkote) (site 1), de la zone de surface d'une mine souterraine récemment fermée (Bell) (site 2), et du site du CTMP (site 3) où le CTMP a réalisé des essais de revégétalisation en 1989 en utilisant des boues d'épuration municipales pour amender les résidus.

La seconde visite a eu lieu les 5 et 6 octobre 2010. La Société Asbestos Limitée (SAL) a autorisé l'équipe de RNCAN à accéder à trois de ses haldes de résidus et à y recueillir des échantillons pour analyses en laboratoire. Des membres du personnel de SAL ont accompagné l'équipe de RNCAN durant tout le processus d'échantillonnage. Trois techniciens du CTMP ont participé à l'échantillonnage. Des échantillons en vrac de résidus ont été prélevés à trois sites : British Canadian I (site 4), King-Beaver (site 5), et Normandie (site 6). La latitude et la longitude de ces sites sont indiquées au tableau 1.

La halde Normandie est composée de rejets homogènes issus d'usines d'extraction à sec de l'amiante, et quelques déchets divers, comme du bois d'œuvre et du métal, ont été observés sur la halde. Il y a trace d'une vieille courroie de transporteur au sommet de la halde. Les levés topographiques des haldes de résidus prévus dans le projet initial n'ont pas été effectués étant donné que l'estimation des tailles des haldes pouvait être obtenue d'autres sources, principalement du rapport produit par Nichromet (Nichromet, 2007).

Tableau 1. Localisation géographique de sites choisis aux fins d'inventaire de la végétation et d'échantillonnage.

Site	Nom du site	Localisation de l'échantillonnage	Latitude	Longitude	Altitude
1	Flintkote		46° 07' 53,5" N.	71°16' 12,2" O.	400 m
2	Bell		46° 05' 14,8" N.	71° 17' 54,7" O.	311-327 m
3	CTMP		46° 05' 48,0" N.	71° 18' 54,2" O.	330 m
4	British Canadian I	BC-1, plateau supérieur de la halde	46° 02' 52,6" N.	71° 20' 55,7" O.	330 m
		BC-2, plateau supérieur de la halde	idem	idem	idem
		BC-3, au bas de la halde, du côté du chemin	46° 02' 47,9" N.	71° 20' 55,4" O.	293 m
		BC-3b, échantillon en vrac – essais en pots	46° 02' 48,3" N.	71° 20' 56,1" O.	293 m
		BC-4, au bas de la halde, du côté du chemin	46° 02' 51,1" N.	71° 20' 53,1" O.	295 m
5	King-Beaver	KB-1, plateau supérieur de la halde	46° 04' 25,2" N.	71° 19' 12,6" O.	339 m
		KB-2, sommet de la halde	46° 04' 5,1" N.	71° 19' 35,1" O.	412 m
		KB-3, au bas de la halde près de KB-2	46° 04' 5,4" N.	71° 19' 31,7" O.	376 m
		KB-3b, échantillon en vrac – essais en pots	46° 04' 5,4" N.	71° 19' 31,7" O.	376 m
		KB-4, au bas de la halde	46° 04' 24,0" N.	71° 19' 10,0" O.	301 m
6	Normandie	Au bas de la halde	46° 01' 34,3" N.	71° 25' 3,9" O.	282 m

En tout, 90 kg de mélange en vrac de stériles et de résidus d'amiante de la région de Thetford Mines ont été rapportés au laboratoire le 7 octobre 2010. Dans ces 90 kg d'échantillons, 60 kg étaient des résidus miniers renfermant de l'amiante. Ces échantillons ont été mis dans des sacs doubles scellés en polyéthylène haute densité (PE hd), et ces sacs, dans des contenants fermés en polypropylène. Ces contenants ont été entreposés dans une enceinte de type 2. Les résidus miniers ont été séchés à l'air à l'intérieur de l'enceinte avant d'être utilisés dans les expériences subséquentes. Les questions de santé et de sécurité liées à la manipulation des matières renfermant de l'amiante ont été prises en compte par une analyse du risque lié à la tâche (ART) préparée et approuvée par les LMSM. Les procédures détaillées concernant les mesures techniques et les équipements personnels de protection sont présentées dans le Formulaire d'analyse du risque lié à la tâche, qui est signé et archivé au bureau des Affaires commerciales. L'annexe A présente des photos de l'enceinte et du dispositif expérimental.

2. Essais en pots

Trois légumineuses (trèfle rouge, mélilot jaune, et soja) et deux céréales (seigle d'hiver et orge) ont été mises à l'essai pour voir si elles peuvent être utilisées pour implanter un couvert végétal sur des résidus miniers nus ou des résidus miniers amendés avec du sol ou du compost. Les légumineuses ont été choisies pour étudier leur capacité de fixer l'azote, alors que l'orge et le

seigle d'hiver l'ont été parce que des données antérieures ont montré qu'ils poussent assez facilement sur les sols de serpentine à des températures relativement basses. Dans les travaux de remise en état des sites miniers, on utilise souvent un mélange de trèfle ou mélilot et de seigle d'hiver. Durant l'automne et l'hiver, le seigle d'hiver couvre le sol, piège l'azote du sol et protège la légumineuse. Au printemps, les tiges de seigle offrent aux légumineuses un support qui les aide à croître. La teneur en azote relativement élevée des légumineuses réduit le ratio C:N global des mélanges de seigle et de légumineuse, et accroît la quantité d'azote disponible pour la plantation suivante. Dans cette étude, le trèfle, ou le mélilot, et le seigle sont plantés séparément afin de simplifier les variables pour l'interprétation des résultats.

Après analyse chimique des résidus miniers, il a été décidé d'utiliser seulement ceux de la halde Normandie pour les essais en pots, les échantillons des trois sites présentant des caractéristiques chimiques similaires (tableau 6). Les résidus de la halde Normandie sont considérés comme représentatifs de ceux des deux autres sites.

Préparation des traitements

Le tableau 2 dresse la liste des 11 traitements utilisés pour les essais de croissance. Ces traitements correspondent à diverses conditions, comme résidus nus seulement (traitement 1), résidus couverts de sol (traitement 2) ou de compost (traitement 7), et résidus couverts de sol ou de compost et d'engrais inorganiques additionnels. Les traitements utilisant 250 g de sol seulement ou 250 g de compost seulement (traitements 3 et 4) visaient à obtenir des données de croissance végétale normale (traitements témoins). Dans les traitements 6, 8 et 9, les quantités de N, P et K ajoutées correspondaient à une fertilisation à faible dose, soit 21 g de N/m², 47 g de P/m², et 59 g de K/m². Les traitements 10 et 11 comportaient un ajout de CaSO₄ visant à augmenter le ratio Ca:Mg sans ajout supplémentaire de NPK. Chaque traitement consistait en des pots ensemencés avec l'une des cinq espèces végétales et un pot témoin non ensemencé. Les 150 g de sol ou 150 g de compost ajoutés à la surface des résidus représentent des apports de carbone organique de respectivement 4,25 kg /m² et 5,90 kg /m². Pour le choix de l'amendement azoté, il a été jugé que malgré que l'azote des nitrates soit habituellement facilement lessivé du sol et que l'absorption de nitrate puisse entraîner une hausse du pH à l'interface entre les racines et le sol, il demeurerait préférable d'utiliser du nitrate de calcium étant donné qu'il

y aurait augmentation de l'acidité du fait de la nitrification de l'ammonium en nitrate et qu'un milieu acide est plus dommageable qu'un milieu basique, particulièrement dans cette étude.

Tableau 2. Matrice des traitements pour les essais en pots.

N° du traitement	Résidus (g)	Sol (g)	Compost (g)	Ca(NO ₃) ₂ ·(4H ₂ O) (g)	KH ₂ PO ₄ (g)	CaSO ₄ ·(2H ₂ O) (g)
1	300					
2	300	150				
3		250				
4			250			
5	300	150			13,61	
6	300		150	1,181	1,361	
7	300		150			
8	300		150		1,361	
9	300	150		1,181	1,361	
10	300	150				1,722
11	300		150			1,722

Chaque traitement a été réalisé en double. Tous les traitements ont été préparés avec des produits chimiques de qualité réactif ACS ou de qualité supérieure, et de l'eau doublement désionisée. Par exemple, pour préparer le traitement 1, 300 g de résidus miniers séchés à l'air ont été pesés et mis en pot, 175 g d'eau doublement désionisée ont été ajoutés dans le milieu de croissance, puis le tout a été bien mélangé. L'eau excédentaire a percolé et a été recueillie pour analyse. Les milieux de croissance humides ont été préparés 18 heures avant le semis des graines.

Essais de croissance

Les graines de trèfle rouge (*Trifolium pretense* L.), de mélilot jaune (*Melilotus officinalis* L.), de seigle d'hiver (*Secale cereale* L.), d'orge (*Hordeum vulgare* L. cv. AC Metcalfe), et de soja (*Glycine max* (L.) Merr. cv. Dare) ont été semées directement dans les différents milieux de croissance humides : résidus miniers, sol agricole, compost de déchets de jardin, ou résidus miniers recouverts de sol ou de compost. Pour chaque espèce végétale, 3 g de graines ont été semés dans chaque pot, ce qui correspond à 0,472 kg/m². Le sol agricole a été fourni par la Ferme expérimentale centrale d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, située à Ottawa. Le compost de déchets de jardin a été acheté à la décharge contrôlée du chemin Trail de la ville d'Ottawa.

Des unités de filtration Nalgene[®] MF75 stériles jetables ont été utilisées comme pots. Les unités de filtration utilisées ont un compartiment supérieur d'une capacité de 500 ml, une membrane en polyéthersulfone (PES) à pores de 0,45 µm et un diamètre intérieur de 90 mm (diamètre de la membrane). Les essais de croissance ont été réalisés à une température de 21 ± 1 °C sous un cycle lumière/obscurité de 16 h/8 h dans une chambre environnementale programmable (Convion[®] CMP4030). La source lumineuse consistait en une combinaison d'ampoules à incandescence et de lampes fluorescentes blanc froid.

Chaque essai de croissance a été d'une durée de 90 jours. Après la germination (5 à 7 jours), à chaque jour, 25 ml d'eau doublement désionisée a été ajoutée dans chaque pot. Du jour 31 au jour 90, 50 ml d'eau désionisée a été ajoutée dans chaque pot renfermant des plants de soja, étant donné que le soja avait besoin de plus d'eau que les autres espèces pour croître. Le volume d'eau ajouté a été consigné. Aux jours 1, 30, 60 et 90, les lixiviats de chaque pot ont été recueillis, puis pesés et transférés dans des bouteilles de polypropylène pour entreposage et analyses chimiques futures.

Au moment de la récolte (jour 90), les lixiviats ont été recueillis, pesés et entreposés pour analyse future. Les parties aériennes des plantes ont été coupées, et leur hauteur et leur poids frais ont été mesurés. Les plantes fraîches ont été placées dans des sacs de polypropylène scellés, puis entreposées dans un réfrigérateur en vue de leur traitement futur. Les résidus miniers ont été séparés du sol ou du compost. Les échantillons de résidus miniers, de sol et de compost ont été séchés à l'air sur du papier à l'intérieur de l'enceinte en vue de la détermination de leur pH, de leur teneur en carbone organique total et en azote total, et de leur composition élémentaire totale.

Essais chimiques

Pour les solutions de lixiviat, il y a eu mesure du pH, de la conductivité électrique (CE) et des teneurs en nitrate et en carbone organique dissous (COD), ainsi que des concentrations totales de divers éléments avec un spectromètre de masse à plasma inductif (ICP-MS) et un spectromètre

d'émission atomique à plasma inductif (ICP-AES). Tous les lots ont été analysés conjointement avec des blancs de réactifs, des étalons de référence et une matrice équivalente (HNO_3 à 0,2 % V/V).

Pour les analyses visant les éléments chimiques, en ce qui concerne les tissus végétaux, les parties de plantes fraîches ont été séchées à 80°C pendant 24 h avant digestion acide. En ce qui concerne les échantillons de résidus miniers, de sol et de compost, ils ont été séchés à l'air à la température de la pièce pendant 96 h avant d'être pesés en vue de la digestion acide. La digestion acide a été effectuée avec du HNO_3 concentré qualité métaux traces. Des matériaux de contrôle de la qualité externe (matériau de référence étalon du NIST 1547 – feuilles de pêcher, matériau de référence certifié (sol) – loam A, matériau de référence certifié (sol) – sol sableux B) et interne ont été digérés avec chaque lot.

L'analyse du carbone organique dans le sol, le compost et les résidus miniers a été réalisée à l'aide de la méthode colorimétrique d'oxydation au dichromate. La méthode est présentée dans la procédure opérationnelle normalisée (PON) rédigée par Yonghong Wu (Wu, 2011a). En bref, cette méthode utilise la formation de l'espèce de couleur verte Cr^{III} par suite de la réduction du dichromate (Cr^{VI}), de couleur orange, par le carbone. La quantité de dichromate consommée est déterminée par comparaison avec un ensemble d'étalons, l'absorbance étant mesurée par spectrométrie à la longueur d'onde de 600 nm avec échantillon en cuvette de 10 mm.

L'analyse de l'azote total a été réalisée à l'aide de la méthode d'oxydation au persulfate. Les échantillons solides ont été oxydés avec une solution alcaline de persulfate de potassium dans un autoclave durant 1 h à $1,5 \times 10^5$ Pa (1,5 atm). Les nitrates issus de l'oxydation ont été réduits en ammoniac par l'alliage de Devarda. La méthode colorimétrique au bleu d'indophénol a été utilisée pour mesurer l'ammoniac (Wu, 2011b).

Analyse statistique

La comparaison des moyennes a été réalisée par analyse de la variance avec tests a posteriori de Tukey ($\alpha = 0,05$). Le logiciel SYSTAT® 11 a été utilisé pour l'analyse statistique.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

RÉSULTATS

1. Inventaire de la végétation

Aux six sites visités dans la région de Thetford Mines, sur les sols ordinaires (autres que les résidus d'amiante), les principales espèces d'arbres trouvées sont le sapin baumier (*Abies balsamea*), l'érable à sucre (*Acer saccharum*), le bouleau jaune (*Betula lutea*), le bouleau à papier (*Betula papyrifera*), le genévrier commun (*Juniperus communis*), l'épinette blanche (*Picea glauca*), l'épinette noire (*Picea mariana*), le pin blanc (*Pinus strobus*), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) et la pruche du Canada (*Tsuga canadensis*) (figure 1).

Dans le secteur de la halde de résidus Normandie, le substrat rocheux était recouvert de couches de sable et de gravier dont l'épaisseur variait de 10 à 50 cm. Un petit étang ressemblant à un lac se trouvait à environ 2 km à l'ouest de la halde. Il s'agit d'une fosse de mine à ciel ouvert laissée à l'abandon qui s'était remplie d'eau de pluie. L'eau de cet étang a été échantillonnée et sa composition chimique analysée (tableau 5).

Le tableau 3 dresse la liste des principales plantes vasculaires trouvées sur les haldes et aux alentours durant les deux visites sur le terrain effectuées en juin et en octobre 2010.

Le tableau 4 donne la composition élémentaire des parties de plantes de différentes espèces végétales recueillies aux trois sites.

Le tableau 5 présente les résultats de l'analyse chimique de l'eau de l'étang du site Normandie.

Figure 1. Principales espèces d'arbres dans la région de Thetford Mines.

1a) Vue aérienne de la forêt depuis le sommet d'une halde de résidus de la mine King-Beaver.

46° 04' 5,1" N.; 71° 19' 35,1" O.; altitude : 412 m



1b) Arbres sur sol ordinaire près de la mine British Canadian I.

46° 02' 51,1" N.; 71° 20' 53,1" O.; altitude : 295 m



Tableau 3. Inventaire de la végétation à six sites miniers choisis.

Numérotation des endroits où les espèces ont été trouvées

1 : Aux alentours, sols sur substrat rocheux

2 : Au pied de la halde de résidus

3 : Dans la pente de la halde de résidus

4 : Sur le sommet plat de la halde de résidus

Nom scientifique	Nom commun	Site					
		Flintkote (1) Figure 2	Bell (2) Figure 3	CTMP (3) Figure 4	British Canadian (4) Figure 5	King- Beaver (5) Figure 6	Normandie (6) Figure 7
Arbres et arbustes							
<i>Abies balsamea</i>	Sapin baumier	1	1		1, 2		
<i>Acer negundo</i>	Érable à Giguère		1			1	
<i>Acer saccharum</i>	Érable à sucre					1	
<i>Acer rubrum</i>	Érable rouge					1	
<i>Alnus crispa</i>	Aulne crispé	1, 2	1				
<i>Alnus rugosa</i>	Aulne rugueux		1	3, 4			
<i>Alnus viridis</i>	Aulne vert	1, 2	1	3			
<i>Betula lutea</i>	Bouleau jaune				1	1	
<i>Betula papyrifera</i>	Bouleau à papier	1	1	3, 4	1	1	
<i>Juniperus virginiana</i>	Genévrier de Virginie	1	1	3, 4			
<i>Larix laricina</i>	Mélèze laricin		1		1	1, 2	
<i>Nemopanthus mucronatus</i>	Némopante mucroné	1, 2	1				
<i>Picea glauca</i>	Épinette blanche	1	1		1	1	
<i>Picea mariana</i>	Épinette noire	1	1		1	1	
<i>Pinus strobus</i>	Pin blanc	1	1		1	1	
<i>Populus balsamifera</i>	Peuplier baumier	1	1		1	2, 3	
<i>Populus tremuloides</i>	Peuplier faux-tremble	1	1	3, 4	1, 2	1	
<i>Prunus pensylvanica</i>	Cerisier de Pennsylvanie		1	4	1, 2	2, 3	
<i>Salix sp.</i>	Saule	1	1			2, 3	
<i>Tsuga canadensis</i>	Pruche du Canada		1		1	1	
<i>Viburnum cassinoides</i>	Viome cassinoïde	1			1, 2		
Plantes herbacées							
<i>Achillea millefolium</i>	Achillée millefeuille		1		1, 2		
<i>Agropyron elongatum</i>	Agropyre élevé			3	1, 2		
<i>Agropyron intermedium</i>	Agropyre intermédiaire			3	1, 2		
<i>Aspidotis densa</i>	Aspidote touffue (fougère)				2		
<i>Aster novae-angliae</i>	Aster de Nouvelle-Angleterre		1				
<i>Calamagrostis canadensis</i>	Calamagrostide du Canada		1				
<i>Campanula rotundifolia</i>	Campanule à feuilles rondes	2	1		1		
<i>Carex scirpoidea</i>	Carex faux-scirpe		1	3, 4			
<i>Chenopodium album</i>	Chénopode blanc			4		2	
<i>Cheilanthes siliquosa</i>	Aspidote touffue (fougère)					2	
<i>Festuca glauca</i>	Fétuque bleue	2			1	2	
<i>Festuca scabrella</i>	Fétuque scabre		1		1, 2, 3	2	
<i>Gnaphalium sylvaticum</i>	Gnaphale des bois	2					
<i>Hieracium vulgatum</i>	Épervière vulgaire		1	4			
<i>Hordeum jubatum</i>	Orge queue-d'écureuil		1				
<i>Lactuca scariola</i>	Laitue scariole		1			1, 2	
<i>Leontodon autumnalis</i>	Liondent d'automne		1	4		2	
<i>Ledum groenlandicum</i>	Thé du Labrador					1, 2	
<i>Lolium perenne</i>	Ivraie vivace	2	1	3, 4	1, 2	1	
<i>Lotus corniculatus</i>	Lotier comiculé			4		1, 2	
<i>Maianthemum canadense</i>	Maïanthème de l'intérieur			4			
<i>Medicago sativa</i>	Luzerne cultivée			4		1	
<i>Mellilotus alba</i>	Méillot blanc		1	4	1	1	
<i>Oryzopsis asperifolia</i>	Oryzopsis à feuilles rudes				1, 2		
<i>Poa palustris</i>	Pâturin des marais		1	4	1, 2	1, 2	
<i>Poa pratensis</i>	Pâturin des prés		1	4	1, 2		
<i>Polygonum aviculare</i>	Renouée des oiseaux	2		4			
<i>Polygonum pensylvanicum</i>	Renouée de Pennsylvanie	2	1	4	2		
<i>Prenanthes trifoliolata</i>	Prenanthe trifoliolée			4			
<i>Puccinellia distans</i>	Puccinellie à fleurs distantes				2, 3		

Nom scientifique	Nom commun	Site					
		Flintkote (1) Figure 2	Bell (2) Figure 3	CTMP (3) Figure 4	British Canadian (4) Figure 5	King- Beaver (5) Figure 6	Normandie (6) Figure 7
<i>Rudbeckia serotina</i>	Rudbeckie tardive		1				
<i>Saxifraga virginensis</i>	Saxifrage de Virginie					3	
<i>Scirpus</i> sp.	Scirpe				1, 2		
<i>Senecio pauperculus</i>	Séneçon appauvri			4			
<i>Solidago canadensis</i>	Verge d'or du Canada		1		1, 2, 3	1	1, 2
<i>Solidago hispida</i>	Verge d'or hispide					1	
<i>Solidago randii</i>	Verge d'or de la serpentine	2	1	4	1, 2, 3		
<i>Spergularia rubra</i>	Spergulaire rouge			4			
<i>Stellaria longipes</i>	Stellaire à longs pédicelles			4			
<i>Taraxacum officinale</i>	Pissenlit officinal	1, 2	1	4	1, 2	1	1, 2
<i>Tussilago farfara</i>	Tussilage pas-d'âne		1				
<i>Vicia cracca</i>	Vesce jargeau			4	1, 2		

Figure 2. Végétation autour de la mine Flintkote abandonnée.

46° 07' 53,5" N.; 71° 16' 12,2" O.; altitude : 400 m

2a) Arbres et arbustes sur sol ordinaire.



2b) Faible végétation sur le terrain stérile voisin de l'étang près de la halde de résidus.



2c) Graminées et arbustes près de la base de la halde de résidus.



Figure 3. Végétation à la mine souterraine Bell.

3a) Couvert végétal à la surface de la mine souterraine.

46° 05' 24,3" N.; 71° 18' 32,6" O.; altitude : 311 m



3b) Végétaux sur stériles et morts-terrains près de l'installation de traitement.

46° 05' 24,3" N.; 71° 18' 32,6" O.; altitude : 312 m

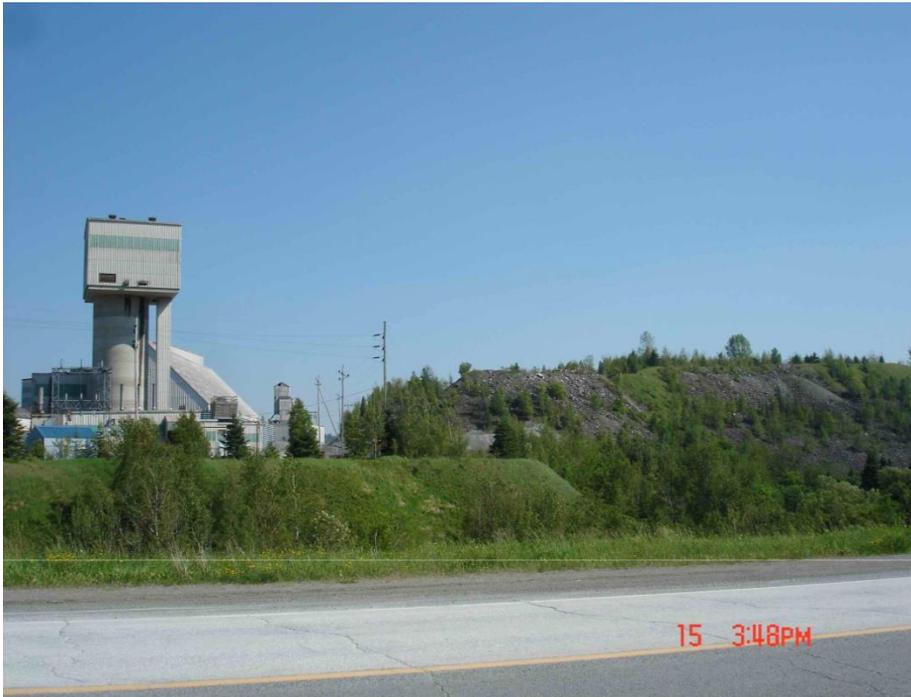


Figure 4. Végétation au site du CTMP sur des résidus miniers amendés avec des boues d'épuration municipales.

46° 05' 48,0" N.; 71° 18' 54,2" O.; altitude : 330 m

4a) Couvert végétal complet comportant des arbres, des arbustes et des graminées, sur la pente et le sommet plat.



4b) Couvert végétal sur terrain plat de résidus miniers amendés avec des boues d'épuration.



4c) Gros plan du couvert végétal.



Figure 5. Végétation au site minier British Canadian I.

5a) Végétation sur sol au pied de la halde de résidus.

46° 03' 8,3" N.; 71° 20' 34,8" O.; altitude : 290 m



5b) Graminées en bordure du cours d'eau coulant au bas de la halde de résidus.

46° 03' 8,3" N.; 71° 20' 34,8" O.; altitude : 290 m



5c) Petit cerisier de Pennsylvanie sur résidus miniers près du pied de la halde.



5d) Arbres et arbustes sur morts-terrains entre les haldes de résidus.

46° 02' 52,6" N.; 71° 20' 55,7" O.; altitude : 330 m



5e) Mousses et plantes vasculaires sur résidus miniers dans la pente de la halde.



5f) Mousses, verges d'or (*Solidago canadensis*), et puccinellies à fleurs distantes (*Puccinellia distans*) poussant de façon éparse sur la pente de la halde de résidus, le long des chenaux formés par l'érosion pluviale.



5g) Puccinellies à fleurs distantes (*Puccinellia distans*) dans des crevasses.



5h) Verges d'or, pissenlits officinaux, fétuque scabre, pâturin et mélèze laricin au pied de la halde de résidus.

46° 02' 48,3" N.; 71° 20' 56,1" O.; altitude : 293 m



Figure 6. Végétation au site minier King-Beaver.

6a) Plantes vasculaires alignées sur la pente.



6b) Petits cerisiers de Pennsylvanie au pied d'une halde à pentes abruptes.



Figure 7. Végétation au site minier Normandie.

7a) Graminées dans la dépression humide proche du pied de la halde de résidus. Les fibres d'amiante blanc sont à la surface.



7b) Cerisier de Pennsylvanie et verges d'or dans des dépressions remplies de gravier meuble près du pied de la halde de résidus.



Tableau 4. Teneur en divers éléments de tissus de plantes recueillies à des sites de résidus miniers.

« s.o. » indique des données non fiables.

Site	Endroit	Espèce	Tissu	Al	Ba	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg		
				$\mu\text{g}\text{g}^{-1}$ (poids sec)										
Normandie	Au bas de la halde	<i>Solidago canadensis</i>	Feuille	889	23,0	10 029	13,2	124	16,2	4473	12 263	48 815		
			Tige	159	23,8	5032	s.o.	20,9	8,33	731	11 737	11 773		
			Racine	752	24,1	2776	12,0	110	19,9	4212	16 185	35 861		
		<i>Prunus pensylvanica</i>	Feuille	379	49,7	11 534	12,3	72,3	9,99	3687	1070	50 352		
			Tige	38	33,0	1466	s.o.	4,72	4,51	214	2591	4925		
			Racine	2693	51,3	2664	21,8	159	11,1	10 569	2172	54 669		
		<i>Juniperus virginiana</i>	Feuille	386	125	11 468	5,69	43,3	4,18	1924	4638	20 567		
			Tige	1295	81,0	5335	19,4	139	8,53	5923	2840	49 267		
			Racine	2693	51,3	2664	21,8	159	11,1	10 569	2172	54 669		
		King-Beaver	KB-1	<i>Larix laricina Populus</i>	Feuille	170	93,5	3643	s.o.	12,2	2,38	698	3087	10 326
					Tige	125	52,9	1904	s.o.	7,01	3,37	426	4588	4085
					Racine	2693	51,3	2664	21,8	159	11,1	10 569	2172	54 669
<i>balsamifera</i>	Feuille			94	38,0	17 297	5,74	7,05	5,89	449	1178	19 870		
	Tige			151	28,1	5799	3,99	14,4	5,43	756	3435	7884		
	Racine			590	30,5	3658	11,5	48,4	5,46	2516	5534	22 182		
<i>Solidago canadensis</i>	Feuille			1817	41,7	16 281	52,3	311	8,25	13 395	5406	135 689		
	Tige			152	24,8	2212	s.o.	12,4	3,71	552	4487	11 388		
	Racine			1082	29,4	4072	16,7	93,9	3,75	5324	4624	45 605		
<i>Viburnum cassinoides</i>	Feuille			1361	117	30 755	28,1	169	5,99	8373	8290	93 051		
	Tige			296	55,8	5571	s.o.	24,9	5,31	1226	4646	18 762		
	Racine			1402	30,5	1778	22,5	109	8,23	5389	6952	49 295		
British Canadian I	BC-1	<i>Festuca scabrella</i>	Feuille	741	9,74	5450	17,5	58,3	8,97	6162	6461	55 839		
			Tige	837	15,6	3436	23,9	91,3	8,99	8353	13 316	55 662		
			Racine	1732	19,6	1690	20,4	60,3	11,3	8125	13 182	41 444		
		<i>Taraxacum officinale</i>	Feuille	800	6,44	1171	47,3	141	12,3	17 103	834	104 164		
			Tige	3205	12,2	803	57,4	189	25,9	25 185	422	125 369		
			Racine	1732	19,6	1690	20,4	60,3	11,3	8125	13 182	41 444		
Site	Endroit	Espèce	Tissu	Mn	Na	Ni	P	S	Si	Sr	Ti	Zn		
				$\mu\text{g}\text{g}^{-1}$ (poids sec)										
Normandie	Au bas de la halde	<i>Solidago canadensis</i>	Feuille	180	17,6	381	2274	1860	890	35,2	9,90	504		
			Tige	46,8	25,6	65,8	893	976	243	33,7	3,26	127		
			Racine	133	75,3	359	1082	1392	925	25,0	9,71	253		
		<i>Prunus pensylvanica</i>	Feuille	202	168	299	674	1022	978	36,3	6,96	420		
			Tige	22,6	16,7	24,4	1427	640	62	10,6	s.o.	143		
			Racine	2693	51,3	2664	21,8	159	11,1	10 569	2172	54 669		
		<i>Juniperus virginiana</i>	Feuille	84,4	8,9	145	1830	840	378	98,2	6,16	281		
			Tige	167	17,7	459	977	524	624	46,7	15,7	362		
			Racine	242	25,6	489	757	257	773	20,1	41,0	53,1		
		King-Beaver	KB-1	<i>Larix laricina</i>	Feuille	27,9	20,2	60,8	446	1158	324	137	4,69	24,8
					Tige	59,9	26,8	55,7	878	643	72	55,1	2,17	24,6
					Racine	2693	51,3	2664	21,8	159	11,1	10 569	2172	54 669
<i>Populus balsamifera</i>	Feuille			54,3	120	57,8	292	1133	150	122	s.o.	453		
	Tige			32,6	9,7	73,9	787	754	155	44,3	2,50	282		
	Racine			89,1	31,3	265	628	828	319	36,5	8,59	226		
<i>Solidago canadensis</i>	Feuille	375	35,0	1236	3515	2540	993	84,4	17,4	38,6				
	Tige	32,6	88,0	63,2	784	1341	193	22,1	2,32	7,35				
	Racine	145	37,4	403	623	870	1205	39,9	18,6	s.o.				
<i>Viburnum cassinoides</i>	Feuille	255	18,8	668	1804	2460	1183	182	14,0	42,3				
	Tige	67,2	107	129	1226	1683	459	54,9	5,20	22,6				
	Racine	160	71,0	486	1626	2029	938	22,5	23,9	51,8				
British Canadian I	BC-1	<i>Festuca scabrella</i>	Feuille	520	202	323	2272	2199	1039	30,5	10,3	13,6		
			Tige	370	191	499	2838	1813	1247	44,8	12,8	s.o.		
			Racine	231	275	318	1517	1838	1463	37,5	28,7	21,6		
		<i>Taraxacum officinale</i>	Feuille	586	126	939	464	799	1588	5,31	9,83	21,7		
			Tige	3205	12,2	803	57,4	189	25,9	25 185	422	125 369		
			Racine	594	129	1190	360	380	1187	4,32	53,3	34,8		

Tableau 5. Chimie de l'eau d'étang recueillie au site Normandie.

pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	COD (mg C/L)	NO ₃ (mg/L)	Cl (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)		
7,4	102,8	25,2	0,8	2,3	< 1,25	1,69		
mg/L	Ca	K	Mg	Na	P	S	Si	
	2,87	< 0,67	13,25	0,564	< 0,17	1,07	5,78	
$\mu\text{g/L}$	Al	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	
	13,2	0,7	0,3	35,1	0,2	5,5	0,7	

2. Analyse chimique des résidus

Le tableau 6 donne le pH, la capacité de rétention d'eau (CRE) et la composition élémentaire des résidus miniers recueillis aux trois haldes. Il donne aussi les résultats de l'analyse chimique du sol agricole de référence et du compost de déchets de jardin. Par rapport au sol ordinaire et au compost de déchets de jardin, tous les résidus miniers présentent un pH élevé (> 9,4) et de faibles teneurs en éléments nutritifs (N, P, K), Ca (< 0,5 mg/g), Ba (< 3 mg/g), Cu (< 4,5 $\mu\text{g/g}$), Na (< 20 $\mu\text{g/g}$) et soufre (< 0,05 mg/g). En outre, ils renferment des teneurs significativement plus élevées en Cr (> 200 $\mu\text{g/g}$), Fe (> 11 mg/g), Mg (> 110 mg/g), Ni (> 1,1 mg/g) et Si (> 0,2 mg/g). Enfin, leur capacité de rétention d'eau (~ 30 %) est plus faible.

Tableau 6. Analyse chimique des résidus miniers, du sol ordinaire et du compost.

Matériau analysé		pH	N	P	K	Ba	Co	Cr	Cu	Mo	Zn
			mg/g	mg/g	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/g}$	mg/g
Résidus	British Canadian I	10,21	0,09	0,002	0,02	0,41	0,05	252	1,94	< Id	11,2
Résidus	King-Beaver	10,17	0,07	0,01	0,31	2,41	0,05	216	2,04	0,04	8,29
Résidus	Normandie	9,44	0,06	0,03	0,09	2,92	0,06	361	4,31	0,07	10,7
Sol	Agriculture Canada	7,15	7,68	0,65	0,82	59,7	2,71	7,81	10,9	1,59	25,9
Compost	Ville d'Ottawa	7,89	7,43	1,29	3,48	38,8	1,79	7,39	12,5	0,39	44,8

Matériau analysé		CRE	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	Na	Ni	S	Si
		%	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g
Résidus	British Canadian I	29 %	0,54	0,19	15,2	118	0,38	0,002	1,14	0,04	0,22
Résidus	King-Beaver	32 %	1,10	0,36	11,5	116	0,26	0,020	1,15	0,05	0,42
Résidus	Normandie	31 %	1,93	0,47	15,1	132	0,39	0,014	1,26	0,04	0,21
Sol	Agriculture Canada	46 %	5,10	13,7	7,47	4,57	0,28	0,159	0,009	1,41	0,09
Compost	Ville d'Ottawa	51 %	3,26	20,4	4,59	4,36	0,19	0,186	0,006	0,79	0,18

3. Analyse des lixiviats

3.1. Les lixiviats sont demeurés alcalins

Le pH des lixiviats issus des pots qui renfermaient des résidus miniers seulement et des résidus miniers recouverts de sol ou de compost n'a pas significativement diminué au cours des essais de croissance de 90 jours. À l'annexe B, on voit que les lixiviats issus des pots renfermant seulement des résidus miniers nus présentent des pH toujours supérieurs à 8,9. C'est aussi le cas pour les pots renfermant des résidus miniers recouverts de sol. Pour les résidus miniers recouverts de compost, dans certains des traitements, le pH n'a que légèrement diminué.

3.2. Les résidus miniers nus retenaient le moins d'eau

L'addition de tous les lixiviats recueillis aux jours 1, 30, 60 et 90 pour chaque pot a permis d'établir la quantité totale d'eau percolée. Comme le montre le tableau 7, les résidus miniers nus, sans recouvrement de sol ou de compost, ont perdu le plus d'eau – 992 g en 90 jours, soit 38,6 % de l'eau ajoutée. Les résidus miniers recouverts de sol ou de compost mais sans plantes ont perdu dans le lixiviat 30,4 % de l'eau ajoutée. Les pots renfermant un couvert végétal n'ont perdu que 12,5 % de l'eau ajoutée. La comparaison de différentes espèces végétales pour ce qui est de la rétention d'eau montre que les trois légumineuses (soja, trèfle rouge et mélilot jaune) ont donné lieu à de plus faible perte d'eau dans le lixiviat que les deux céréales (orge et seigle d'hiver) (tableau 8). Il faut souligner qu'il y a perte d'eau associée à la respiration des plantes dans les pots renfermant un couvert végétal, de sorte que le calcul du bilan hydrique comporte une certaine incertitude.

3.3. La concentration de carbone organique dissous a augmenté en présence d'un couvert végétal

Les lixiviats des pots dans lesquels un couvert végétal a réussi à s'établir ont présenté les plus fortes concentrations de carbone organique dissous (COD). Les lixiviats des résidus miniers

nus ont présenté des concentrations de COD significativement inférieures (tableau 7). La quantité de carbone organique passée dans le lixiviat après 90 jours peut être estimée à l'aide des données de COD et de la quantité mesurée d'eau percolée. Les pots renfermant des résidus miniers recouverts de sol ou de compost ont présenté les plus fortes quantités de carbone organique lessivé, en raison du fait que les résidus ainsi recouverts et ne portant pas de végétation donnent lieu à une plus forte percolation d'eau que ceux qui sont végétalisés.

3.4. Le nitrate ne constitue pas un problème

Après 90 jours, la concentration de nitrate dans les lixiviats issus des pots renfermant des résidus miniers recouverts de sol ou de compost mais sans plantes n'a dans aucun cas dépassé 13 ppm (annexe B), valeur plafond établie dans les recommandations pour la qualité des eaux en vue de la protection de la vie aquatique. Ce même résultat a été obtenu pour la plupart des pots contenant des résidus miniers seulement, sauf pour ceuxensemencés avec des graines de soja. Dans ces pots de résidus nus, les graines de soja ont réussi à germer au début de l'expérience, mais elles n'ont pu croître dans les jours suivants. Cependant, les graines de soja demeurées dans les résidus ont semblé avoir un effet sur la fixation de l'azote et ont donné lieu à un accroissement de la concentration de nitrate dans le lixiviat. Au jour 90, la concentration de nitrate dans le lixiviat a atteint 149 ppm. La cause du phénomène n'est pas encore élucidée. Dans les pots de résidus miniers nus, une couche de mousse verte ou d'algues bleu-vert (cyanobactéries) a été observée. La contribution de la synergie possible entre le soja et la mousse ou les cyanobactéries pour ce qui est de la fixation de l'azote n'est pas été examinée dans la présente étude.

Les résidus miniers nus et les résidus miniers recouverts de sol ou de compost ne donneraient pas lieu à un accroissement significatif de la concentration de nitrate dans le système aquatique.

Tableau 7. Quantité totale d'eau percolée en 90 jours et de carbone organique lessivé.

Les valeurs sont les moyennes des répétitions. Les valeurs d'une même colonne suivies de la même lettre (a, b, c) en exposant ne diffèrent pas au niveau de signification de 0,05, selon l'analyse de variance avec tests a posteriori fondés sur la méthode de Tukey.

Pots	Eau percolée en 90 jours (%)	Eau percolée en 90 jours (g)	COD lessivé (mg/L)	Carbone organique total lessivé en 90 jours (mg)
Résidus miniers seulement	38,6 % ^a	992 ^a	7,85 ^a	7,78 ^a
Résidus + sol, Résidus + compost, sans plantes	30,4 % ^a	655 ^b	121 ^b	79,4 ^b
Avec couvert végétal	12,5 % ^b	339 ^c	160 ^b	54,3 ^b

Tableau 8. Pourcentage d'eau percolée en 90 jours dans les pots avec couvert végétal.

Les valeurs d'une même colonne suivies de la même lettre (a, b, c) en exposant ne diffèrent pas au niveau de signification de 0,05, selon l'analyse de variance avec test T de Tukey.

Espèce végétale	Eau percolée en 90 jours (%)
Trèfle rouge	10,6 % ^a
Mélicot jaune	10,6 % ^a
Orge	16,2 % ^b
Seigle d'hiver	16,5 % ^b
Soja	8,79 % ^a

3.5. Lessivage des métaux

À partir de la quantité de lixiviat mesurée aux jours 1, 30, 60 et 90 et des concentrations élémentaires établies par ICP-AES et ICP-MS, on peut calculer la quantité totale des éléments (p. ex. Ni, Fe, Mo, Mg et Ca) qui a été libérée dans la phase liquide en 90 jours. La comparaison des résultats des pots renfermant des résidus miniers nus seulement avec ceux des pots de résidus miniers recouverts de sol ou de compost et avec ceux des pots avec

couvert végétal établi permet d'évaluer si l'amendement des résidus miniers aurait un impact sur le transfert de métaux de la phase solide vers la phase liquide. Le tableau 9 donne la quantité totale calculée de Ni, Fe, Mo, Mg et Ca qui a été lessivée dans l'eau en 90 jours.

En ce qui concerne le Ni, un des traitements (traitement 5) a donné lieu à une concentration extrêmement élevée dans le lixiviat ($> 840 \mu\text{g}$). Ce traitement était caractérisé par le plus fort ajout de KH_2PO_4 comme engrais (13,61 g par pot, ce qui représente 473 g de P/m^2 et 594 g de K/m^2) et par les lixiviats présentant les plus bas pH (6,89-7,14) par rapport aux autres traitements. Les bas pH pourraient avoir accru la dissolution dans l'eau du Ni présent dans les résidus miniers, et le phosphate ajouté pourrait avoir formé des précipités avec le Mg et d'autres éléments, ce qui aurait libéré du Ni de la matrice minérale $[(\text{Mg},\text{Fe},\text{Ni},\text{Al},\text{Zn},\text{Mn})_2-3(\text{Si},\text{Al},\text{Fe})_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$.

Tableau 9. Quantité totale de Ni, Fe, Mo, Mg et Ca lessivée en 90 jours.

Description des pots	Traitement	Espèces végétales	Ni (µg)	Fe (µg)	Mo (µg)	Mg (mg)	Ca (mg)
Résidus seulement	1	Aucune	2,21	7,03	3,98	104	1,23
Résidus miniers avec graines	1	Trèfle rouge, mélilot jaune	26,4	17,7	4,31	136	1,97
		Seigle d'hiver, orge	19,6	14,6	4,66	227	2,27
		Soja	11,1	14,5	3,09	162	1,65
Résidus miniers + sol	2	Trèfle rouge	5,19	15,7	2,44	59,9	0,74
		Mélilot jaune	3,43	1,10	3,13	41,8	0,87
		Seigle d'hiver	7,80	11,3	4,99	127	1,50
		Orge	6,88	1160	4,24	98,6	1,72
		Soja	9,48	13,3	4,09	132	1,96
		Aucune	7,55	12,52	10,36	151	2,44
Sol seulement	3	Trèfle rouge	6,44	506	6,65	77,1	84,8
		Mélilot jaune	5,73	568	10,1	18,3	87,3
		Seigle d'hiver	11,1	795	56,6	22,6	108
		Orge	16,5	1202	202	25,2	180
		Soja	13,1	1300	0,96	29,6	96,2
		Aucune	5,23	581	97,8	20,4	93,0
Compost seulement	4	Trèfle rouge	4,24	219	5,43	4,49	20,5
		Mélilot jaune	3,34	230	6,45	4,11	20,4
		Seigle d'hiver	12,4	1054	15,1	5,12	55,4
		Orge	21,2	1845	46,4	13,0	96,0
		Soja	11,9	875	0,50	17,4	97,3
		Aucune	8,51	756	45,8	10,6	49,8
Résidus + sol + KH ₂ PO ₄ abondant	5	Trèfle rouge	1077	193	19,3	55,7	48,8
		Mélilot jaune	846	294	41,4	50,4	33,4
		Seigle d'hiver	1267	252	49,6	50,4	8,04
		Orge	910	123	32,7	45,5	5,94
		Soja	971	203	15,2	57,5	6,24
		Aucune	900	53	150	110	9,39
Résidus + compost + N, P, K, Ca	6	Trèfle rouge	9,04	7,45	0,60	82,3	2,23
		Mélilot jaune	13,1	14,1	1,42	72,8	3,54
		Seigle d'hiver	19,5	19,1	2,25	92,0	2,13
		Orge	5,02	5,76	0,42	70,2	1,94
		Soja	19,9	17,0	1,22	88,9	3,63
		Aucune	79,2	13,9	5,43	126	6,51
Résidus + compost	7	Trèfle rouge	5,40	2,90	3,54	34,1	0,49
		Mélilot jaune	1,15	1,51	3,14	26,0	0,63
		Seigle d'hiver	20,2	28,0	7,95	128	1,91
		Orge	8,57	11,1	1,61	68,3	2,03
		Soja	11,5	11,7	3,72	105	1,46
		Aucune	8,21	13,93	3,08	115	3,32
Résidus + compost + KH ₂ PO ₄ peu abondant	8	Trèfle rouge	9,62	5,88	3,74	36,6	22,0
		Mélilot jaune	8,35	3,37	9,26	62,5	109
		Seigle d'hiver	13,0	14,8	4,93	78,9	18,9
		Orge	12,8	15,6	9,56	46,7	18,4
		Soja	21,0	20,8	9,84	69,8	14,7
		Aucune	17,0	11,4	15,1	100	37,7
Résidus + sol + N, P, K, Ca	9	Trèfle rouge	10,5	4,07	1,24	87,4	4,19
		Mélilot jaune	8,94	2,77	0,93	86,7	5,28
		Seigle d'hiver	12,3	6,00	1,84	83,7	6,22
		Orge	6,93	3,01	0,96	56,2	1,59
		Soja	20,1	14,8	1,92	67,4	5,72
		Aucune	215	57,8	22,2	1237	66,8
Résidus + sol + CaSO ₄	10	Trèfle rouge	8,69	12,2	6,25	178	6,19
		Mélilot jaune	6,03	10,7	4,89	114	7,96
		Seigle d'hiver	14,5	21,3	11,3	199	14,5
		Orge	12,0	36,1	11,8	193	19,6
		Soja	11,5	22,4	5,40	180	11,3
		Aucune	26,4	25,8	14,0	282	17,3
Résidus + compost + CaSO ₄	11	Trèfle rouge	5,98	8,25	3,35	63,1	3,84
		Mélilot jaune	9,36	11,4	3,12	73,8	10,2
		Seigle d'hiver	41,0	23,6	16,3	290	3,40
		Orge	41,0	12,8	11,2	141	6,32
		Soja	12,0	12,2	5,73	127	10,2
		Aucune	22,4	25,8	24,0	268	4,84

Bien que les résidus miniers nus renferment une forte concentration de Ni, les lixiviats issus des pots renfermant des résidus seulement (sauf pour ceux du traitement 5) n'ont pas présenté de fortes concentrations de ce métal, probablement parce que le pH est demeuré élevé dans les phases solide et liquide. Les graines semées dans les résidus nus n'ont pas produit de plants, mais elles ont donné lieu à un accroissement de la quantité de Ni lessivée dans l'eau. Si l'on exclut les traitements témoins consistant en sol ou compost seulement, les résidus nus sans graines et les résidus recouverts de sol ou de compost avec couvert végétal de mélilot jaune ou de trèfle rouge ont présenté les plus faibles concentrations de Ni dans le lixiviat.

En ce qui concerne le Mg, les plus fortes quantités lessivées ont été observées dans les traitements avec CaSO_4 . En particulier, le lixiviat du traitement 11 (résidus recouverts de compost avec ajout de CaSO_4) avec couvert végétal de seigle d'hiver a renfermé le plus de Mg (290 mg en 90 jours). Les lixiviats du traitement 10 (résidus recouverts de sol avec ajout de CaSO_4) ont aussi renfermé des quantités importantes de Mg, soit de 114 mg, pour le mélilot jaune, à 199 mg, pour le seigle d'hiver. Fait intéressant, bien qu'un couvert végétal ne puisse s'établir dans les pots renfermant seulement des résidus miniers nus, les graines semées dans les pots semblent avoir eu pour effet d'accroître le lessivage du Mg. Dans le traitement avec graines de seigle d'hiver et d'orge, il y a eu établissement de plants rabougris sur les résidus, et la quantité de Mg lessivée (227 mg) a été supérieure à celles observées dans les traitements avec graines de soja (162 mg) et graines de trèfle rouge et de mélilot jaune (136 mg). On peut supposer que le processus d'échange ionique entre le Mg et le Ca pourrait contribuer à la libération du Mg. D'autres études seront nécessaires pour élucider le mécanisme de biolessivage du Mg associé aux graines de végétaux, particulièrement le seigle d'hiver, l'orge et le soja, ou d'accroissement du lessivage par la mousse ou les cyanobactéries.

En ce qui concerne le Ca, dans les traitements avec résidus miniers, l'ajout de KH_2PO_4 comme engrais a accru la libération de ce métal dans le lixiviat. L'abaissement du pH de la solution pourrait contribuer à cet effet. L'analyse de régression révèle qu'il y a corrélation entre le pH du lixiviat et la quantité totale de Ca libérée :

$$\text{Ca total lessivé (mg)} = -41\,927,5 \text{ pH} + 378\,900, R^2 = 0,47$$

En ce qui concerne le Fe, les résidus miniers renfermaient en général davantage de ce métal que le sol ou le compost (tableau 6). Cependant, il y a eu plus de Fe libéré dans le lixiviat des pots renfermant seulement du sol ou du compost que dans celui des pots renfermant des résidus miniers. Le Fe de la matrice de sol ou de compost est plus facilement dissous que celui qui est piégé dans le réseau minéral des résidus miniers.

En ce qui concerne le Mo, les principales sources de ce métal sont le sol et le compost. La plantation d'orge dans le sol ou le compost semble avoir accru la libération de Mo dans l'eau. Il faut toutefois être prudent dans l'interprétation des données concernant le Mo, particulièrement dans le cas des traitements avec ajout de KH_2PO_4 . Dans l'analyse chimique des lixiviats par ICP-MS, les combinaisons Ar + Mn et Ar + K + O interfèrent dans la détermination de la quantité de Mo^{95} . Par conséquent, les données concernant le Mo ne doivent pas être considérées comme fiables d'ici à ce qu'une vérification soit effectuée.

4. Analyse des plantes et des résidus miniers

4.1. Survie des plantes

Les cinq espèces de plantes ont pu former un couvert végétal sur les résidus miniers recouverts de sol ou de compost de déchets de jardin. Dans les résidus miniers nus humides, les graines de trèfle rouge, de mélilot jaune et de soja ont pu germer mais n'ont pu produire de plantes. De la mousse et/ou des cyanobactéries se sont établies à la surface des résidus du fait de l'ajout quotidien d'eau durant toute la période de croissance. Le seigle d'hiver et l'orge ont réussi à germer, et certaines graines ont produit des plants rabougris qui ont fini par cesser de croître (figure 8).

Bien que les cinq espèces végétales aient réussi à pousser sur les résidus miniers recouverts de sol ou de compost, les racines ont peu pénétré dans la couche de résidus (figure 9). Les expériences ont été conçues de façon à ce que le sol ou le compost reposent sur les résidus

sans y être mélangés, de sorte que la pénétration des racines depuis la couche de sol ou de compost jusqu'aux résidus puisse être observée. La profondeur des racines dans la partie centrale de la couche de résidus n'a pas dépassé 2,5 cm dans la plupart des pots, sauf dans ceux renfermant du soja. Dans l'espace entre la paroi du contenant et les résidus meubles, les racines ont poussé plus profondément vers le fond du contenant. Le soja est la plante qui a le système racinaire le plus fort (figure 10).

4.2. Production de biomasse et hauteur des plantes

Le tableau 10 donne la hauteur des plantes au jour 90, ainsi que le poids sec de l'entièreté de leurs parties aériennes. Les valeurs de hauteur et de poids sec pour tous les traitements avec couche de sol ou de compost ne présentent aucune différence statistiquement significative entre traitements, mais des différences qualitatives sont observées.

En ce qui concerne les trois légumineuses (trèfle rouge, mélilot jaune et soja), la plus forte production de biomasse a été observée dans les traitements avec résidus miniers recouverts de compost. L'ajout d'une forte quantité de KH_2PO_4 (traitement 5) semble réduire la croissance, probablement parce que le KH_2PO_4 fait précipiter le Ca et diminue le pH, d'où une réduction de la disponibilité de Ca et un accroissement de la disponibilité de Ni, métal phytotoxique. Les analyses des éléments dans les tissus semblent avoir confirmé cette hypothèse. Par exemple, dans le traitement 5, le trèfle rouge renfermait 3,27 mg de Ca/g dans la plante entière tandis que dans les autres traitements avec compost, la teneur était dans tous les cas supérieure à 15 mg/g. Pour le Ni, le traitement 5 a donné une teneur de 3,97 $\mu\text{g/g}$ dans la plante tandis que les autres traitements avec compost ont donné des teneurs inférieures à 2,56 $\mu\text{g/g}$.

En ce qui concerne les céréales (seigle d'hiver et orge), la plus forte production de biomasse a été observée dans le traitement 9, où les résidus miniers étaient couverts de sol et faiblement amendés d'engrais NPK.

L'effet du Mg et du Ni présents dans les résidus miniers sur la production de biomasse végétale n'est pas évident. Il n'y a pas de corrélation significative entre le poids sec des

plantes et la concentration de Mg ou de Ni dans les résidus, sauf dans le cas du seigle d'hiver. La relation entre la production de seigle et la teneur en Mg ou en Ni des résidus peut être exprimée comme suit :

$$\text{Poids sec de seigle d'hiver (g)} = 0,009253 * [\text{Mg dans les résidus (mg/g)}] + 2,457, R^2 = 0,53$$

$$\text{Poids sec de seigle d'hiver (g)} = 0,000923 * [\text{Ni dans les résidus (}\mu\text{g/g)}] + 2,483, R^2 = 0,53$$

Ce résultat corrobore la conclusion de Moore et Zimmermann (1975) suivant laquelle l'ivraie vivace (pouvant comprendre de l'ivraie multiflore) est parmi les graminées qui s'établissent le mieux sur les résidus d'amiante. Cette céréale pourrait disposer d'un mécanisme lui permettant de tolérer le Mg et le Ni et donc de survivre sur des sols riches en ces métaux.

4.3. Corrélation entre les concentrations élémentaires dans les plantes et dans le sol et les résidus miniers

Une fois coupées les parties aériennes des plantes, les milieux de croissance (sol, compost et résidus miniers) ont été traités de manière à en retirer les racines et à séparer les résidus miniers du sol ou du compost. Le sol ou le compost et les résidus miniers, tous séchés à l'air, ont été digérés à l'acide, et leur composition élémentaire a été analysée.

L'analyse par régression linéaire a révélé les points suivants :

1) Dans le soja, la teneur des feuilles en phosphore (P) est fortement corrélée positivement avec la teneur en P des résidus miniers ($R^2 = 0,90$) et du sol ($R^2 = 0,74$). La teneur en phosphore des gousses du soja n'est que modérément corrélée avec la teneur en P du sol ($R^2 = 0,56$). Des résultats similaires sont obtenus pour le potassium (K).

2) En général, la concentration de P dans les plantes est positivement corrélée avec la teneur en P des résidus miniers ($R^2 = 0,54$). Cependant, la teneur en K des tissus végétaux n'est corrélée qu'avec la teneur en K du sol, et non avec celle des résidus miniers.

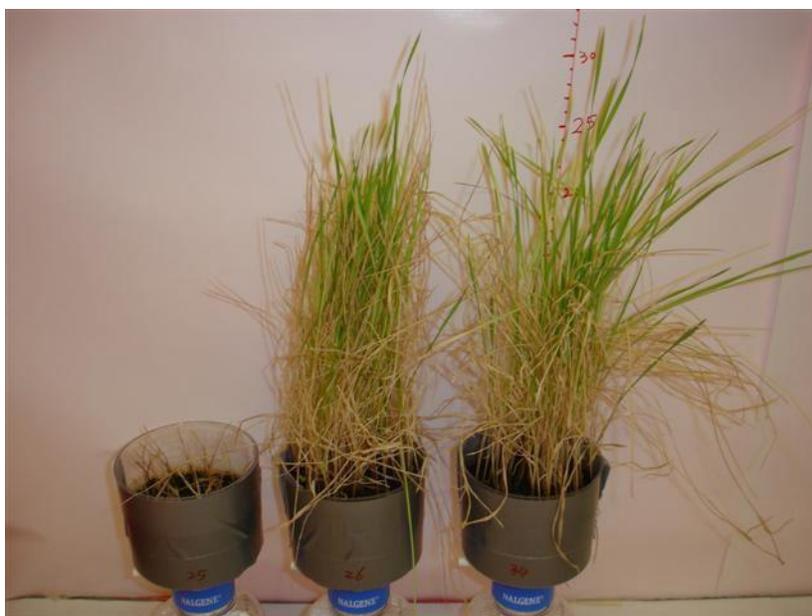
- 3) La concentration de calcium (Ca) dans les résidus miniers influence sur celle observée dans les tiges du soja ($R^2 = 0,49$).
- 4) Il n'y a pas de corrélation significative entre la teneur en magnésium (Mg) des tissus végétaux et celle du sol ou des résidus miniers.
- 5) Les teneurs en nickel (Ni), en cobalt (Co) et en chrome (Cr) des gousses du soja sont corrélées positivement avec les teneurs en Ni, Co et Cr des résidus miniers (tous les $R^2 = 0,51$).

Figure 8. Plantes sur résidus miniers, résidus miniers recouverts de sol, et résidus miniers recouverts de compost.

8a) Le mélilot jaune n'a pas réussi à pousser sur les résidus miniers nus (à gauche) mais a bien poussé sur les résidus miniers recouverts de sol (au milieu) ou de compost (à droite).



8b) Le seigle d'hiver a faiblement poussé sur les résidus miniers nus (à gauche) mais a très bien poussé sur les résidus miniers recouverts de sol (au milieu) ou de compost (à droite).



8c) Survie des graines dans les résidus miniers nus.

Trèfle rouge



Mélilot jaune



Soja



Seigle d'hiver



Orge



Figure 9. Pénétration racinaire du sol aux résidus miniers, et du compost aux résidus miniers.

9a) Pénétration racinaire du sol aux résidus miniers.



Root Penetration from Soil to Tailings

TRADUCTION DU TEXTE DE LA FIGURE 9a

Red Clover = Trèfle rouge

Yellow Clover = Mélilot jaune

Soybean = Soja

Winter Rye = Seigle d'hiver

Barley = Orge

Pénétration racinaire du sol aux résidus miniers

9b) Pénétration racinaire du compost aux résidus miniers.



Red Clover

Yellow Clover

Soybean



Winter Rye

Barley

Root Penetration from Compost to Tailings

TRADUCTION DU TEXTE DE LA FIGURE 9b

Red Clover = Trèfle rouge

Yellow Clover = Mèlilot jaune

Soybean = Soja

Winter Rye = Seigle d'hiver

Barley = Orge

Pénétration racinaire du compost aux résidus miniers

Figure 10. Les racines croissent le long de la paroi du contenant mais ne peuvent pénétrer profondément dans la partie centrale des résidus miniers.

Les photos ont été prises après retournement des pots sur la table une fois coupées les parties aériennes des plantes. Les résidus miniers se trouvent donc sur le dessus, et le compost en dessous.



TRADUCTION DU TEXTE DE LA FIGURE 10

Red Clover = Trèfle rouge
Yellow Clover = Mélilot jaune
Soybean = Soja
Winter Rye = Seigle d'hiver
Barley = Orge

Tableau 10. Hauteur et poids sec des plantes au jour 90.

Toutes les hauteurs sont la moyenne des hauteurs des plants de chaque pot. Tous les poids secs sont la moyenne des poids secs pour les pots répétés.

	Trèfle rouge	Mélilot jaune	Seigle d'hiver	Orge	Soja
Traitement	Hauteur du plant entier (cm)				
1	0	0	4,8	6,3	0
2	9,6	17,2	24,8	36,8	40,8
3	12,9	19,1	30,2	38,7	44,5
4	12,6	21,3	34,0	40,9	43,1
5	19,8	19,5	28,1	38,5	48,1
6	13,7	22,8	31,2	36,5	49,5
7	11,7	17,9	26,9	41,2	39,4
8	16,8	18,1	26,0	33,3	53,0
9	18,7	26,2	31,2	34,0	49,5
10	15,4	22,4	26,7	33,1	55,1
11	21,1	23,1	34,0	39,4	50,5
Traitement	Poids sec (g)				
1	0	0	0,882	0,104	0
2	4,839	4,670	4,314	3,569	12,918
3	4,303	5,369	2,710	3,095	12,774
4	5,812	5,898	2,319	3,154	11,728
5	4,213	4,979	3,892	5,287	13,467
6	5,740	4,373	4,294	5,528	12,795
7	6,014	5,679	2,886	3,128	15,563
8	5,536	4,948	3,487	4,004	11,577
9	5,672	5,534	6,165	5,837	13,597
10	4,322	4,980	3,437	4,324	11,991
11	5,797	5,127	2,807	4,369	10,948

5. Analyse de l'azote

Il est important de répondre à la question de savoir si l'implantation d'une végétation sur les haldes de résidus miniers peut contribuer à établir une forte concentration d'azote dans les résidus de façon à y améliorer les conditions nutritives et à éventuellement permettre le maintien à long terme d'un couvert végétal.

Le tableau 11 donne la concentration d'azote total (N_t) dans les résidus échantillonnés après la période de croissance de 90 jours. Ces résidus sont soit des résidus nus, soit des résidus recouverts de sol ou de compost avec ou sans végétation établie.

Tableau 11. Azote total dans les résidus miniers après 90 jours.

Les valeurs sont les moyennes avec les plages de valeurs associées (minimum-maximum).

Traitement	Espèce végétale	Milieu de croissance	N_t (mg de N/g)
1	Aucune	Résidus seulement	0,07 (0,05-0,08)
2, 5, 9, 10	Aucune	Résidus + sol	0,09 (0,07-0,12)
6, 7, 8, 11	Aucune	Résidus + compost	0,13 (0,12-0,14)
9	Soja	Résidus + sol	0,22 (0,19-0,25)
11	Mélilot jaune	Résidus + compost	0,19 (0,18-0,20)
2	Soja	Résidus + sol	0,19 (0,17-0,21)
2	Trèfle rouge	Résidus + sol	0,15 (0,14-0,16)

Si on laisse les résidus nus intacts, avec le temps (90 jours) et avec l'exposition au rayonnement solaire et l'ajout d'eau dont une partie percole, la concentration restante d'azote total est très faible (0,07 mg/g). Si les résidus sont recouverts de sol, la concentration d'azote dans les résidus augmente légèrement, mais pas significativement, à 0,09 mg/g. Les résidus recouverts de compost présentent une teneur élevée en azote (0,13 mg/g) par rapport aux résidus nus.

La plantation de végétaux semble aider à fixer l'azote, les résidus miniers de tous les pots avec couvert végétal présentant des concentrations d'azote de 0,14 mg/g ou plus. La

plantation de soja dans du sol recouvrant les résidus miniers semble pouvoir accroître la concentration d'azote total dans les résidus à plus de 0,17 mg/g. Une autre option serait la plantation de mélilot jaune dans du compost recouvrant les résidus miniers.

La quantité totale d'azote présente dans les tissus végétaux après 90 jours est estimée par multiplication du poids sec du matériel végétal présent dans un pot par la concentration de N_t dans ce matériel (mg de N/g) (tableau 12). Le soja a fixé le plus d'azote, et le seigle d'hiver, le moins.

Tableau 12. Azote total dans les plants d'un pot après essai de croissance de 90 jours.

Traitement	Espèce végétale	N_t (mg de N/pot)
8	Soja	247,0
6	Soja	244,6
7	Soja	240,9
2	Soja	237,3
9	Trèfle rouge	126,5
8	Trèfle rouge	104,7
6	Mélilot jaune	107,4
8	Mélilot jaune	105,2
6	Orge	81,5
5	Seigle d'hiver	26,5
1	Aucune	19,2

6. Analyse du carbone

La teneur en carbone organique du sol, du compost, des résidus miniers et des tissus végétaux a été estimée à l'aide de la méthode colorimétrique d'oxydation au dichromate. De plus, les concentrations totales de carbone organique dans les tissus végétaux digérés à l'acide ont été mesurées pour valider les résultats de la méthode d'oxydation au dichromate. La somme des quantités de carbone organique présentes dans les résidus miniers, le sol ou le compost et les parties aériennes des plantes de chaque pot donne une estimation de la quantité totale de carbone organique fixée dans chaque pot en 90 jours (tableau 13a).

La biomasse des plantes ne représente qu'une fraction du poids sec du sol ou du compost (150 g). Par conséquent, au tableau 13a, on voit que la quantité de carbone organique dans les pots avec couvert végétal n'est pas statistiquement différente de celle présente dans les pots avec couvert de sol ou de compost mais sans plantes. La teneur en carbone organique des résidus miniers n'est que de 5 % de celle du sol ou du compost.

Pour ce qui est des différences entre espèces végétales, le soja a fixé le plus de carbone organique, suivi du trèfle rouge et du mélilot jaune. Le seigle d'hiver et l'orge en ont fixé le moins (tableau 13b).

Tableau 13. Carbone total dans un pot après essai de croissance de 90 jours.

Les valeurs d'une même ligne suivies de la même lettre (a, b, c) en exposant ne diffèrent pas au niveau de signification de 0,05, selon l'analyse de variance avec tests a posteriori fondés sur la méthode de Tukey.

13a) Carbone organique total (CO_t) fixé dans un pot en 90 jours.

Pots	Résidus seulement	Résidus + sol ou résidus + compost sans plantes	avec plantes
CO _t fixé (g)	1,59 ^a	32,4 ^b	34,2 ^b

13b) Carbone organique total (CO_t) fixé par les parties aériennes des plantes dans un pot en 90 jours.

Espèce	Trèfle rouge	Mélilot jaune	Seigle d'hiver	Orge	Soja
CO _t fixé (g)	0,89 ^a	0,89 ^a	0,41 ^b	0,52 ^b	2,17 ^c

13c) Carbone organique total (CO_t) fixé par chaque type de matériel dans un pot en 90 jours.

Matériel	Compost	Sol	Résidus	Plantes
CO_t fixé (g)	37,8	27,0	1,87	0,98

DISCUSSION

1. Observation des travaux antérieurs de revégétalisation

Les projets de revégétalisation réalisés dans les années 1970 (étude de Moore et Zimmermann) et 1980 (étude du CTMP) et d'autres projets épars non identifiables menés par les sociétés minières dans le passé ont porté des fruits après des décennies. Comme l'ont révélé les deux visites sur le terrain, des couverts végétaux étaient établis autour des haldes de résidus, principalement sur des étendues plates ou légèrement en pente de résidus miniers meubles, ou sur des stériles et des morts-terrains recouvrant des résidus miniers, là où une rétention d'humidité était possible (figures 3b, 4a, 5b, 5f, 6a, 7a). Il y a des couverts végétaux épars sur les haldes à pente assez abruptes, notamment au site King-Beaver (figure 6). À ce site, des saules, des verges d'or et occasionnellement des cerisiers de Pennsylvanie sont présents sur les pentes. Les petits îlots de végétation présents sur les pentes sont confinés aux rigoles et aux dépressions formées par l'érosion pluviale et éolienne des résidus meubles. Les espèces survivant sur les pentes sont des plantes herbacées envahissantes (verge d'or) et des arbres envahissants (cerisier de Pennsylvanie), et occasionnellement d'autres arbres (saule et peuplier baumier).

On ne trouve que rarement un couvert végétal bien établi sur les haldes de résidus à pentes abruptes couvertes d'une croûte dure, comme celles du site British Canadian I (figure 11a). Les haldes de résidus de ce dernier site sont probablement celles qui présentent les plus forts angles de repos dans la région. Cependant, des couverts végétaux ont été observés sur plusieurs pentes orientées au sud (figures 11b, 11c). Aucune information ne précise clairement si ces couverts végétaux sont issus d'une colonisation naturelle ou de projets de végétalisation.

Les caractéristiques physiques des haldes de résidus, principalement leurs pentes abruptes et la croûte dure se formant à la surface, demeurent les principaux problèmes en ce qui concerne la végétalisation des résidus miniers.

Figure 11. Haldes de résidus miniers à pentes abruptes et végétation.

11a) Halde à pentes abruptes de résidus miniers nus à la mine British Canadian I.



11b) Végétation sur la halde de résidus à pentes abruptes à la mine British Canadian I.



11c) Couverts végétaux sur certaines pentes à la mine LAB Chrysotile.**2. Risques liés à l'érosion des haldes de résidus miniers**

La revue de la littérature a indiqué que les résidus miniers étaient habituellement entassés en amas de 30 à 110 m de hauteur de forme conique et à pentes abruptes de 35° à 40°, et que ces haldes renferment encore des quantités importantes de fibres d'amiante. Ces haldes de résidus d'assez grande taille sont préoccupantes à long terme, étant donné que dans certaines circonstances, elles pourraient libérer des fibres dans l'environnement. L'érosion éolienne et pluviale des résidus pourrait libérer des fibres d'amiante dans l'air et dans l'eau, ce qui présenterait des risques potentiels pour la santé des personnes vivant aux alentours. Durant notre visite des sites miniers de la région de Thetford Mines, nous avons vu sur les haldes de résidus des rigoles et des dépressions où apparaissent à la surface des fibres d'amiante blanc, signe évident d'érosion pluviale et éolienne (figure 12).

L'érosion pluviale est aussi préoccupante parce que l'eau peut se trouver contaminée par des métaux lourds du fait de la météorisation et du lessivage.

Figure 12. Érosion des haldes de résidus miniers.

12a) Érosion pluviale en nappe à la surface de la halde de résidus à la mine British Canadian I.



12b) Érosion en rigoles sur les pentes de la halde de résidus à la mine British Canadian I.



12c) Résidus de chrysotile, blancs et friables, flottant à la surface d'un terrain marécageux près de la base de la halde de résidus Normandie.



12d) Des fibres d'amiante sont visibles à la surface du sommet des haldes de résidus à pentes abruptes de la mine King-Beaver.



12e) Érosion en rigoles et accumulation de fibres d'amiante au site de la mine King-Beaver.

Le présent projet ne comprend pas l'estimation du risque de relargage de fibres dans l'air et ne porte que sur l'effet de l'exposition à l'eau et au rayonnement solaire sur la percolation de l'eau et le lessivage d'éléments préoccupants, principalement le nickel et le magnésium.

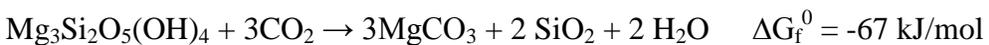
Dans cette étude sur l'exposition à la lumière et à l'eau, le pH des lixiviats des pots renfermant des résidus miniers seulement est demeuré supérieur à 8,9. Par conséquent, dans ces conditions alcalines, les minéraux présents dans les résidus devraient être assez stables. Cependant, la concentration de Mg dans les lixiviats des pots renfermant des résidus miniers seulement (110-260 ppm) a été environ 2 à 5 fois supérieure à celle des lixiviats des pots renfermant du sol seulement (20-130 ppm) ou du compost seulement (10-50 ppm). La quantité totale de Mg lessivé sur 90 jours dans les pots renfermant des résidus miniers seulement (104 mg) a été environ 5 à 10 fois supérieure à celle observée dans les pots renfermant du sol seulement (20,4 mg) ou du compost seulement (10,6 mg). Certes, la concentration de Mg dans l'eau d'étang recueillie près de la halde Normandie (13,25 ppm) (tableau 5) tombe dans la plage normale des concentrations observées dans les eaux des rivières et havres naturels. Cependant, il faut souligner que même si l'atténuation naturelle a

fait qu'on a mesuré une concentration « normale » de Mg dans l'étang proche de la halde, les résidus miniers ont tout de même libéré du Mg qui, transporté par l'eau de pluie et déposé avec les sédiments, s'est retrouvé dans le milieu environnant et au-delà.

Dans le cas du Ni, les conditions alcalines des résidus miniers ont contribué à maintenir ce métal à l'intérieur des résidus, la concentration de Ni dans les lixiviats des pots renfermant des résidus seulement ayant été semblable à celle des lixiviats des pots renfermant du sol seulement ou du compost seulement. La quantité de Ni lessivée sur 90 jours dans les pots renfermant des résidus seulement a même été inférieure à celle lessivée dans les pots renfermant du sol ou du compost seulement.

3. Séquestration du carbone par les résidus miniers seuls et les résidus miniers amendés et végétalisés

Ces dernières années, il a été proposé de lier le CO₂ au silicate de calcium ou de magnésium pour former un carbonate solide sur la croûte terrestre afin de séquestrer à long terme ce gaz à effet de serre (Seifritz, 1990; Lackner *et al.*, 1995; Goff et Lackner, 1998; Krevor *et al.*, 2009). Les minéraux serpentineux sont proposés parmi les candidats au processus de carbonatation exothermique selon la réaction suivante :



La carbonatation des minéraux magnésiens est un processus thermodynamiquement favorable, mais la vitesse de réaction est si faible à température et pression ambiantes qu'elle ne se produit qu'à l'échelle du temps géologique, soit sur une période de l'ordre de la centaine de milliers d'années (Herzog, 2002). Lackner *et al.* (1995) ont utilisé des données thermodynamiques concernant le chrysotile pour produire des estimations intéressantes : pour accélérer la réaction, la température maximale de carbonatation serait de 680 °K, et la pression opérationnelle de dioxyde de carbone serait de 20 bars. Selon des études récentes menées au Canada, une précipitation secondaire de carbonates de magnésium hydratés résultant de la météorisation naturelle est observée dans les résidus de chrysotile des mines de Thetford Mines (Québec) (Huot *et al.*, 2003), Clinton Creek (Yukon) (Wilson *et al.*, 2009), et Cassiar (Colombie-Britannique) (Wilson *et al.*, 2009). Selon Wilson *et al.* (2009), la prise en compte

de la séquestration de CO₂ dans les résidus miniers pourrait aider à compenser les coûts associés aux projets de remise en état et aux pénalités pour émissions excessives grâce à la vente de crédits de CO₂.

La fixation minérale du carbone présente certes un intérêt en rapport avec la séquestration de gaz à effet de serre et la remise en état des mines d'amiante, mais les processus de cette réaction doivent encore être examinés de façon approfondie, même à l'échelle du laboratoire. La présente étude ne portait pas sur cette vaste question, mais l'analyse du carbone organique dans les résidus miniers, dans les matériaux d'amendement que sont le sol et le compost et dans divers couverts végétaux a révélé que :

- 1) La quantité de carbone organique piégée dans les résidus miniers ne représente que 5 % de celle piégée dans du sol agricole ordinaire ou du compost de déchets de jardin.

- 2) L'établissement de couverts végétaux sur des résidus miniers nus amendés avec du sol ou du compost a significativement augmenté la fixation du carbone organique.

Figure 13. Fruits produits après 90 jours.

13a) Grains d'orge



13b) Gousses de soja.



CONCLUSIONS

Les essais en pots ont permis d'établir que la méthode consistant à recouvrir les résidus miniers de sol ou de compost est valide, mais de nombreux problèmes pratiques concernant la revégétalisation des sites miniers restent à résoudre. Essentiellement, les aspects chimiques des problèmes de revégétalisation ont été clarifiés plus avant, et, de façon générale, les expériences de laboratoire ont confirmé les points suivants.

1) Si on laisse les résidus nus intacts, avec le temps et du fait de l'exposition à l'eau et à la lumière, le magnésium présents dans les résidus est libéré dans le milieu environnant, même si des conditions alcalines sont maintenues et qu'aucune substance acidogène n'est présente. Le magnésium peut être transporté dans le milieu environnant et au-delà sous l'action de l'eau, par lessivage et dépôt de sédiments.

2) Le nickel présent dans les résidus miniers reste dans le réseau minéral et ne polluera pas l'eau de percolation aussi longtemps que le système demeure alcalin. Des substances ou processus acidogènes favorisent la dissolution du nickel.

3) Quand les résidus miniers sont laissés nus ou sont recouverts de sol ou de compost, il n'y a pas d'augmentation significative de la concentration de nitrate dans le système aquatique.

4) Le recouvrement des résidus miniers avec du sol ou du compost aide à retenir l'humidité sur les haldes. Dans les essais, le pourcentage de l'eau ajoutée qui a été perdu dans le lixiviat est ainsi passé de 38,6 % (résidus nus) à 30,4 % (résidus recouverts de sol ou de compost). La présence d'un couvert végétal bien établi sur la couche de sol ou de compost fait chuter la perte d'eau dans le lixiviat à 12,5 %.

5) De bons couverts végétaux peuvent être établis sur des étendues plates de résidus miniers si ces derniers sont recouverts de sol ou de compost offrant une capacité de rétention d'eau et une quantité de matière organique adéquates. L'ajout de matière organique aux résidus

miniers est essentiel pour aider à retenir l'eau et les éléments nutritifs. L'ajout de carbone organique (CO) par recouvrement avec du sol ou du compost à une dose de 4 à 6 kg de CO/m² a permis aux plantes de se développer jusqu'à la fructification (figure 13), mais il est trop tôt pour dire si l'une ou l'autre des espèces mises à l'essai pourraient se maintenir à long terme, les essais n'ayant duré que 90 jours.

6) L'ajout d'engrais inorganiques à une dose supérieure à la dose « faible » ne présente pas d'avantages importants. Par exemple, les trois légumineuses (trèfle rouge, mélilot jaune et soja) ont produit leur plus forte biomasse dans les traitements avec résidus miniers recouverts de compost, et les deux céréales (seigle d'hiver et orge) ont montré leur plus forte production sur résidus miniers recouverts de sol et amendés d'engrais NPK à faible dose.

7) Les traitements réduisant le pH des résidus miniers ne sont pas favorables à l'établissement de couverts végétaux, étant donné que l'acidification accroît la libération de Ni, métal phytotoxique, de la matrice minérale.

8) Les cinq espèces de plantes mises à l'essai ont réussi à former un couvert végétal sur les résidus miniers recouverts de sol ou de compost de déchets de jardin. Le trèfle rouge, le mélilot jaune et le soja n'ont pu croître sur les résidus miniers nus. Le seigle d'hiver et l'orge se sont bien comportés au début des essais sur résidus nus, mais ils ont donné plus tard des plants rabougris qui ont fini par cesser de croître.

9) La plantation de végétation aide à fixer l'azote, comme en témoigne le fait que les concentrations d'azote dans les résidus miniers des pots avec couvert végétal ont été statistiquement supérieures à celles mesurées dans les pots avec résidus nus. Les traitements les plus efficaces pour la fixation de l'azote sont la plantation de soja sur résidus miniers recouverts de sol et la plantation de mélilot jaune sur résidus miniers recouverts de compost.

10) La plantation de soja sur résidus miniers recouverts de compost est globalement le traitement le plus efficace, en termes de rétention d'eau, de production de biomasse, de fixation de l'azote et de piégeage du carbone.

Les problèmes chimiques de la revégétalisation ont été pour la plus grande part bien réglés, les principales difficultés en ce qui concerne l'implantation de couverts végétaux demeurant les caractéristiques physiques des haldes de résidus, particulièrement les pentes abruptes et la croûte dure formée à la surface. Durant nos visites sur le terrain, nous avons observé une érosion des haldes de résidus miniers à pentes abruptes. Du fait de l'érosion pluviale et éolienne, les résidus des parties hautes des haldes peuvent être transportés vers le bas et éventuellement s'accumuler sur les parties basses, où la végétation peut être établie plus facilement. La plantation d'arbres sur les haldes compactées à pentes abruptes pourrait être une solution. Toutefois, l'évaluation de cette approche prendra beaucoup de temps.

REMERCIEMENTS

L'auteure est redevable à Doug Gould (Ph.D.) pour ses conseils constructifs et ses utiles commentaires. Elle tient à remercier Philippa Huntsman-Mapila (Ph.D.) pour son aide lors de la conception de ce projet. La Société Asbestos Limitée a autorisé l'accès à ses sites aux fins d'échantillonnage. Richard Rodrigue, Jovette Marois et Annie Rochette (Ph.D.), du CTMP, et Yves Thibault (Ph.D.), des Laboratoires des mines et des sciences minérales (LMSM) du CANMET, ont aidé à organiser les visites des sites et l'échantillonnage. L'auteure remercie aussi Jean Vigneux et Tim Moore (Ph.D.) pour lui avoir fourni de l'information sur les travaux passés de revégétalisation. Marcia Waterway (Ph.D.) a aidé l'auteure à identifier les espèces végétales. Ron Wheeler, Bill Legge (Ph.D.) et Elroy Cober (Ph.D.) ont fourni le sol de référence propre et les graines. L'auteure tient aussi à remercier Gilles Tremblay et Bryan Tisch pour lui avoir fourni des contacts et des conseils utiles. Enfin, elle remercie le Groupe des services analytiques des LMSM pour avoir réalisé les analyses chimiques.

RÉFÉRENCES

- Goff F, Lackner KS. 1998. Carbon dioxide sequestering using ultramafic rocks. *Environ. Geosci.* 5: 89-101.
- Herzog HJ. 2002. Carbon sequestration via mineral carbonation: overview and assessment. MIT Laboratory for Energy and the Environment. Cambridge (Massachusetts).
- Huot F, Beaudoin G, Hébert R, Constantin M, Bonin G, Dipple G. 2003. Evaluation of southern Quebec asbestos residues for CO₂ sequestration by mineral carbonation: Preliminary results. Proceedings of the Joint Annual Meeting of the Geological and Mineralogical Associations of Canada. Vancouver, CANADA. 25-28 mai 2003.
- Krevor SC, Graves CR, Van Gosen BS, McCafferty AE. 2009. Delineation of magnesium-rich ultramafic rocks available for mineral carbon sequestration in the United States. *Energy Procedia* 1: 4915-4920.
- Lackner KS, Wendt CH, Butt DP, Joyce EL, Sharp DH. 1995. Carbon dioxide disposal in carbonate minerals. *Energy* 20(11): 1152-1170.
- Seifritz W. 1990. CO₂ disposal by means of silicates. *Nature* 345: 486 (7 juin 1990). doi:10.1038/345486b0.
- Wilson SA, Raudsepp M, Dipple GM. 2006. Verifying and quantifying carbon fixation in minerals from serpentine-rich mine tailings using the Rietveld method with X-ray powder diffraction data. *American Mineralogist* 91: 1331-1341.
- Wilson SA, Dipple GM, Power IM, Thom JM, Anderson RG, Raudsepp M, Gabites JE, Southam G. 2009. Carbon dioxide fixation within mine wastes of ultramafic-hosted ore deposits: Examples from the Clinton Creek and Cassiar chrysotile deposits, Canada. *Economic Geology* 104: 95-112
- Wu Y. 2011a. Dichromate oxidation colorimetric method. Procédure opérationnelle normalisée (PON) interne.
- Wu Y. 2011b. Total nitrogen analysis in soil or tailings with persulphate oxidation. Procédure opérationnelle normalisée (PON) interne.

ANNEXE A

L'enceinte de type 2 et le dispositif expérimental



ANNEXE B

**Évolution de la chimie des lixiviats issus des pots renfermant des résidus miniers seulement
et des pots renfermant des résidus miniers amendés avec du sol ou du compost.**

300 g de résidus miniers du site Normandie

Espèce	Jour	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	COD (mg C/L)	NO ₃ - (ppm)
Trèfle rouge	1	9,01	701	16,2	7,2
	30	8,96	1866	11,2	14,0
	60	9,09	1204	5,57	< 0,1
	90	8,92	733	2,91	< 0,1
Mélilot jaune	1	9,02	702	16,2	7,2
	30	9,00	1197	17,0	4,2
	60	9,11	954	10,3	< 0,1
	90	9,12	841	4,49	< 0,1
Seigle d'hiver	1	9,08	723	17,4	5,6
	30	8,92	1736	12,6	0,11
	60	9,12	1231	3,59	< 0,1
	90	9,17	912	1,52	< 0,1
Orge	1	9,08	706	16,7	10
	30	8,91	1749	19,2	< 0,1
	60	9,12	1429	2,55	< 0,1
	90	9,16	967	1,53	< 0,1
Soja	1	9,11	699	17,6	5,7
	30	9,17	1048	1,69	21
	60	9,19	1252	2,41	56
	90	9,20	1077	2,71	149
Essai à blanc	1	9,07	705	16,8	6,10
	30	9,19	800	1,21	7,34
	60	9,23	736	1,60	< 0,1
	90	9,21	721	0,92	< 0,1

300 g de résidus miniers du site Normandie + 150 g de sol

Espèce	Jour	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	COD (mg C/L)	NO ₃ - (ppm)
Trèfle rouge	1	9,17	804	4,7	4,6
	30	8,99	888	15,8	39
	60	9,09	956	8,42	< 0,25
	90	8,89	1019	21,2	< 0,25
Mélilot jaune	1	9,13	850	4,03	11
	30	9,00	904	9,80	39
	60	9,00	706	8,85	< 0,25
	90	8,85	792	11,1	< 0,25
Seigle d'hiver	1	9,13	779	2,23	6,3
	30	9,04	940	17,9	18
	60	9,01	1029	12,0	< 0,25
	90	8,81	1532	7,43	< 0,25
Orge	1	9,17	780	2,42	7,4
	30	9,03	856	13,9	26
	60	9,14	715	6,62	< 0,25
	90	8,87	1342	9,25	< 0,25
Soja	1	9,19	771	1,65	7,2
	30	9,05	871	10,4	57
	60	9,04	870	5,74	< 0,25
	90	8,89	1395	5,21	4,2
Essai à blanc	1	9,17	757	1,53	8,2
	30	9,11	1518	12,4	365
	60	9,05	1026	9,06	< 0,25
	90	9,04	986	5,83	0,63

300 g de résidus miniers du site Normandie + 150 g de compost

Espèce	Jour	pH	CE (µS/cm)	COD (mg C/L)	NO₃- (ppm)
Trèfle rouge	1	9,24	813	2,40	4,9
	30	9,08	1357	18,9	9,7
	60	9,06	768	7,20	< 0,25
	90	9,03	817	4,34	< 0,25
Mélilot jaune	1	9,20	851	1,64	7,3
	30	8,98	1218	7,26	7,7
	60	8,89	434	5,83	< 0,25
	90	8,71	534	4,91	< 0,25
Seigle d'hiver	1	9,17	884	1,49	7,6
	30	9,18	1623	16,1	1,4
	60	8,98	1549	32,6	< 0,25
	90	8,69	2260	25,2	< 0,25
Orge	1	9,22	799	1,40	7,8
	30	8,99	647	6,25	0,6
	60	8,85	337	4,03	< 0,25
	90	8,74	1729	24,8	< 0,25
Soja	1	9,22	863	1,14	6,6
	30	8,96	1172	11,8	6,2
	60	9,00	880	10,9	< 0,25
	90	8,89	1877	19,7	2,3
Essai à blanc	1	9,22	863	1,51	7,6
	30	8,99	1624	13,2	2,3
	60	9,06	1227	12,2	< 0,25
	90	9,04	855	7,82	< 0,25