



Laboratoire des mines et des sciences minérales de CANMET CANMET Mining et Mineral Sciences Laboratories

RAPPORT DE DIVISION / DIVISION REPORT

Caractérisation minéralogique d'échantillons de surface de résidus miniers produits par l'extraction du chrysotile dans la région de Thetford Mines (Québec)

**Y. Thibault
CanmetMINES**

Ressources naturelles Canada ne fait aucune représentation et ne donne aucune garantie quant au contenu du présent rapport, expresse ou tacite, découlant de la loi ou d'autres sources, en ce qui concerne entre autres les garanties tacites ou les conditions de commercialité ou leur pertinence aux fins d'un usage particulier.

Décembre 2011

Projet : LSM n° P-000050.001

RAPPORT DE DIVISION LSM 11-008(TR)

Droits de la Couronne réservés

RÉSUMÉ

Cette étude visait à produire un ensemble cohérent de données minéralogiques pour des échantillons de surface prélevés des amas de résidus des mines Normandie, King Beaver et BC I, dans la région de Thetford Mines au Québec. Ce travail a été réalisé dans l'espoir d'obtenir des renseignements pertinents qui pourraient aider à établir des stratégies optimales réalistes menant à une gestion des résidus de l'extraction du chrysotile qui soit sécuritaire, économiquement viable, et respectueuse de l'environnement. La stratégie d'échantillonnage a consisté à prélever des échantillons de résidus près de la surface sur le sommet plat de l'amas où l'on estime que le temps de séjour est élevé, ainsi qu'à la base des flancs escarpés constituée de matériaux remobilisés principalement par l'érosion hydrique.

Les trois haldes de résidus présentent des caractéristiques chimiques permettant de croire que la composition du minerai serpentinisé duquel le chrysotile fut extrait demeure très proche de celle de son précurseur harzburgitique, bien que dans les échantillons provenant des résidus de la mine Normandie, on observe des évidences de la contribution d'un contaminant riche en feldspath, vraisemblablement des fragments de roches intrusives riche en silice recoupant la péridotite. Ces fragments de roches intrusives sont également la source de l'actinolite décelée en très faibles quantités et affichant une forme prismatique à aciculaire.

Dans tous les échantillons, la lizardite est manifestement le principal polymorphe de la serpentine et sa proportion par rapport au chrysotile semble relativement constante tant au sommet des halde que sur les flancs. La teneur en Cr de la serpentine est hétérogène, et peut compter pour près de 25 % du Cr total. Dans le cas du Ni, une répartition relativement progressive, avec des teneurs de 0,1 % en poids pour les résidus des mines Normandie et King Beaver et de 0,06 % pour ceux de la mine BC I, a été constatée. La concentration moyenne en Ni significativement plus faible dans la serpentine de la halde BC I peut s'expliquer par une plus grande abondance de forstérite nickélifère préservée. La proportion de Ni contenue dans la serpentine

représente, au mieux, un peu moins de la moitié de la quantité totale de Ni dans les résidus.

De larges grains de spinelle riches en Cr, entourés d'auréole de magnétite, sont présents dans tous les échantillons. La partie centrale de ces grains montrent des compositions comparables à celles des spinelles de la harzburgite hôte. Ce spinelle grossier, contenant environ 75% du Cr total, constitue la seule phase d'intérêt porteuse de Cr susceptible d'être concentré par broyage et séparation physique.

L'awaruite se présente soit sous forme de grains grossiers ($> 5 \mu\text{m}$), ou en une multitude de particules nanométriques réparties dans de larges grains de serpentine. La réduction du NiO, en solution solide dans la forstérite, pendant l'événement de serpentinisation océanique est probablement la source de l'awaruite de taille nanométrique, tandis que l'awaruite grossière a probablement été formée par la désulfuration de sulfures primaires. La contribution de l'awaruite grossière au bilan total du Ni est estimée à environ 10 %, alors que l'awaruite nanométrique compte pour près de 50 %, voire plus, du Ni total. Comme la serpentine et l'awaruite nanométrique sont chacun hôte d'environ la moitié du Ni total, une approche de lixiviation globale semblerait être la plus efficace si on envisage d'extraire le Ni des haldes de résidus. Une lixiviation acide avec HCl récupérera efficacement la majeure partie du Ni contenu dans la serpentine et l'awaruite, mais se traduira par la formation d'importantes quantités de MgCl et nécessitera une importante consommation d'acide. Un procédé de lixiviation sélective du Ni contenu dans l'awaruite représente une solution alternative, mais le taux optimal de récupération est manifestement nettement inférieure ($\approx 50 \%$) et, dans certains cas, la rétention potentielle de Ni par la serpentine résiduelle représente un problème potentiel.

Les évidences texturales d'une dissolution importante de la brucite à la surface de tous les haldes de résidus et la capacité de reproduire des textures similaires lors d'expériences de lixiviation au moyen d'eau distillée carbonatée suggèrent fortement que la brucite constitue la principale source de Mg responsable de la formation de la

grande majorité de la cimentation d'hydromagnésite observée. Un contrôle de la carbonatation par la brucite a des conséquences importantes sur la prévision des taux de cimentation à long terme et du temps nécessaire aux matériaux remaniés, dans lesquels la brucite est complètement dissoute, de produire une nouvelle croûte.

DÉNI DE RESPONSABILITÉ

Dans le présent rapport, la détermination ou la mention d'un produit, d'un processus ou d'un service commercial particulier par son appellation commerciale, sa marque de commerce, le nom du fabricant ou d'une autre manière sera considérée comme une opinion; CanmetMINES ne fait aucune représentation et ne donne aucune garantie implicite quant à la qualité marchande ou à l'adaptation à un usage précis d'un produit, d'un processus ou d'un service commercial particulier et ne vise nullement à promouvoir, recommander ou favoriser celui-ci. Les points de vue et les opinions des auteurs exprimés dans le présent rapport ne reflètent pas nécessairement ceux de CanmetMINES et ne doivent pas servir à des fins de publicité ou de promotion d'un produit.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
DÉNI DE RESPONSABILITÉ.....	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
TABLEAUX	vi
FIGURES	vi
 INTRODUCTION.....	 1
METHODES D'ÉTUDE	4
Échantillonnage	4
Préparation des échantillons	8
Techniques d'analyse	9
Diffraction des rayons X (XRD).....	9
Microanalyse X par sonde électronique (EPMA)	10
Microscopie électronique à balayage à émission de champ (FE-SEM)....	10
Microfluorescence X induite par rayonnement synchrotron (SRXF)	10
Analyse d'images.....	11
 RESULTATS ET DISCUSSION	 11
Composition minéralogique générale	10
Considérations géochimiques.....	17
Caractérisation des phases	22
Phases silicatées harzburgitiques préservées.....	22
Serpentine	24
Spinelle riche en Cr	32
Magnétite.....	36
Awaruite.....	38
Sulfures nickélifères	46
Chlorite	48
Brucite et hydromagnésite	50
Occurrence de l'amphibole	62
Commentaires additionnels sur le bilan du Cr et du Ni.....	67
 CONCLUSIONS	 70
REMERCIEMENTS	73
RÉFÉRENCES.....	74

TABLEAUX

Tableau 1.	Description et emplacement des échantillons prélevés sur les haldes Normandie, King Beaver et BC I.....	6
Tableau 2.	Calcul de la composition chimique globale approximative de la harzburgite hôte.....	20
Tableau 3.	Comparaison de la composition de la harzburgite « hydratée » avec les compositions estimées de diverses haldes de résidus.....	20
Tableau 4.	Compositions chimiques représentatives de la forstérite et de l'enstatite.....	23
Tableau 5.	Compositions chimiques moyennes de la lizardite, de la serpentine riche en Fe et du chrysotile.....	28
Tableau 6.	Compositions chimiques moyennes des noyaux et des auréoles des grains de spinelle riches en Cr.....	33
Tableau 7.	Composition chimique moyenne des grains de magnétite.....	38
Tableau 8.	Composition chimique de grains d'awaruite « grossiers » représentatifs	40
Tableau 9.	Composition chimique de grains de pentlandite et d'heazlewoodite représentatifs	47
Tableau 10.	Composition chimique de grains de clinocllore représentatifs	49
Tableau 11.	Compositions chimiques représentatives de brucite en intercroissance et d'hydromagnésite	53
Tableau 12.	Compositions chimiques représentatives de l'amphibole détectée dans les échantillons des haldes de résidus Normandie, King Beaver et BC I.....	64

FIGURES

Figure 1.	a) Résidus empilés par convoyeur à bande à Lab Chrysotile; b) flanc abrupt de la halde BC I présentant des signes manifestes d'érosion; c) vue aérienne de la halde de résidus Normandie présentant de nombreux lobes coniques d'accumulation	3
Figure 2.	Emplacement de quelques haldes de résidus dans la région de Thetford Mines-Black Lake	5
Figure 3.	Emplacements des échantillonnages sur les haldes de résidus a) Normandie, b) King Beaver et c) BC I.....	7
Figure 4.	Patrons de diffraction X obtenus pour les échantillons prélevés à diverses profondeurs au sommet de la halde de résidus Normandie.	12

Figure 5.	Patrons de diffraction X obtenus pour les échantillons prélevés à diverses profondeurs au sommet de la halde de résidus King Beaver	13
Figure 6.	Patrons de diffraction X obtenus pour les échantillons prélevés à diverses profondeurs au sommet de la halde de résidus BC I.....	14
Figure 7.	Comparaison des patrons de diffraction X obtenus pour les échantillons prélevés en surface au sommet et à la base de la halde de résidus Normandie	15
Figure 8.	Comparaison des patrons de diffraction X obtenus pour les échantillons prélevés en surface au sommet et à la base de la halde de résidus King Beaver	16
Figure 9.	Comparaison des patrons de diffraction X obtenus pour les échantillons prélevés en surface au sommet et à la base de la halde de résidus BC I.....	17
Figure 10.	Variation de la concentration globale de : a) Al_2O_3 et b) K_2O , en fonction du ratio atomique Mg/Si pour plusieurs échantillons de résidus provenant des haldes Bell, Normandie, Lac d'Amiante et National.....	21
Figure 11.	Documentation de la présence de fragments contenant du feldspath	22
Figure 12.	Images en électrons rétrodiffusés de grains partiellement préservés de forstérite et d'enstatite observés dans les échantillons de la halde de résidus BC I.....	24
Figure 13.	Images en électrons rétrodiffusés de : a) gros grains de lizardite exempts d'inclusions; b) grains de lizardite avec de larges inclusions de magnétite et de nombreuses particules minuscules d'awaruite; c) agrégat de fibres de chrysotile; d) brin de fibres de chrysotile dans la matrice fine.....	26
Figure 14.	Patron micro-XRD d'un grain de serpentine (formé surtout de lizardite), avec de multiples inclusions d'awaruite.....	27
Figure 15.	Patron micro-XRD d'un agrégat de fibres de chrysotile	27
Figure 16.	Diagramme ternaire Si-Fe-Mg (proportions atomiques) pour la lizardite et tous les grains de serpentine riches en Fe analysés	28
Figure 17.	Histogrammes de la répartition du Ni présent dans les grains de serpentine analysés dans les échantillons de résidus des haldes a) Normandie; b) King Beaver; c) BC I; d) les trois haldes.....	30
Figure 18.	Histogrammes de la répartition du Cr présent dans les grains de serpentine analysés dans les échantillons de résidus des haldes a) Normandie; b) King Beaver; c) BC I; d) les trois haldes.....	31

Figure 19.	Images en électrons rétrodiffusés présentant les formes types du spinelle riche en Cr	34
Figure 20.	Valeurs du Mg# ($\text{Mg}/[\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}]$) en fonction de celles du Cr# ($\text{Cr}/[\text{Cr}+\text{Al}]$) pour les noyaux de spinelle chromifère dans les échantillons de résidus et pour le spinelle riche en Cr provenant de la harzburgite tectonisée (Hz) de l'ophiolite de Thetford Mines	35
Figure 21.	Diagramme ternaire Al_2O_3 - Cr_2O_3 - Fe_2O_3 (proportions atomiques), soulignant les différences de composition entre les noyaux et les auréoles du spinelle chromifère	35
Figure 22.	Images en électrons rétrodiffusés présentant les formes types de la magnétite	37
Figure 23.	Images en électrons rétrodiffusés présentant les formes grossière et nanométrique type de l'awaruite	41
Figure 24.	Spectre SXRF EDS obtenu sur un grain grossier d'awaruite, révélant la présence de faibles quantités de Ge et d'As	42
Figure 25.	Spectre cumulatif (vert) obtenu par balayages multiples du spectromètre à dispersion de longueur d'onde, dans la région spectrale entourant la raie Ni $L\alpha$ au moyen d'un cristal de diffraction TAP sur une pastille comprimée faite d'une poudre fine de matériau prélevé au sommet de la halde BC I, entre 50 et 75 cm de profondeur	44
Figure 26.	Images en électrons rétrodiffusés : a) d'un grain de pentlandite (gris moyen) associé à de l'awaruite grossière (gris clair), b) d'un grain de heazlewoodite, c) d'un grain de heazlewoodite (Ni_3S_2) qui semble remplacer la millérite (NiS); et d) spectres EDS obtenus pour la millérite et la heazlewoodite illustrées en c)	47
Figure 27.	Images en électrons rétrodiffusés montrant la forme représentative des gros grains de clinocllore	48
Figure 28.	Comparaison des patrons de diffraction X sur poudre obtenus pour la fraction fine (fines) et l'échantillon global (bulk) provenant d'une profondeur de 50 à 75 cm au sommet de la halde de résidus Normandie	50
Figure 29.	Portion des patrons de diffraction X autour de la réflexion principale de la brucite (101) : a) comparaison de la présence de brucite en fonction de la profondeur pour les échantillons prélevés au sommet des haldes Normandie, King Beaver et BC I; b) comparaison similaire pour les échantillons prélevés sur leurs flancs.....	52
Figure 30.	a) et b) Images en électrons rétrodiffusés montrant la forme représentative de la brucite (gris foncé), en intercroissance dans la serpentine (gris clair); c) et d) images en électrons rétrodiffusés montrant des régions vides (foncées) à l'intérieur des grains de serpentine, suggérant une lixiviation de la brucite	53

Figure 31.	Patron micro-XRD d'un grain de serpentine avec intercroissances de brucite	54
Figure 32.	Images en électrons rétrodiffusés illustrant des occurrences types de croissance d'hydromagnésite	55
Figure 33.	Patron micro-XRD d'un agrégat d'hydromagnésite à la lisière d'un grain de serpentine	55
Figure 34.	Nombreux agrégats « en rosette » de cristaux d'hydromagnésite lamellés, formés par précipitation du lixiviat suite au traitement de a) l'échantillon de résidus et b) l'échantillon de brucite monominéralique pendant les expériences de carbonatation décrites dans le texte; c), d) images en électrons rétrodiffusés montrant des évidences de dissolution de la brucite dans l'échantillon de résidus traité; e), f) images en électrons rétrodiffusés illustrant des caractéristiques de cimentation de l'hydromagnésite formée lorsqu'on laisse la solution s'évaporer en contact avec l'échantillon de résidus traité.....	60
Figure 35.	Patron de diffraction X sur poudre obtenu du précipité produit par évaporation de la solution de lixiviation dans l'expérience de carbonatation	61
Figure 36.	Comparaison des patrons de diffraction X sur poudre obtenus de l'échantillon de résidus avant et après la lixiviation, au cours de l'expérience de carbonatation	61
Figure 37.	À droite : cartes quantitatives du ratio $\text{Si}/(\text{Si}+\text{Mg})_{\text{atomique}}$, obtenues par microanalyse X, d'une partie de l'échantillon de résidus traité avant (a) et après (b) la lixiviation au cours l'expérience de carbonatation décrite dans le texte. À gauche : images en électrons rétrodiffusés des régions cartographiées.....	62
Figure 38.	Portion des patrons de diffraction X entourant la réflexion à $\approx 8,4 \text{ \AA}$, représentative de l'amphibole	63
Figure 39.	Classification de l'amphibole calcique sur un diagramme du ratio $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ en fonction de Si calculé avec une formule structurale basée sur 23 oxygènes; selon Leake et coll., 1997	65
Figure 40.	Images en électrons rétrodiffusés illustrant les diverses formes de l'amphibole identifiée dans les échantillons de résidus.....	66

INTRODUCTION

Les immenses monticules de résidus et de déchets marquent de façon frappante le paysage de la région de Thetford Mines, au Québec. Elles sont le produit d'une exploitation minière considérable des fibres de chrysotile qui a commencé vers 1880. Au début des années 1980, la production annuelle atteignait 1 300 000 tonnes, avant de chuter de façon abrupte en raison de la réglementation touchant l'amiante dans de nombreux pays (p. ex., Vigneux et Roy, 2010). La quantité totale estimée de résidus se chiffre à environ 2,05 Gt (p. ex., Beaudoin et coll., 2008), que l'on peut diviser en deux grandes catégories : d'une part, les stériles représentant le matériau excavé pour accéder au minerai, principalement composés de fragments grossiers d'une granulométrie très variable, d'autre part, les amas de résidus provenant directement du broyage du minerai et de l'extraction du chrysotile.

Les veines de chrysotile qui ont été exploitées sont l'aboutissement d'une serpentinitisation complexe de la portion harzburgitique du complexe ophiolitique de Thetford Mines. En plus de l'épaisse section mantellique constituée principalement de harzburgite (≈ 5 km), l'ophiolite de Thetford Mines présente une séquence lithosphérique océanique renfermant des cumulats dunitiques, pyroxénitiques et gabbroïques, recouverts d'un complexe filonien et de laves d'affinité boninitique (p. ex., Pagé et coll., 2009). Les caractéristiques géochimiques permettent de penser qu'elle représente les restes d'une lithosphère océanique formée dans un environnement avant-arc (p. ex., Pagé et coll., 2009) obductées sur la marge laurentienne pendant l'épisode tectonique (St-Julien et Hubert, 1975; Pagé et coll., 2009). Deux événements principaux de serpentinitisation peuvent être reconnus (Laurent et Hébert, 1979). L'événement initial a eu lieu lorsque l'ophiolite était encore une partie intégrante de la lithosphère océanique. Il s'est produit dans des conditions réductrices, à des températures inférieures à 350 °C et est responsable du remplacement de l'olivine primaire et de l'orthopyroxène par la serpentine, la brucite, la magnétite et l'awaruite. Le deuxième épisode de serpentinitisation s'est produit pendant l'emplacement de l'ophiolite par obduction et est caractérisé par la formation de fractures de distension dans la

harzburgite tectonisée et partiellement serpentinisée, dans laquelle des veines de chrysotile ont crû par circulation d'eaux riches en oxygène.

La grande quantité de déchets miniers générés par l'exploitation du chrysotile a créé une empreinte importante, s'étendant sur environ 2 240 ha au Québec (Vigneux et Roy, 2010, et les références y figurant). Dans la région de Thetford Mines, l'entreposage des résidus provenant du traitement se faisait habituellement par convoyeur à bande (figure 1a), produisant des haldes avec une forme caractéristique, à savoir un sommet plat et des pentes très raides (figure 1b), le tout formant des lobes coniques (figure 1c). Sur les sommets plats, on constate l'omniprésence d'une croûte cimentée, qui minimise l'effet de l'érosion éolienne. Par ailleurs, on remarque des signes d'érosion hydrique avec remobilisation des matériaux en aval des pentes raides, pour former des dépôts fraîchement retravaillés à la base (figure 1b).

Diverses options ont été envisagées relativement au sort des haldes. L'option la plus évidente consiste à les laisser telles quelles. La dure croûte de cimentation en surface limite grandement la quantité de fibres rejetées dans l'air (p. ex., Beaudoin et coll., 2008). Néanmoins, la remobilisation des matériaux au bas des pentes raides incite à croire qu'il y a lieu de les stabiliser.

Une autre option serait de revégétaliser les haldes de résidus. Toutefois, de nombreux facteurs chimiques font que ce type de résidus ne se prête pas à la croissance de plantes, comme, par exemple, des teneurs élevées de Mg, Ni et Cr, une concentration faible en Ca, un manque de nutriments et un pH alcalin (p. ex., Vigneux et Roy, 2010). La revégétalisation après ajout de sol ou de déchets organiques a été tentée avec un certain succès, et on peut se référer au rapport de Wu (2011) pour une revue des implications d'une telle approche.

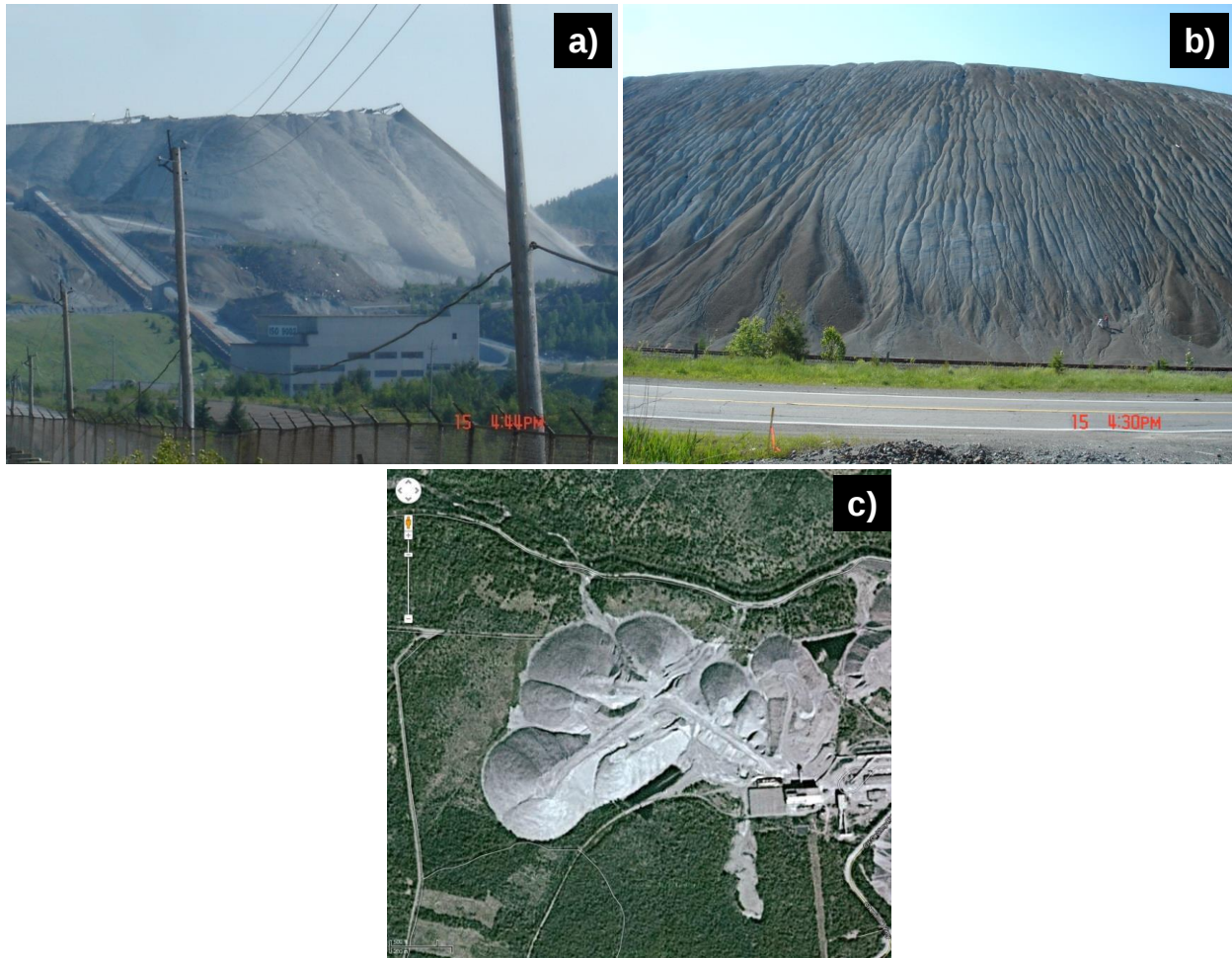


Figure 1. a) Résidus empilés par convoyeur à bande à Lab Chrysotile; **b)** flanc abrupt de la halde BC I présentant des signes manifestes d'érosion; **c)** vue aérienne de la halde de résidus Normandie présentant de nombreux lobes coniques d'accumulation (d'après Google Map).

Un certain nombre de stratégies de retraitement des résidus afin d'en récupérer les composants précieux ont été étudiées. L'extraction du Mg par l'électrolyse du MgCl_2 produit par la lixiviation de la serpentine au moyen de HCl (procédé Magnola; p. ex., Dutrizac et coll., 2001) a été tentée, mais ne s'est pas avérée économiquement viable. La société Nichromet Inc. a dépensé 3,5 millions de dollars pour construire une usine pilote et y réaliser des essais d'extraction du Ni par broyage, concentration magnétique et lixiviation acide (Dupéré et coll., 2007). Une autre option qui est activement étudiée (p. ex., Larachi et coll., 2010 et les références y figurant) consiste à considérer les grandes réserves de minéraux riches en Mg (serpentine) comme des matières premières utilisables pour la capture et la séquestration du CO_2 par carbonatation.

La détermination de stratégies optimales et réalistes en vue d'une gestion économiquement viable, environnementalement responsable et sécuritaire des résidus de chrysotile requiert une compréhension approfondie de la nature chimique et physique du matériau source. Dans ce contexte, la présente étude vise à offrir des informations pertinentes et objectives sur l'interrelation entre les propriétés chimiques, minéralogiques et morphologiques de résidus échantillonnés sur trois sites dans la région de Thetford Mines. De nombreuses études, fort excellentes, ont traité de plusieurs de ces aspects pour ce qui est de l'harzburgite hôte serpentinisée. Cependant, pour ce qui est des résidus, les données sont moins abondantes et beaucoup plus dispersées. Dans ce contexte, nous espérons présenter dans ce rapport un ensemble cohérent de données minéralogiques obtenues au moyen d'une approche intégrée qui tire avantage du potentiel de différentes techniques de microanalyse.

MÉTHODES D'ÉTUDE

Échantillonnage

Les échantillons recueillis pour cette étude minéralogique proviennent des haldes de résidus résultant directement de l'extraction du chrysotile pour les mines Normandie, King Beaver et BC I dans la région de Thetford Mines-Black Lake (figure 2). L'autorisation d'accéder aux sites a été octroyée par M. Mario Simard, de la Société Asbestos Ltée. L'échantillonnage a été réalisé par des techniciens expérimentés du Centre de Technologie Minérale et de Plasturgie Inc., du 5 au 7 octobre 2010, escortés par M. Christian Simard, de la Société Asbestos Ltée. Deux chercheurs scientifiques de CANMET-LMSM (Yonghong Wu et Yves Thibault) étaient également présents à titre d'observateurs.



Figure 2. Emplacement de quelques haldes de résidus dans la région de Thetford Mines-Black Lake (tiré de Google Earth).

Les trois haldes de résidus étudiées présentent la forme caractéristique de l'accumulation de déchets traités par des convoyeurs à bande, tel que décrit plus haut. La quantité estimée de résidus dans les haldes se répartit comme suit : ≈ 26 Mt pour Normandie, ≈ 27 Mt pour King Beaver et entre 120 et 130 Mt environ pour BC I et II (p. ex., Dupéré et coll., 2007; Beaudoin et coll., 2008).

La stratégie d'échantillonnage a consisté à prélever des échantillons de résidus près de la surface sur le sommet plat de l'amas où l'on estime que le temps de séjour est élevé, ainsi qu'à la base des flancs escarpés constituée de matériaux remobilisés principalement par l'érosion hydrique (p. ex., figure 1b). Pour chaque halde, on a choisi deux emplacements sur le sommet et deux emplacements sur les flancs. À chaque emplacement, une lecture GPS a été prise et trois échantillons d'environ 1 à 2 kg ont été recueillis à des profondeurs de 0 à 25 cm, 25 à 50 cm et 50 à 75 cm, respectivement. Tous les échantillons ont été placés dans des sacs doubles, eux-mêmes placés dans des glacières pour le transport à CANMET-LMSM. Les échantillons

et leurs coordonnées géographiques sont présentés dans le tableau 1, et les emplacements sont indiqués sur la figure 3.

Tableau 1. Description et emplacement des échantillons prélevés sur les haldes de résidus Normandie, King Beaver et BC I.

<i>Tailing Pile</i>	<i>Level</i>	<i>Sample ID</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>
Normandie	Summit	NO-01 A: 0-25 cm B: 25-50 cm C 50-75 cm	46 01 36.77 N	71 25 30.95 W
		NO-02 A: 0-25 cm B: 25-50 cm C 50-75 cm	46 01 34.22 N	71 25 41.83 W
	Flank	NO-03 A: 0-25 cm; B: 25-50 cm; C 50-75 cm	46 01 36.56 N	71 25 20.48 W
		NO-04 A: 0-25 cm B: 25-50 cm C 50-75 cm	46 01 33.44 N	71 25 26.10 W
King Beaver	Summit	BEA-01 A: 0-25 cm B: 25-50 cm C 50-75 cm	46 04 25.20 N	71 19 12.60 W
		BEA-02 A: 0-25 cm B: 25-50 cm C 50-75 cm	46 04 05.10 N	71 19 35.10 W
	Flank	BEA-03 A: 0-25 cm B: 25-50 cm C 50-75 cm	46 04 05.40 N	71 19 31.70 W
		BEA-04 A: 0-25 cm B: 25-50 cm C 50-75 cm	46 04 24.00 N	71 19 10.00 W
BC I	Summit	BC1-01 A: 0-25 cm B: 25-50 cm C 50-75 cm	46 02 52.70 N	71 20 58.83 W
		BC1-02 A: 0-25 cm B: 25-50 cm C 50-75 cm	46 02 51.63 N	71 21 03.46 W
	Flank	BC1-03 A: 0-25 cm B: 25-50 cm C 50-75 cm	46 02 48.19 N	71 20 56.11 W
		BC1-04 A: 0-25 cm B: 25-50 cm C 50-75 cm	46 02 51.02 N	71 20 53.27 W

Il va de soi que l'étude d'échantillons localisés prélevés à faible profondeur ne permet pas de tenir compte des variations potentielles dans la totalité de la halde. Toutefois, l'excellente étude publiée par Dupéré et coll. (2007) suggère que les résidus ont tendance à avoir une composition chimique très homogène latéralement et en profondeur, du moins dans le cas des résidus de la mine Normandie. Il s'est manifestement produit des variations dans les propriétés morphologiques et texturales associées à l'évolution technique des méthodes d'extraction et de broyage, ainsi qu'en raison des changements dans la demande de fibres de longueur spécifique au fil du temps, mais les principales caractéristiques minéralogiques sont probablement comparables dans toute la halde. De plus, le prélèvement d'échantillons de surface au sommet et de matériaux remobilisés à la base offre l'avantage d'observer des processus *in situ* qui peuvent affecter actuellement la nature des résidus, comme par

exemple, la formation de carbonate de magnésium hydraté (p. ex., Beaudoin et coll., 2008; Larachi et coll., 2010).



Figure 3. Emplacements des échantillonnages sur les haldes de résidus **a)** Normandie, **b)** King Beaver et **c)** BC I (photographies de Google Maps).

Préparation des échantillons

Chaque échantillon a été homogénéisé et partagé en trois fractions. Une première destinée aux analyses par diffraction des rayons X sur poudre, a été broyée à moins de 20 micromètres au moyen d'un mortier en agate et d'une unité de micronisation McCrone avec enceinte et tiges en agate. Une des fractions non broyées a été utilisée pour préparer des sections polies en vue de la caractérisation par microanalyse. Ces sections ont été généralement préparées par imprégnation sous vide du matériau à l'aide de résine (epoxy) à faible viscosité dans des moules cylindriques de 2,5 cm de diamètre. Après durcissement, les rondelles d'époxy ont été polies au moyen d'une suspension diamantée avec lubrifiant à base d'huile. Pour les analyses de microfluorescence X induite par rayonnement synchrotron, des fines pellicules polies de 60 µm d'épaisseur de l'échantillon imprégné de résine ont été réalisées au moyen d'une polisseuse Allied Multi-Prep™ avec des films diamantés. La troisième fraction est conservée pour d'éventuels travaux.

Toutes les procédures de manipulation pendant les travaux de préparation ont été réalisées sous hotte, avec un sarrau de laboratoire, des gants en nitrile, des lunettes de sécurité et un respirateur muni d'un filtre à particules approprié. Bien que minimes, tous les déchets produits ont été ensachés et placés dans un baril en plastique scellé et verrouillé, entreposé dans une pièce à accès limité. Le produit final utilisé pour les travaux de microanalyse consiste en une rondelle solide ou un film de matériau imprégné de résine, présentant une surface polie plate. La manipulation de l'échantillon est jugée sécuritaire, car le matériau est contenu de façon sécuritaire à l'intérieur de la résine durcie et ne peut donc pas s'en libérer.

Techniques d'analyse

Diffraction des rayons X (XRD)

Des analyses par diffraction des rayons X sur poudre ont été réalisées pour identifier les phases cristallines présentes dans les échantillons de résidus. Les diffractogrammes de rayons X ont été obtenus au moyen d'un diffractomètre sur poudre Rigaku D/MAX 2500 à anode rotative, émettant une radiation monochromatique de Cu K α opéré à une tension d'accélération de 50 kV et un courant de 250 mA. Ces données ont été recueillies avec un balayage en 2θ ° de 5° à 70°, par incrément de 0,02°, à un taux de 1°/min. Pour identifier quelques phases pertinentes, un balayage plus étroit entre 37° et 47°, à un taux plus lent de 0,1°/min a été utilisé

Dans certains cas, l'information structurale sur des phases individuelles a été obtenue directement sur les sections polies au moyen d'un diffractomètre à rayons X à anode rotative et à micro-foyer Rigaku Rapid II (micro-XRD), configuré avec un système optique X multicouche confocale. Le faisceau incident de Cr K α produit à une tension d'accélération de 35 kV et un courant de 25 mA, et était focalisé et collimaté jusqu'à 30-50 μ m sur l'échantillon. Nous avons enregistré les images de diffraction sur une plaque d'imagerie courbe de grande ouverture. L'angle (χ) entre la surface de l'échantillon et l'axe du faisceau de rayons X était gardé constant à 45°. Cependant, afin d'optimiser le caractère aléatoire de l'orientation cristallographique des phases étudiées par rapport aux rayons X incidents, une rotation de la section polie le long d'un axe normal à sa surface (ϕ), et une oscillation autour d'un axe perpendiculaire au faisceau de rayons X (ω) ont été effectuées. Le logiciel 2DP de Rigaku a été utilisé afin de produire les patrons conventionnels de l'intensité en fonction de 2θ , par intégration de l'intensité le long des anneaux des images de diffraction.

Pour les deux techniques XRD (poudre et micro), l'identification des phases a été réalisée au moyen du logiciel JADE version 9.0, interfacé avec les bases de données de diffraction courantes ICSD et ICDD.

Microanalyse X par sonde électronique (EPMA)

Afin d'obtenir des données sur la texture et déterminer la composition chimique des minéraux d'importance, de l'imagerie en électrons rétrodiffusés (BSE) et de la microanalyse X par spectrométrie à dispersion de longueur d'onde ont été effectuées sur des sections polies des échantillons de résidus à l'aide d'une sonde électronique JEOL JXA 8900 opérée à une tension d'accélération de 20 kV. Pour les analyses quantitatives individuelles, un courant de sonde de 10 à 150 nA et des temps d'acquisition allant de 10 jusqu'à 400 secondes pour certains éléments traces ont été utilisés. Pour la cartographie X quantitative, les conditions d'analyse consistait à un courant de sonde de 55 nA, des intervalles de 0,6 μm avec un temps d'acquisition de 80 msec par pixel. Le programme $\phi(\rho z)$ fourni par JEOL a permis d'apporter les corrections de matrice.

Microscopie électronique à balayage à émission de champ (FE-SEM)

Afin d'obtenir une résolution spatiale à l'échelle nanométrique et caractériser de très petites entités, nous avons obtenu des microanalyses X par spectrométrie à dispersion d'énergie et des images en électrons rétrodiffusés, à l'aide du microscope électronique à balayage à émission de champ et pression variable Hitachi SU6600 doté d'un spectromètre à dispersion d'énergie (EDS) de type *silicon drift* (SDD), situé au Département des sciences de la Terre de l'Université Western Ontario. L'instrument a été opéré avec une tension d'accélération de 5 à 20 kV et un courant de sonde allant de quelques pA à 0,5 nA.

Microfluorescence X induite par rayonnement synchrotron (SXRF)

Des analyses par microfluorescence X ont été réalisées sur la ligne de faisceau VESPERS, au Centre canadien de rayonnement synchrotron à Saskatoon, pour identifier les éléments traces présents dans certains des minéraux étudiés. La résolution spatiale latérale était d'environ 4 microns. Afin d'accroître la résolution en profondeur, les échantillons ont été préparés sous forme de films minces doublement polis ($\approx 60 \mu\text{m}$ d'épaisseur). Les spectres de rayons X caractéristiques ont été obtenus

à l'aide d'un détecteur à dispersion d'énergie de type silicium drift (SDD). Pour le temps d'acquisition utilisé, les limites de détection se situent entre 10 et 20 ppm.

Analyse d'images

L'analyse d'images a été utilisée afin d'obtenir de l'information sur l'abondance modale de certaines formes d'awaruite (Ni_3Fe) dans les résidus. À cette fin, une section polie a été étudiée au moyen d'un analyseur de libération minérale (MLA, JKTech), interfacé à une microsonde électronique JEOL 733 équipée de deux spectromètres X à dispersion d'énergie (EDS). Les analyses ont été réalisées avec une tension d'accélération de 20 kV et un courant de faisceau de 15 nA, en utilisant le mode d'acquisition XBSE du MLA. Dans ce mode, les images en électrons rétrodiffusés (BSE) permettent, en un premier temps, de différencier les grains présentant des niveaux de gris distincts, puis chaque grain est automatiquement balayé par le faisceau d'électrons pour obtenir son spectre EDS. La résolution spatiale de détection est d'environ 3 μm .

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Composition minéralogique générale

Cette section traite des principaux constituants minéralogiques identifiés par diffraction des rayons X sur poudre. Les figures 4, 5 et 6 présentent les diffractogrammes et les minéraux identifiés à différentes profondeurs au sommet des haldes de résidus Normandie, King Beaver et BC I, respectivement.

Les échantillons prélevés au sommet des haldes Normandie et King Beaver contiennent essentiellement de la lizardite et de la magnétite. La lizardite et la magnétite sont également des constituants majeurs de la halde BC I (figure 6), mais on y trouve aussi une forte proportion de forstérite. Dans chaque cas, la lizardite est la phase principale de la serpentine et sa proportion par rapport au chrysotile semble assez constante avec la profondeur. Le talc est toujours présent. Dans toutes les haldes, la proportion de brucite s'accroît avec la profondeur, et la pertinence de cette

observation sera abordée plus en détail à la section « Caractérisation des phases ». Le clinochlore est aussi observée en quantités mineures et semble plus abondant à la surface (0 à 25 cm). Un examen attentif révèle également la présence d'une faible proportion d'amphibole dans les échantillons Normandie et King Beaver, une caractéristique qui sera décrite plus en détail, plus loin dans le rapport.

Les figures 7 à 9 présentent une comparaison entre les échantillons de surface recueillis au sommet et à la base des haldes. Dans tous les cas, la minéralogie générale est similaire, sans changement important dans la proportion des phases principales.

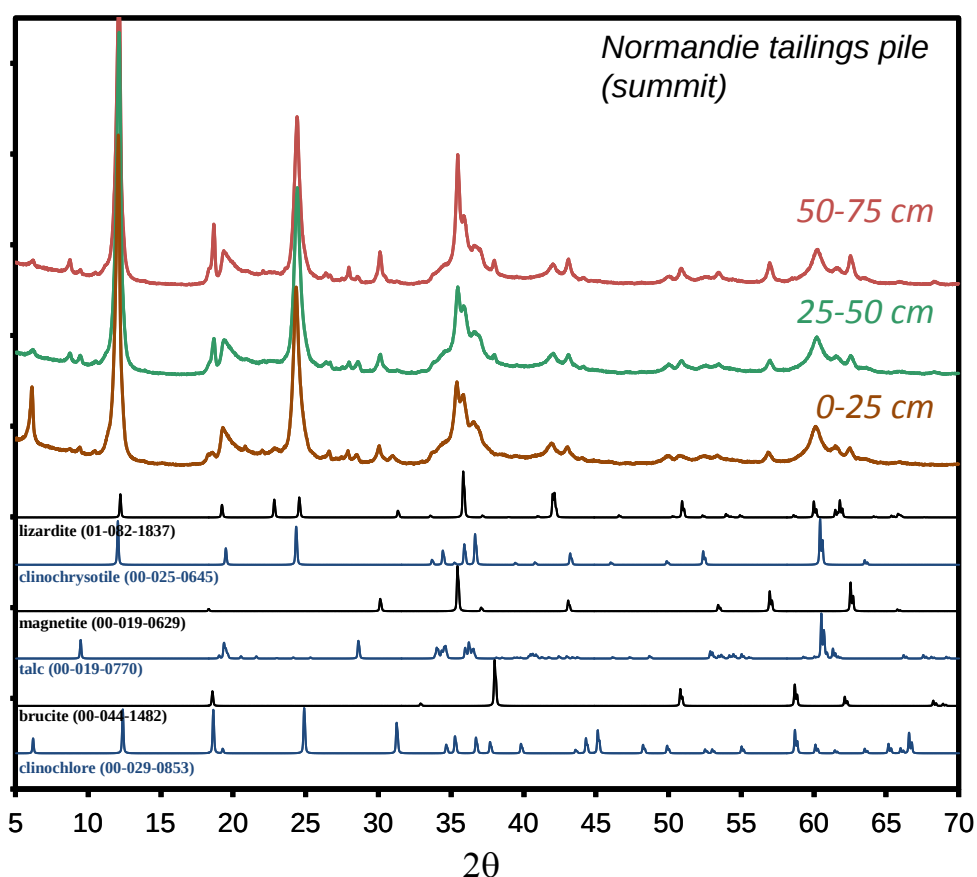


Figure 4. Patrons de diffraction X obtenus pour les échantillons prélevés à diverses profondeurs au sommet de la halde de résidus Normandie. La figure présente également les patrons de référence provenant de la base de données ICDD pour les phases principales. Données acquises au moyen de la raie Cu K α (longueur d'onde 1,54059 Å).

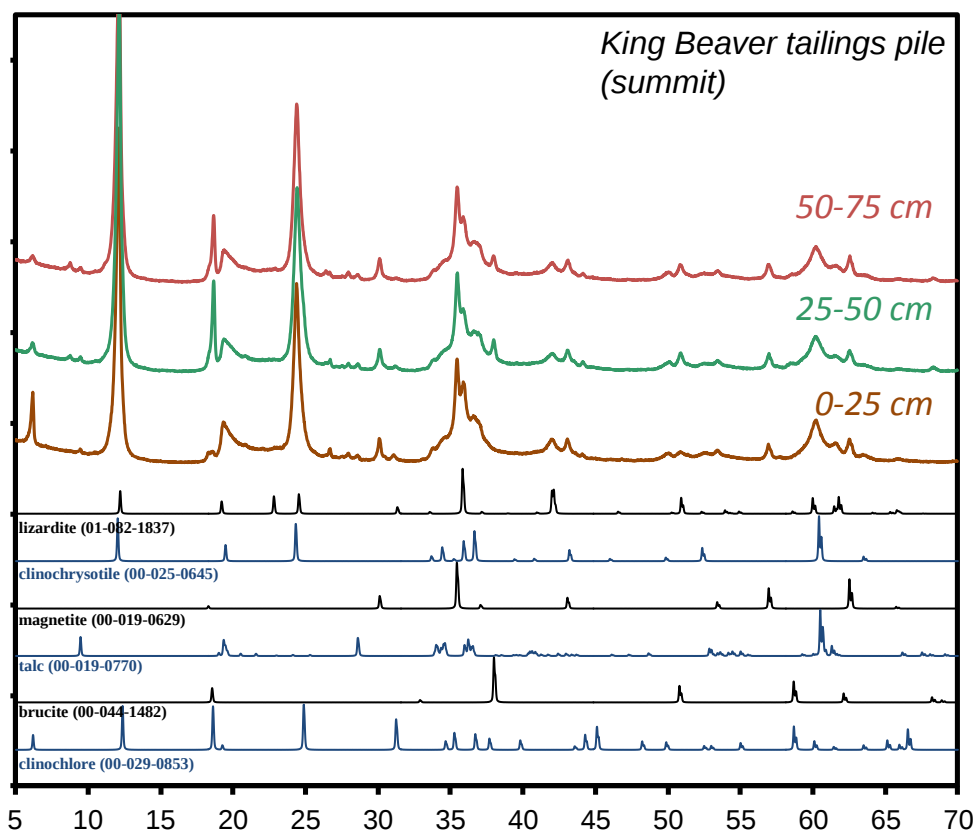


Figure 5. Patron de diffraction X obtenus pour les échantillons prélevés à diverses profondeurs au sommet de la halde de résidus King Beaver. La figure présente également les patrons de référence provenant de la base de données ICDD pour les phases principales. Données acquises au moyen de la raie Cu K α (longueur d'onde 1,54059 Å).

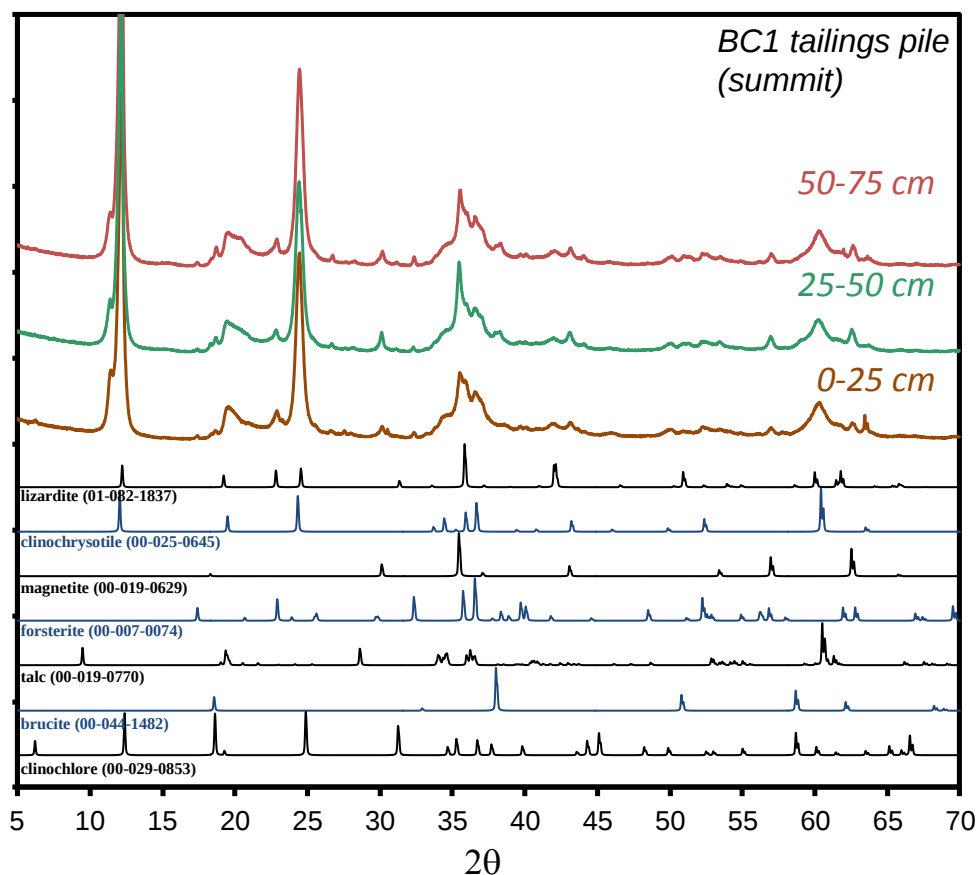


Figure 6. Patrons de diffraction X obtenus pour les échantillons prélevés à diverses profondeurs au sommet de la halde de résidus BC I. La figure présente également les patrons de référence provenant de la base de données ICDD pour les phases principales. Données acquises au moyen de la raie Cu K α (longueur d'onde 1,54059 Å).

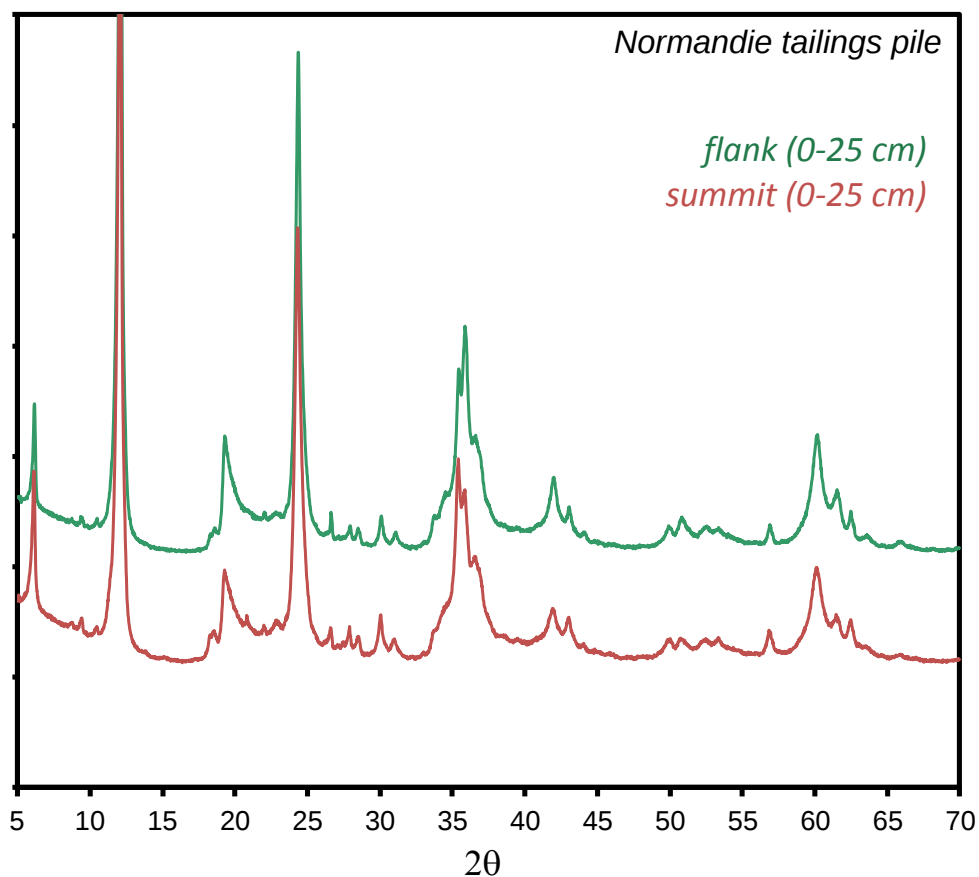


Figure 7. Comparaison des patrons de diffraction X obtenus pour les échantillons prélevés en surface au sommet et à la base de la halde de résidus Normandie. Données acquises au moyen de la raie Cu K α (longueur d'onde 1,54059 Å).

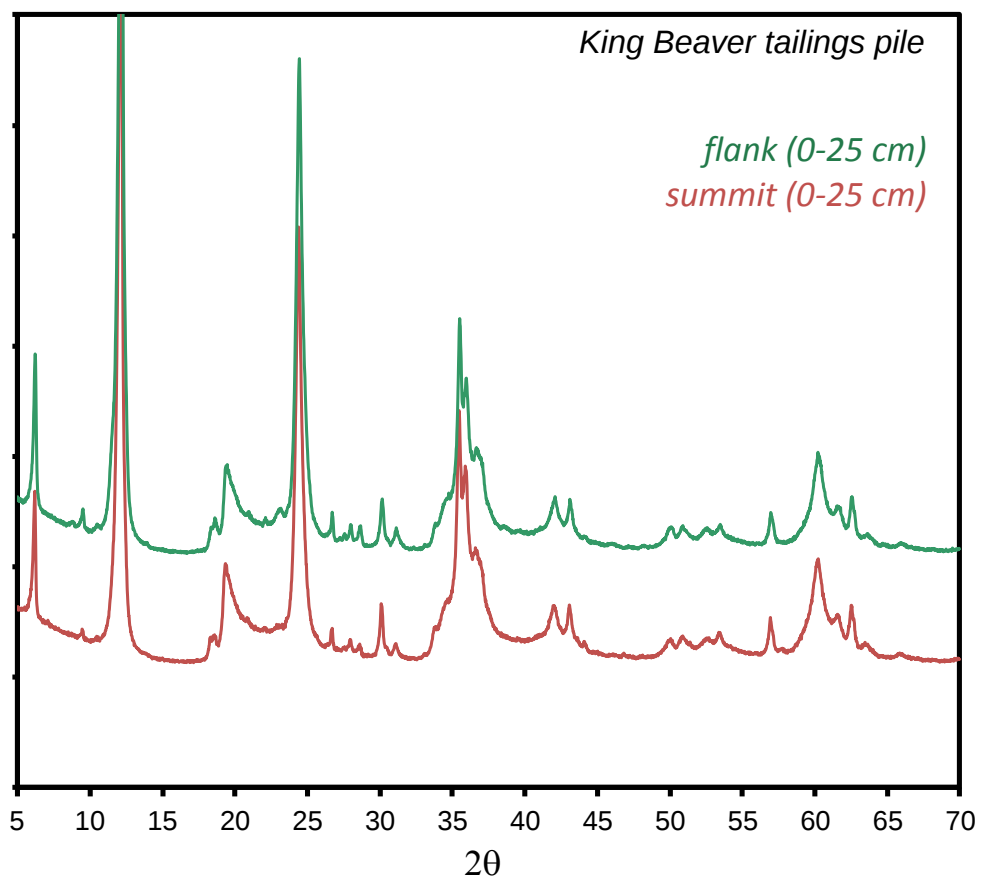


Figure 8. Comparaison des patrons de diffraction X obtenus pour les échantillons prélevés en surface au sommet et à la base de la halde de résidus King Beaver. Données acquises au moyen de la raie Cu K α (longueur d'onde 1,54059 Å).

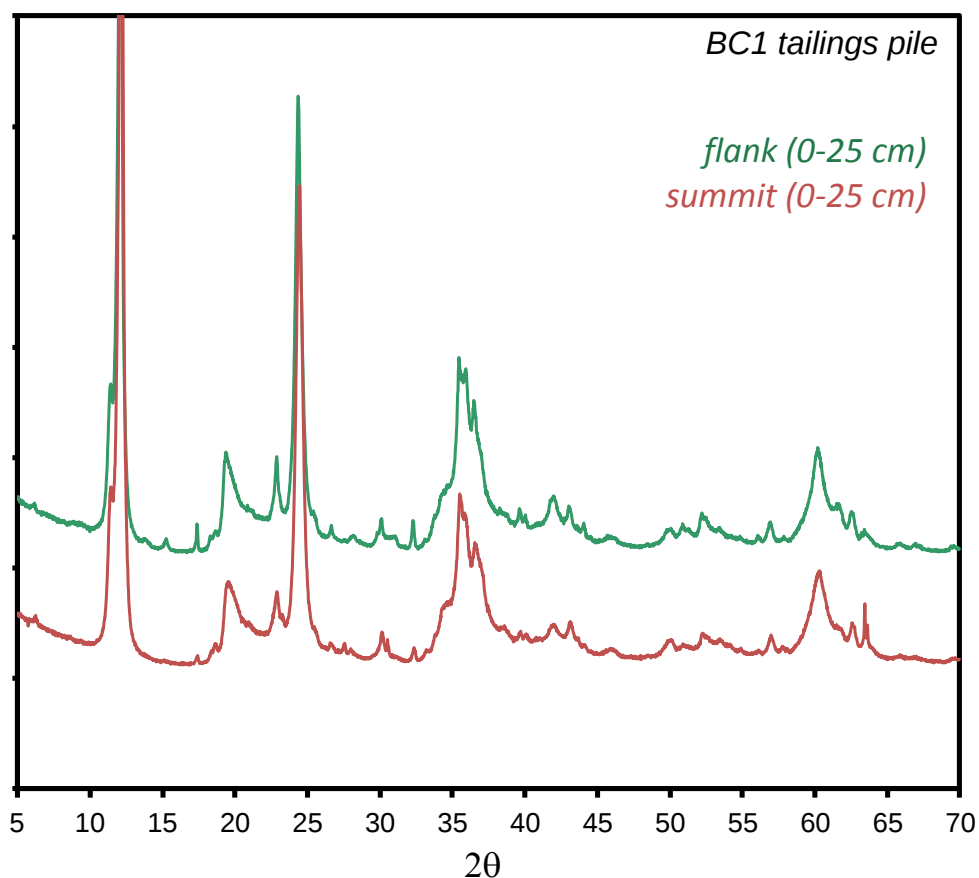


Figure 9. Comparaison des patrons de diffraction X obtenus pour les échantillons prélevés en surface au sommet et à la base de la halde de résidus BC I. Données acquises au moyen de la raie Cu K α (longueur d'onde 1,54059 Å).

Considérations géochimiques

La roche hôte, consistant essentiellement de harzburgite tectonisée, a subi des transformations minéralogiques complexes pendant les deux événements majeurs de serpentinisation qui ont culminé avec la formation de fibres de chrysotile qui se sont développées dans de grandes fractures d'extension (p. ex., Laurent et Hébert, 1979). De telles transformations s'accompagnent d'importants transferts chimiques, mais une question intéressante est de savoir dans quelle mesure le système était fermé à l'échelle de la roche et, par conséquent, dans quelle mesure les phases primaires ont

laissé une empreinte chimique sur le matériau hôte final qui a été éventuellement rejeté comme résidu suite au traitement et à l'extraction du chrysotile.

On peut tenter de répondre à cette question en tirant profit de l'étude pétrologique du manteau de l'ophiolite de Thetford Mines, réalisée par Pagé et coll. (2008). Ces auteurs présentent les compositions chimiques des phases primaires préservées (forstérite, enstatite, diopside, spinelle; voir leurs tableaux 3, 4 et 5), ainsi qu'une estimation de leurs proportions modales et de leur niveau d'altération (voir leur tableau 1). Les moyennes des compositions des diverses phases et de leurs proportions modales pour les échantillons de harzburgite les moins altérés ($\leq 40\%$) ont été calculées et utilisées pour reconstituer une composition globale (notre tableau 2). Le tableau 2 présente également la proportion de Cr et de Ni total transporté par chacune des phases primaires. La forstérite était manifestement le minéral nickélifère principal (94 %). Sans surprise, on constate que la majeure partie du Cr est contenu dans le spinelle (75 %), et environ 25 % dans le pyroxène.

Après une étape de dilution pour tenir compte de l'hydratation qui accompagne la serpentinitisation, la composition globale obtenue peut être comparée aux compositions chimiques estimées des matériaux dans les diverses haldes de résidus (tableau 3). La composition est très proche de celle des résidus, même pour les éléments traces comme le Ni et le Cr. Par conséquent, le fait que le Ni est principalement transporté comme élément trace dans une phase majeure (forstérite), alors que le Cr est essentiellement un élément majeur dans une phase mineure, devrait avoir une incidence sur leur répartition finale dans les résidus serpentinisés, avec le Ni réparti de façon plus homogène que le Cr à l'échelle minérale. Pour ce qui est des éléments majeurs, le ratio Mg/Si est conforme aux estimations pour BC I et Lac d'Amiante, mais il semble significativement plus faible pour les haldes de résidus Normandie et Bell. Afin de comprendre ce qui pourrait causer cet écart, nous avons utilisé l'important ensemble cohérent de données chimiques publié par Dupéré et coll. (2007) pour les haldes de résidus Normandie, Bell, Lac d'Amiante et National, afin de corrélérer la variation du ratio Mg/Si en fonction des concentrations globales de Al_2O_3 et K_2O (figure 10). On constate

une forte corrélation négative entre le ratio Mg/Si et Al_2O_3 et une corrélation significative avec K_2O . Ces observations suggèrent que la variation du ratio Mg/Si est contrôlé par la présence d'aluminosilicates alcalins, comme le feldspath, qui enrichissent les résidus en SiO_2 , Al_2O_3 et en alcalis. Il est intéressant de constater que de gros fragments d'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) associés au feldspath potassique (KAlSi_3O_8) et d'autres phases accessoires comme le diopside, l'amphibole, l'apatite et le sphène sont couramment observés dans les échantillons de résidus provenant de la halde Normandie qui ont été caractérisés dans la présente étude (figure 11). En fait, l'abondance d'albite, quoique faible, est suffisante pour être identifiée dans les patrons de diffraction X pour les échantillons de Normandie, mais elle est absente des échantillons de BC I (figure 11). Cet assemblage n'est pas génétiquement lié à la harzburgite hôte, et peut être considéré comme un contaminant, représentant probablement des fragments de roches intrusives riches en silice recoupant la péridotite (voir Laurent et Hébert, 1979; Williams-Jones, 2001) qui ont abouti dans les résidus. Ces données suggèrent donc que, d'un point de vue chimique, le matériau serpentinisé présent dans les résidus demeure très près de son précurseur harzburgitique, et que le faible écart dans la chimie des principaux éléments entre les différentes halde de résidus que nous avons étudiées n'est pas associé à des différences fondamentales dans la nature chimique de leur hôte respectif, ou à un processus de lixiviation se produisant à l'intérieur des résidus.

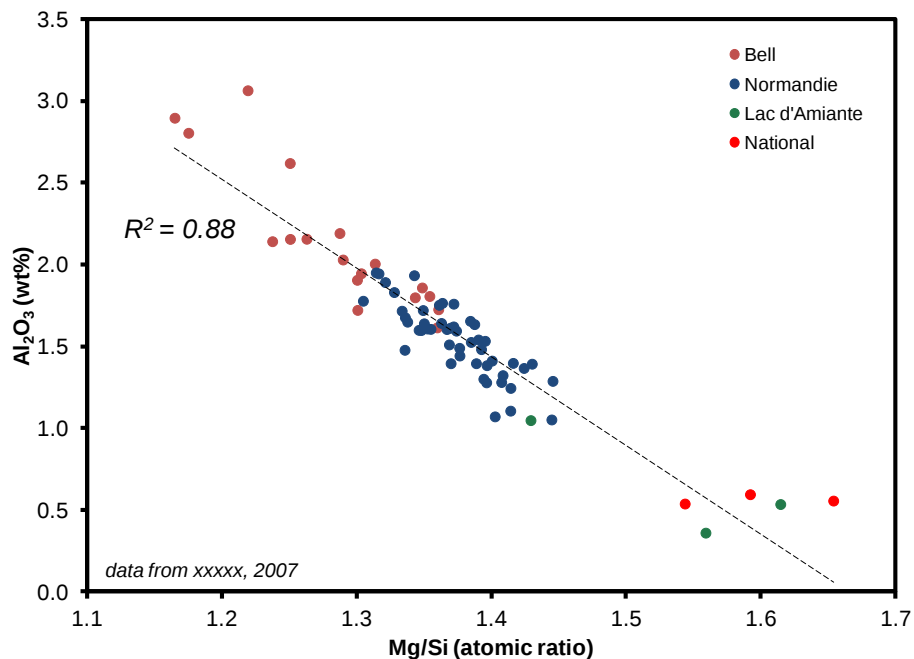
Tableau 2. Calcul de la composition chimique globale approximative de la harzburgite hôte, basé sur les compositions et les proportions modales des phases primaires, selon Pagé et coll. (2008). La proportion calculée du Ni et du Cr total transportée par chaque phase est également indiquée (voir les détails dans le texte).

Phase	Olivine		OPX		CPX		Spinel		Bulk	Bulk hydrated (13.5 wt% H2O)
Mode (%)	72.2	σ 3.6	24	σ 2.7	3.1	σ 1.6	0.7	σ 0.1	100.0	
S.G. (g cm ⁻³)	3.3		3.3		3.5		4.1			
Proportion (wt%)	71.9		23.9		3.3		0.9		100.0	
Composition (wt%)	σ		σ		σ		σ			
SiO2	40.97	0.69	56.95	0.56	53.70	0.66	0.06	0.03	44.85	38.72
Al2O3	0.01	0.00	1.71	0.78	1.77	0.61	22.17	8.39	0.67	0.58
Cr2O3	0.01	0.01	0.51	0.13	0.76	0.19	45.96	7.95	0.55	0.48
FeO	8.55	0.37	5.58	0.30	1.76	0.18	19.05	3.28	7.71	6.65
MgO	50.23	0.66	34.82	0.42	17.81	0.39	11.63	2.26	45.15	38.97
NiO	0.41	0.03	0.07	0.03	0.04	0.02	0.05	0.03	0.31	0.27
CaO	0.01	0.01	0.71	0.21	23.99	0.60			0.96	0.83
Na2O	0.00	0.00	0.02	0.02	0.16	0.06			0.01	0.01
Total	100.19		100.37		99.99		98.92		100.21	86.50
Proportion of total Ni and Cr carried by each phase (%)										
Ni	94.1		5.3		0.4		0.2			
Cr	1.2		20.3		4.1		74.4			

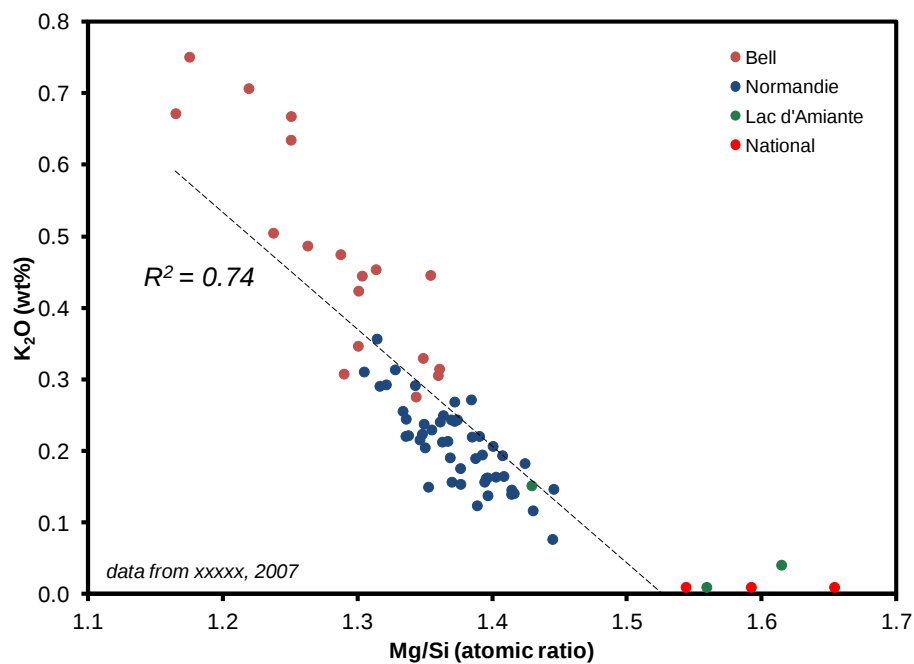
Tableau 3. Comparaison de la composition de la harzburgite « hydratée » calculée dans le tableau 1 avec les compositions estimées de diverses haldes de résidus.

	Calculated	BC1	King Beaver	Normandie	Bell	Lac d'Amiante
<i>wt%</i>						
SiO ₂	38.72	39.40	38.60	39.31	40.30	36.72
Al ₂ O ₃	0.58	0.63	0.94	1.54	2.10	0.65
Fe	5.15	5.59	5.10	5.16	4.83	5.69
MgO	38.97	39.20	36.70	36.17	34.68	37.75
K ₂ O				0.21	0.47	0.07
Ni	0.21	0.23	0.21	0.22	0.20	0.23
Cr	0.32	0.26	0.29	0.26	0.28	0.28
Mg/Si (atomic)	1.50	1.48	1.42	1.37	1.28	1.53

Source des données chimiques : Dupéré et coll., 2007 (BC I et King Beaver : selon leur tableau 1; Normandie : moyenne du trou de forage NOR-1; Bell : selon leur tableau 11; Lac d'Amiante : selon leur tableau 16).



a)



b)

Figure 10. Variation de la concentration globale de : **a)** Al_2O_3 et **b)** K_2O , en fonction du ratio atomique Mg/Si pour plusieurs échantillons de résidus provenant des haldes Bell, Normandie, Lac d'Amiante et National (toutes les données sont tirées de Dupéré et coll., 2007).

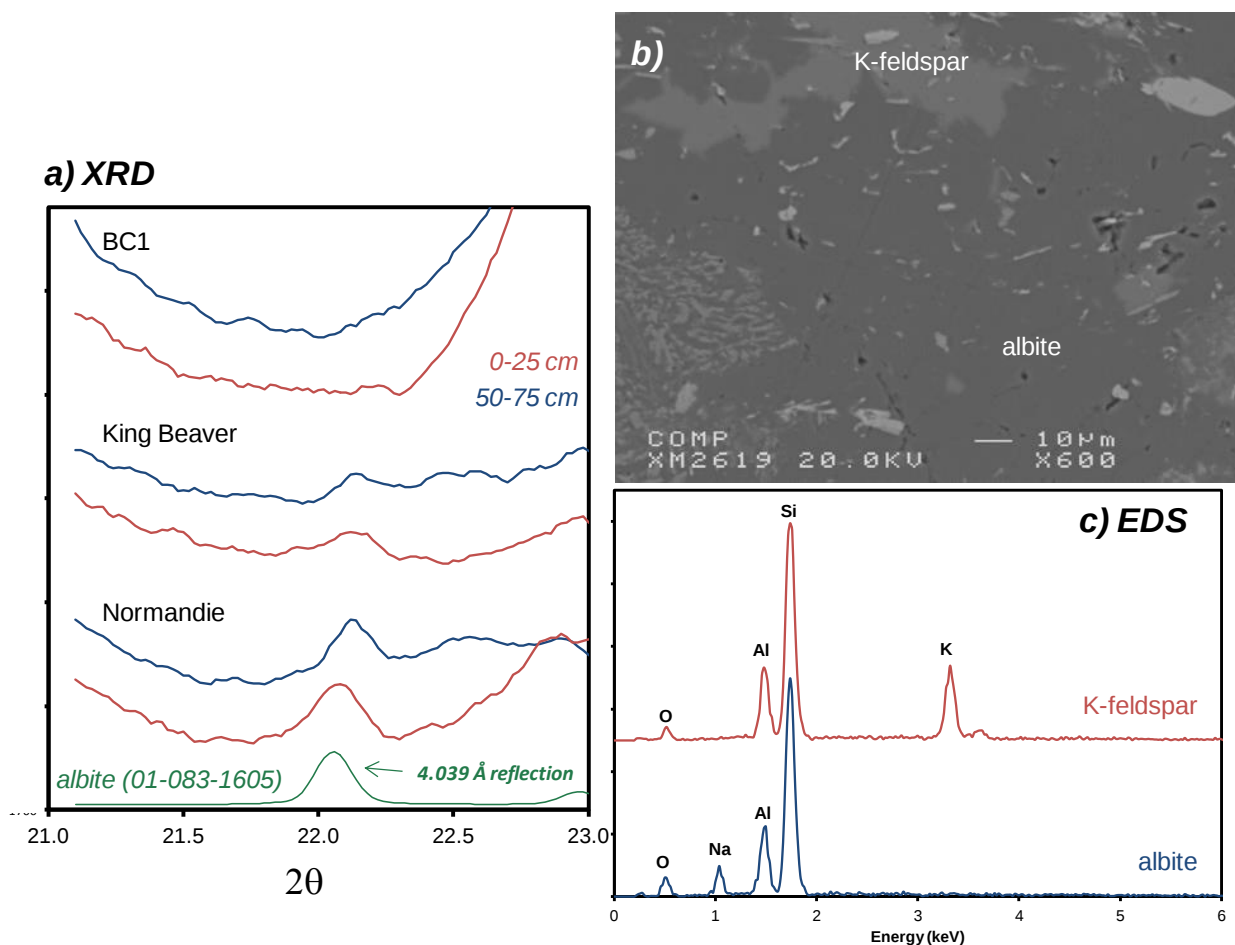


Figure 11. Documentation de la présence de fragments contenant du feldspath. **a)** Région des patrons de diffraction X entourant la réflexion à 4,039 Å de l'albite (-201). L'albite est détectable dans les échantillons des haldes Normandie et King Beaver, mais non dans les échantillons de la halde BC 1. **B)** Image en électrons rétrodiffusés illustrant un gros fragment d'albite associé au feldspath potassique dans la halde Normandie. **C)** Spectres EDS confirmant la signature chimique de l'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) et du feldspath potassique (KAlSi_3O_8) pour le fragment illustré en b).

Caractérisation des phases

Phases silicatées harzburgitiques préservées

L'abondance de reliquats non altérés d'olivine provenant de la harzburgite hôte est relativement faible dans les échantillons de résidus provenant des haldes Normandie et King Beaver, mais elle est suffisamment importante pour apparaître clairement dans les patrons de diffraction X des échantillons de la halde BC I. Dans le cas des pyroxènes, de l'enstatite fraîche a été observée seulement dans les échantillons de BC I, et aucun

diopside présentant des caractéristiques mantelliques ne semble avoir été préservé. Le ratio Mg/(Mg+Fe) et les teneurs en Ni et Cr de la forstérite et de l'enstatite (Tableau 4) sont comparables à ceux observés dans l'olivine et l'orthopyroxène de la harzburgite hôte (Tableau 2). Les deux phases sont invariablement partiellement serpentinisées (figure 12).

Tableau 4. Compositions chimiques représentatives de la forstérite et de l'enstatite observées dans les échantillons de résidus des halles BC I et Normandie.

	BC1					Normandie	
	Forsterite			Enstatite		Forsterite	
<i>wt%</i>							
SiO ₂	41.17	40.95	41.09	57.23	57.01	40.84	41.03
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.01	0.00	0.01	1.68	1.60	0.00	0.01
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.00	0.58	0.51	0.00	0.00
FeO	8.63	8.41	8.81	5.80	5.68	8.53	8.30
MnO	0.10	0.13	0.12	0.15	0.12	0.15	0.11
MgO	50.06	50.40	50.28	34.26	34.57	50.27	50.95
NiO	0.39	0.38	0.40	0.07	0.08	0.39	0.38
CaO	0.02	0.02	0.01	0.64	0.82	0.02	0.01
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.39	100.31	100.72	100.41	100.40	100.21	100.79
<i>cations based on: 4 oxygens</i>				<i>6 oxygens</i>		<i>4 oxygens</i>	
Si	1.001	0.996	0.997	1.963	1.957	0.995	0.993
Al	0.000	0.000	0.000	0.037	0.043	0.000	0.000
Al	0.000	0.000	0.000	0.031	0.022	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.016	0.014	0.000	0.000
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	0.175	0.171	0.179	0.166	0.163	0.174	0.168
Mn	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.003	0.002
Mg	1.813	1.827	1.817	1.752	1.768	1.825	1.837
Ni	0.008	0.008	0.008	0.002	0.002	0.008	0.007
Ca	0.001	0.000	0.000	0.023	0.030	0.001	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	2.999	3.004	3.003	3.995	4.003	3.005	3.008

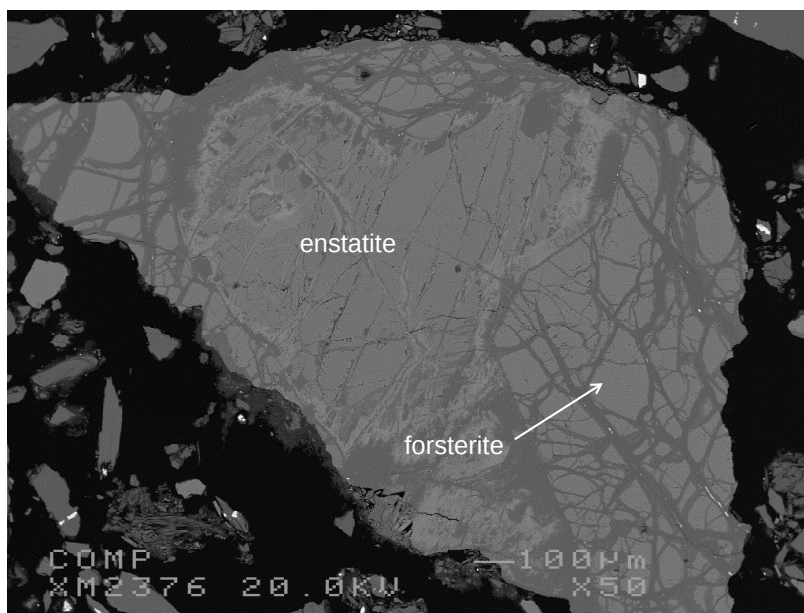


Figure 12. Images en électrons rétrodiffusés de grains partiellement préservés de forstérite et d'enstatite observés dans les échantillons de la halde de résidus BC I.

Serpentine

La serpentine est manifestement la phase dominante dans les matériaux de résidus (90 % ou plus). Elle présente de nombreuses générations de croissance qui ont produit des relations texturales très complexes. Plusieurs études se sont penchées sur cet aspect de façon très détaillée (p. ex., Wicks et Whittaker, 1975; Wicks et Plant, 1979; Laurent et Hébert, 1979; Cogulu et Laurent, 1984). Pour ce qui est de la présente étude, l'objectif est de définir l'étendue des variations chimiques de la serpentine présente dans les résidus. À cette fin, seules quelques grandes catégories, basées principalement sur la chimie et la morphologie, ont été définies.

Des gros grains dominés par la lizardite représentent clairement la phase de serpentine dominante (p. ex., figure 13a). Bon nombre de ces grains contiennent des inclusions de magnétite de diverses tailles ainsi que de multiples inclusions submicrométriques riches en Ni et Fe (figure 13b). Les analyses par micro-XRD confirment que ces très petites inclusions ont une structure correspondante à celle de l'awaruite (Ni_3Fe ; figure 14). D'un point de vue morphologique, le chrysotile est identifié par son habitus fibreux caractéristique. Son abondance est invariablement très inférieure à celle de la lizardite, et elle est généralement présente sous forme de gros agrégats de fibres parallèles

(figures 13c, 15), de petites veines recoupant de gros grains composés principalement de lizardite, et de fibres plus ou moins isolées dans la matrice fine (figure 13d). Enfin, il est utile d'ajouter une dernière catégorie pour inclure la serpentine inhabituellement riche en Fe (> 3 % en poids, exprimé en FeO).

Les compositions chimiques moyennes des trois catégories de serpentine décrites ci-dessus sont présentées dans le tableau 5. Le chrysotile présente une très faible plage de compositions, avec un ratio $Mg/(Mg+Fe)$ légèrement supérieur à celui de la lizardite (voir Hahn-Weinheimer et Hirner, 1975; Laurent et Hébert, 1979; Cogulu et Laurent, 1984). Les deux phases ont une stœchiométrie proche de la serpentine idéale (total des cations ≈ 5), lorsque recalculée sur une base de sept oxygènes (charge équivalente à $5 O^{2-} + 4 OH^-$). D'autre part, la serpentine riche en Fe (teneur moyenne de Fe de 5 à 6 % en poids, exprimée en FeO) présente une déficience importante dans le nombre de cations en coordination octaédrale, ce qui suggère qu'il ne s'agit pas d'une simple substitution de type $Mg \rightarrow Fe^{2+}$. En fait, comme le montre le diagramme ternaire Fe-Mg-Si de la figure 16, la tendance d'enrichissement en Fe est plutôt compatible avec une substitution trioctahédrale à dioctahédrale de la forme $3Mg^{2+} - > 2Fe^{3+}$, pointant vers la composition idéale $Fe^{3+}_2Si_2O_5(OH)_4$ (p. ex., Wicks et Plant, 1979).

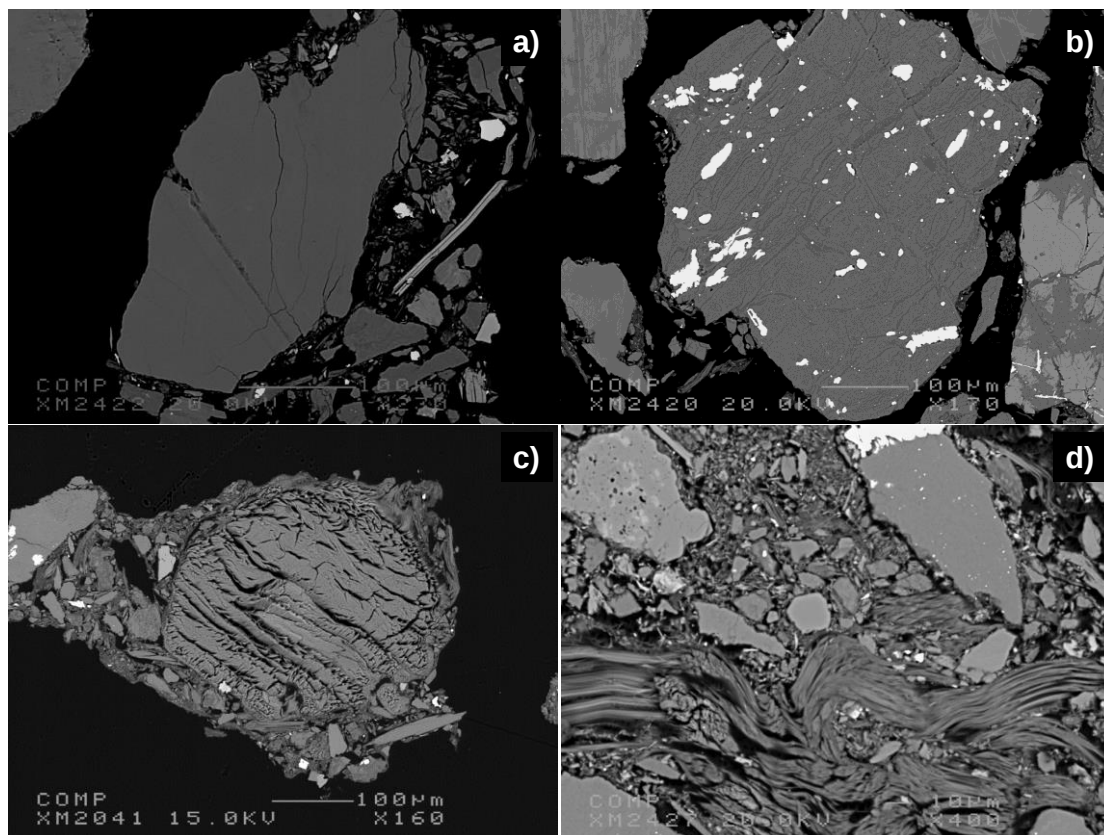


Figure 13. Images en électrons rétrodiffusés de : **a)** gros grains de lizardite exempts d'inclusions; **b)** grains de lizardite avec de larges inclusions de magnétite et de nombreuses particules minuscules d'awaruite; **c)** agrégat de fibres de chrysotile; **d)** brin de fibres de chrysotile dans la matrice fine.

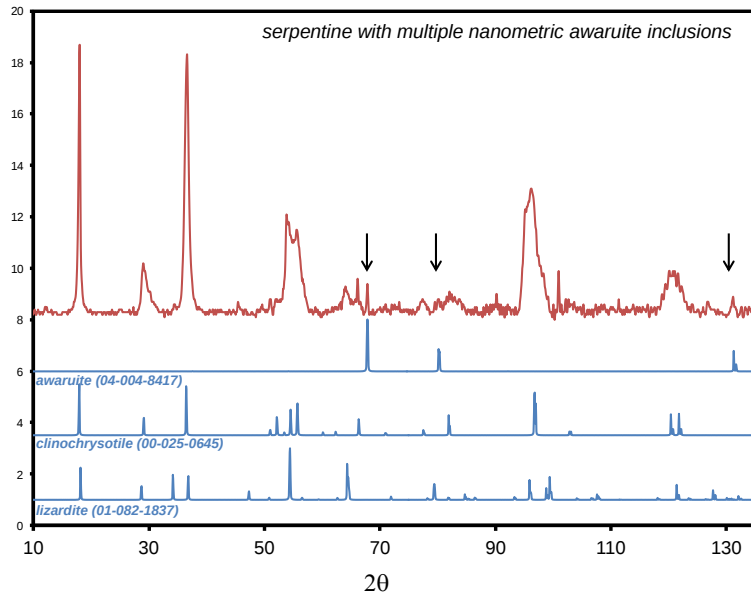


Figure 14. Patron micro-XRD d'un grain de serpentine (formé surtout de lizardite), avec de multiples inclusions d'awaruite. Les principales réflexions de l'awaruite sont indiquées par les flèches noires. Les patrons de référence provenant de la base de données de l'ICDD pour la lizardite, la clinochrysotile et l'awaruite sont également présentés. Données acquises avec la raie Cr K α (longueur d'onde de 2,2896 Å).

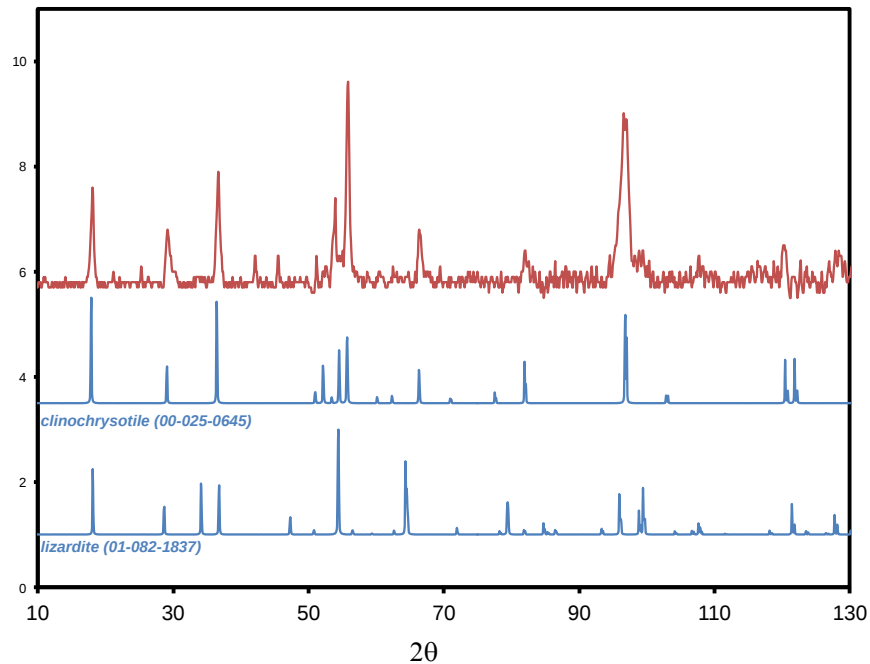


Figure 15. Patron micro-XRD d'un agrégat de fibres de chrysotile (figure 13c). Les patrons de référence provenant de la base de données de l'ICDD pour la lizardite et la clinochrysotile sont également présentés. Données acquises avec la raie Cr K α (longueur d'onde de 2,2896 Å).

Tableau 5. Composition chimique moyenne de la lizardite, de la serpentine riche en Fe et du chrysotile observées dans les échantillons de résidus provenant des haldes Normandie, King Beaver et BC I (N : nombre d'analyses; +/- : écart type)

	Normandie						King Beaver						BC I					
	Lizardite		Fe-rich		Chrysotile		Lizardite		Fe-rich		Chrysotile		Lizardite		Fe-rich		Chrysotile	
wt%	(N=79)	+/-	(N=11)	+/-	(N=13)	+/-	(N=77)	+/-	(N=18)	+/-	(N=7)	+/-	(N=71)	+/-	(N=18)	+/-	(N=7)	+/-
SiO ₂	41.74	1.23	42.23	0.34	41.23	1.32	41.95	0.84	42.32	0.81	41.04	1.02	41.33	1.82	42.12	1.19	41.24	0.93
TiO ₂	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.24	0.24	0.47	0.31	0.12	0.08	0.18	0.16	0.28	0.32	0.11	0.05	0.23	0.24	0.62	0.68	0.03	0.05
Cr ₂ O ₃	0.07	0.13	0.11	0.16	0.04	0.05	0.08	0.14	0.01	0.01	0.03	0.06	0.15	0.22	0.15	0.21	0.00	0.01
FeO	2.43	1.02	6.11	3.21	1.50	0.45	2.30	0.90	4.98	1.40	1.59	0.46	2.46	0.60	5.60	3.11	2.20	0.24
MnO	0.06	0.06	0.10	0.10	0.03	0.02	0.05	0.03	0.10	0.05	0.03	0.02	0.09	0.05	0.17	0.13	0.05	0.01
MgO	40.60	1.04	36.96	3.05	41.11	1.73	40.85	0.83	38.04	1.14	41.15	0.92	40.59	1.06	37.43	2.37	41.29	1.46
NiO	0.12	0.11	0.23	0.13	0.10	0.07	0.10	0.08	0.13	0.07	0.10	0.06	0.09	0.11	0.09	0.13	0.01	0.03
CaO	0.02	0.02	0.04	0.03	0.11	0.17	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.11	0.18	0.03	0.04
Na ₂ O	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
K ₂ O	0.00	0.01	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
Total	85.29		86.28		84.25		85.54		85.90		84.09		84.97		86.29		84.86	
<i>Cation based on 7 oxygens</i>																		
Si	1.992		2.025		1.984		1.994		2.026		1.980		1.982		2.015		1.977	
Al	0.008		0.000		0.007		0.006		0.000		0.006		0.013		0.000		0.002	
Al	0.005		0.027		0.000		0.004		0.016		0.000		0.000		0.035		0.000	
Cr	0.003		0.004		0.001		0.003		0.000		0.001		0.006		0.006		0.000	
Ti	0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000	
Fe	0.097		0.245		0.060		0.091		0.199		0.064		0.099		0.224		0.088	
Mn	0.002		0.004		0.001		0.002		0.004		0.001		0.004		0.007		0.002	
Mg	2.887		2.642		2.948		2.894		2.714		2.959		2.901		2.669		2.950	
Ni	0.005		0.009		0.004		0.004		0.005		0.004		0.003		0.003		0.001	
Ca	0.001		0.002		0.006		0.001		0.002		0.001		0.002		0.005		0.002	
Na	0.000		0.001		0.001		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.001	
K	0.000		0.001		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000	
Total	5.000		4.960		5.012		4.999		4.966		5.016		5.009		4.965		5.022	

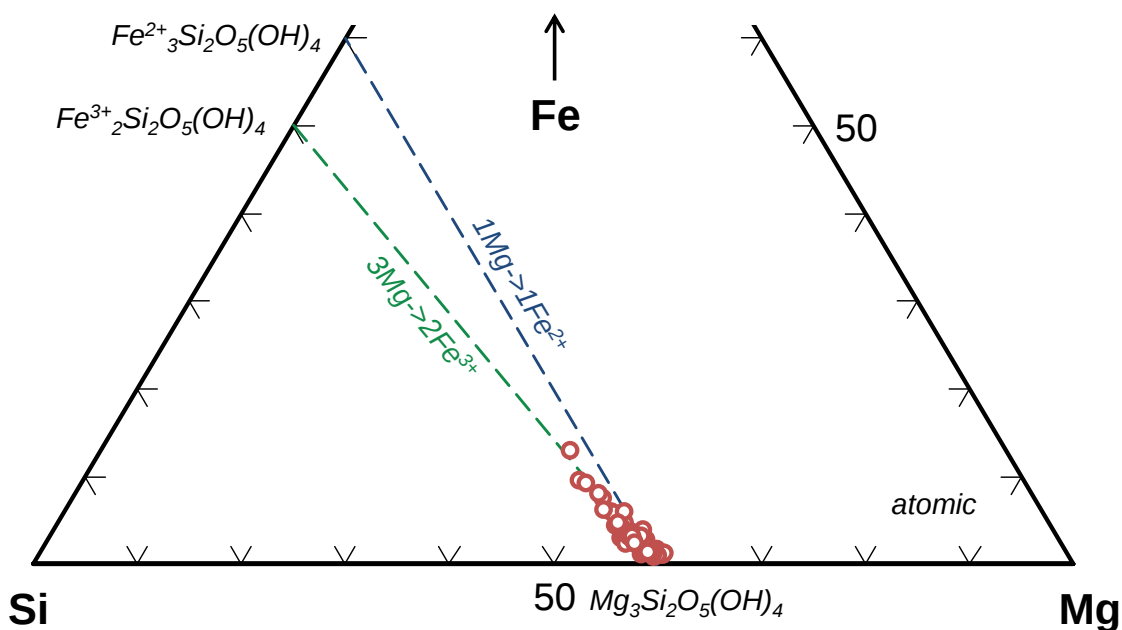


Figure 16. Diagramme ternaire Si-Fe-Mg (proportions atomiques) pour la lizardite et tous les grains de serpentine riches en Fe analysés. La tendance définie suggère une substitution 3Mg → 2Fe³⁺ vers un membre idéal dioctahédrique (Fe³⁺₂Si₂O₅[OH]₄; voir les détails dans le texte).

Les teneurs en Ni et en Cr de la serpentine sont faibles, mais significatives et variables. La répartition statistique du Ni et du Cr dans toute la serpentine analysée est présentée aux figures 17 et 18, respectivement.

Dans le cas du Ni, la répartition est très similaire pour les haldes Normandie et King Beaver, avec une moyenne de 0,1 % en poids. La répartition est relativement progressive, mais présente néanmoins une asymétrie importante vers les concentrations inférieures résultant en une médiane de 0,07 % en poids. Comme la serpentine représente environ 90 % des échantillons de résidus, la proportion de Ni portée par la serpentine représenterait légèrement moins que la moitié de la quantité totale de Ni ($\approx 0,2$ % en poids). Dans le cas de BC I, la moyenne est manifestement inférieure (0,06 % en poids), avec un degré plus grand d'asymétrie indiqué par une faible médiane à 0,02 % en poids. Comme il est mentionné précédemment, la majeure partie du Ni disponible dans le matériau serpentinisé provient de l'olivine forstéritique. Le fait qu'une proportion importante de forstérite nickélifère est préservée dans les résidus de la halde BC I étudiés peut expliquer, en partie du moins, la plus faible concentration de Ni dans les phases de serpentine.

La grande majorité des analyses de serpentine présente de faibles teneurs en Cr ($<0,04$ % en poids), mais une population restreinte avec une concentration significativement plus élevée autour d'environ 0,3 % en poids est observée, ce qui résulte en des moyennes allant de 0,05 % en poids pour Normandie à 0,08 % pour BC I, avec une faible médiane d'environ 0,01 % dans tous les cas. Invariablement, la serpentine riche en Cr entoure des reliquats des phases harzburgitiques primaires, et la majeure partie du Cr provient vraisemblablement du pyroxène. Encore une fois, la teneur en Cr plus élevée dans la serpentine de BC I est probablement liée à un degré de serpentinisation moins élevée de ce matériau. Des teneurs moyennes de 0,05 à 0,08 % en poids dans la serpentine sont compatibles avec la majeure partie du Cr initialement contenu dans le pyroxène (environ 25 % du Cr total; tableau 2), mais avec une répartition très hétérogène.

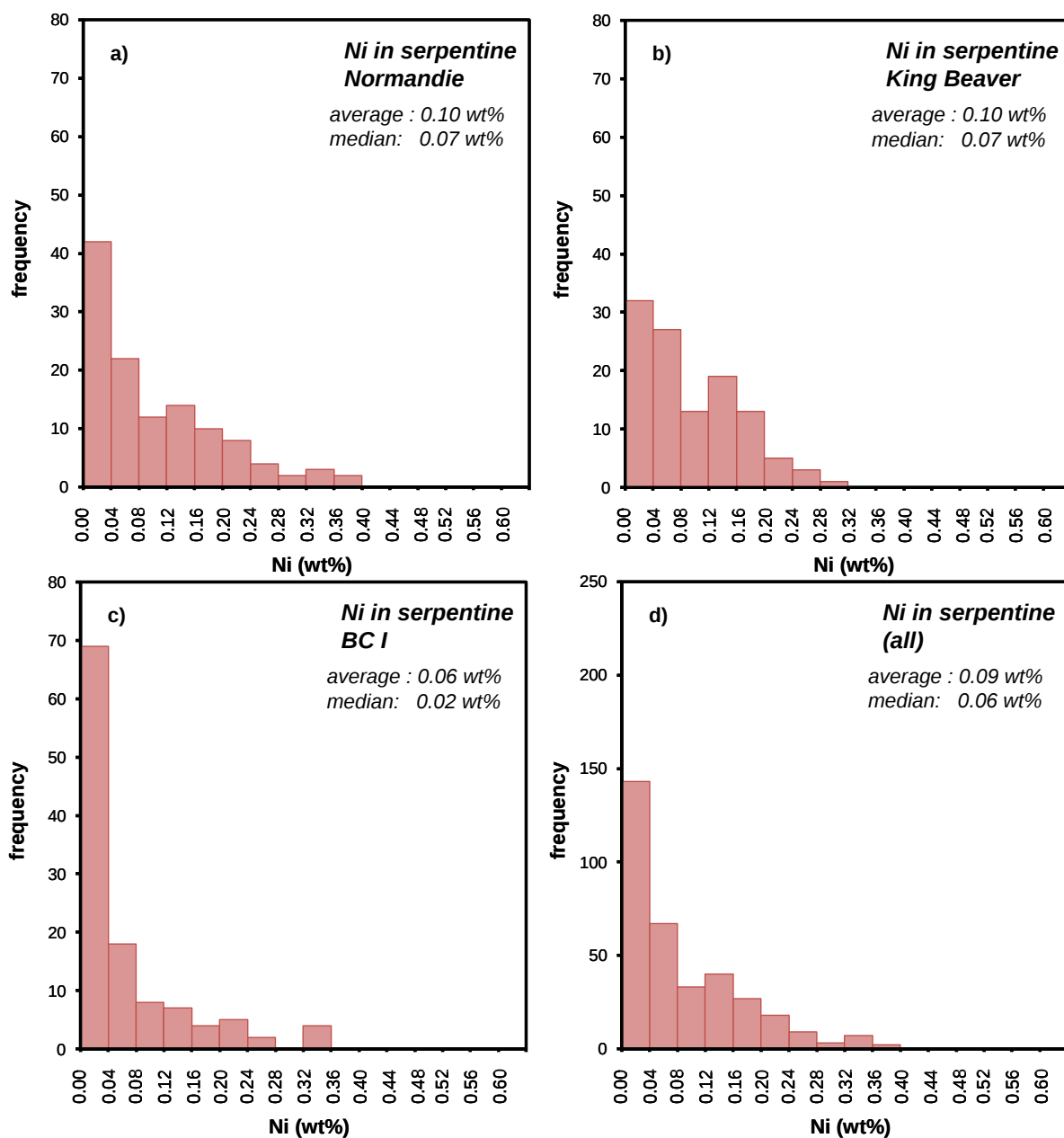


Figure 17. Histogrammes de la répartition du Ni présent dans les grains de serpentinite analysés dans les échantillons de résidus des haldes **a)** Normandie; **b)** King Beaver; **c)** BC I; **d)** les trois haldes.

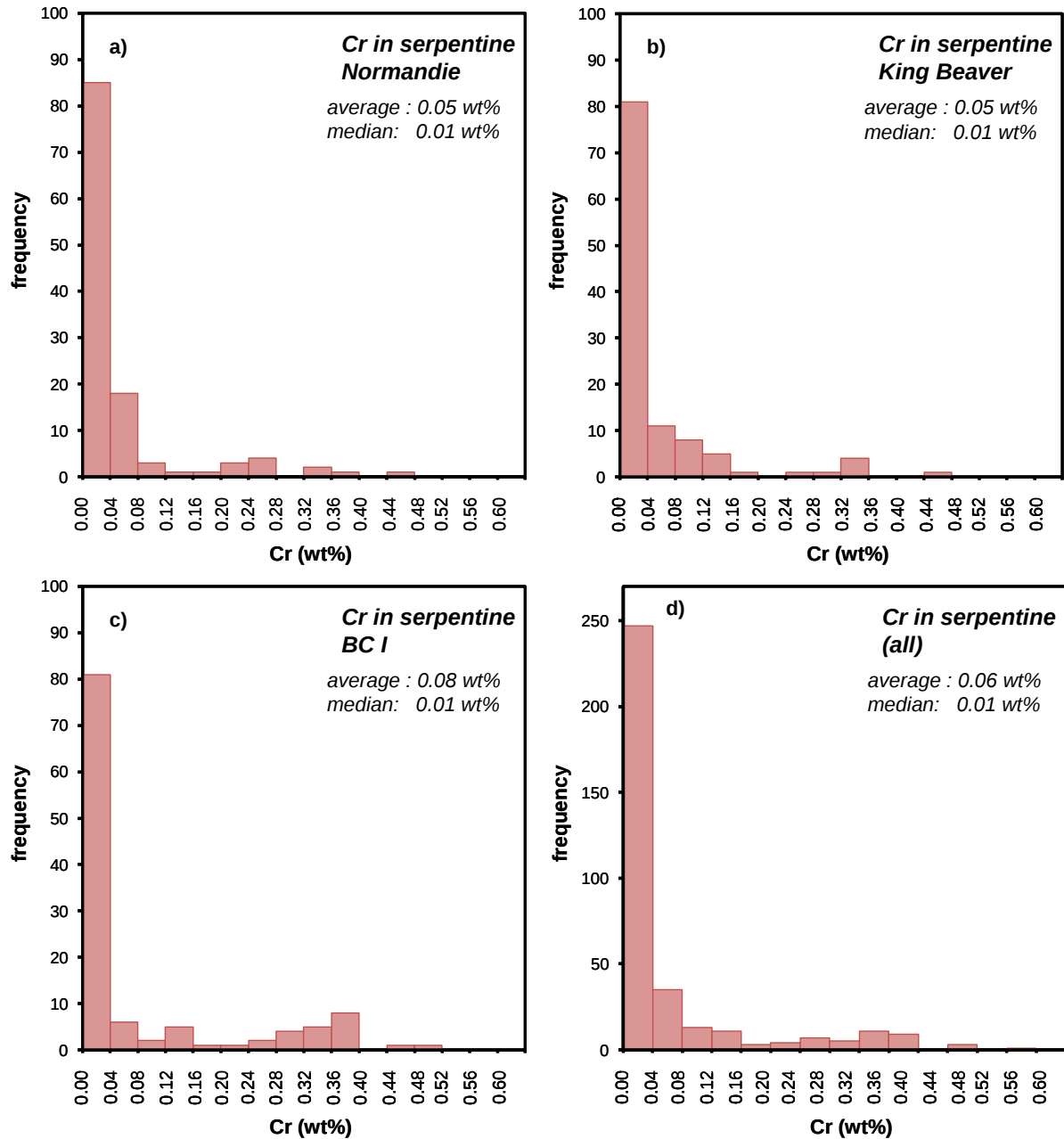


Figure 18. Histogrammes de la répartition du Cr présent dans les grains de serpentinite analysés dans les échantillons de résidus des halles **a)** Normandie; **b)** King Beaver; **c)** BC I; **d)** les trois halles.

Spinelle riche en Cr

De toutes les phase primaires présentes dans la harzburgite hôte, le spinelle riche en Cr, semble être la mieux préservée. Dans les échantillons de toute provenance, de gros grains de spinelle « libérés » (habituellement $> 100 \mu\text{m}$; figure 19) présentent des noyaux d'une composition similaire au spinelle riche en Cr observée dans la harzburgite hôte avec des valeurs de $\text{Cr\#}$ ($100 \times \text{Cr}/[\text{Cr}+\text{Al}]$) allant de 50 à 70 et celles du $\text{Mg\#}$ ($100 \times \text{Mg}/\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}$) d'environ 40 à 55 (tableau 6; figure 20; voir Page et coll., 2008). Le développement de ferritchromite, reconnaissable par un enrichissement en Fe^{2+} et Fe^{3+} aux dépens de Mg et Al et dû à une interaction avec la serpentine (p. ex., Pagé et coll., 2008; Merlini et coll., 2009), est parfois observé à la lisière de certains grains (figures 19a, b, 21; tableau 6). Toutefois, la vaste majorité des grains sont entourés d'auréoles de magnétite presque pure ($\text{Cr}_2\text{O}_3 \approx 2\%$ en poids), présentant un contact franc avec le noyau intérieur de spinelle riche en Cr (figures 19c, 21; tableau 6). Bien que la partie préservée de ces grains grossiers de spinelle riche en Cr soit habituellement assez importante, certains signes indiquent qu'une grande proportion de petits grains de spinelle chromifère est presque entièrement transformée en magnétite (figure 19d).

En termes d'éléments mineurs, le V_2O_3 et le ZnO sont constamment présents, les deux à des concentrations moyennes d'environ 0,25 % en poids (tableau 6). Avec des teneurs en NiO d'environ 0,06 % en poids et une proportion modale inférieure à 1 % dans l'échantillon, le spinelle est porteur d'une fraction négligeable du Ni total présent dans les résidus.

Tableau 6. Compositions chimiques moyennes des noyaux et des auréoles des grains de spinelle riches en Cr observés dans les échantillons de résidus des halles Normandie, King Beaver et BC I (**N** : nombre d'analyses; +/- : écart type). La proportion de Fe₂O₃ et de FeO calculée à partir du FeO total est basée sur la stœchiométrie.

	Normandie					King Beaver			BC I		
	Average (N=18)	core	in rim	out rim		Average (N=20)	core	rim	Average (N=16)	core	rim
wt%											
SiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
TiO ₂	0.04	0.02	0.02	0.02	0.00	0.06	0.06	0.03	0.11	0.04	0.02
Al ₂ O ₃	14.45	3.87	21.60	15.43	0.00	13.40	4.83	21.27	3.45	18.32	5.52
Cr ₂ O ₃	49.02	4.07	43.66	42.62	1.66	51.79	3.69	42.72	39.18	47.95	5.76
V ₂ O ₃	0.24	0.06	0.26	0.27	0.01	0.23	0.05	0.25	0.45	0.24	0.05
Fe ₂ O ₃	6.17	1.53	4.45	10.07	66.84	5.86	3.22	5.89	23.90	4.51	0.71
FeO	19.18	1.82	18.93	23.68	31.17	19.72	2.14	21.82	26.73	17.40	1.32
MnO	0.32	0.07	0.30	0.48	0.06	0.31	0.08	0.36	1.95	0.26	0.04
MgO	9.28	1.35	10.38	6.28	0.12	9.26	1.84	8.53	1.56	11.18	1.23
NiO	0.06	0.01	0.06	0.07	0.01	0.06	0.02	0.06	0.24	0.06	0.02
ZnO	0.27	0.09	0.32	0.38	0.00	0.23	0.14	0.71	0.47	0.22	0.05
Total	99.02		99.98	99.30	100.11	100.93		101.64	98.06	100.18	
<i>Cations based on 32 oxygens</i>											
Si	0.000		0.000	0.000	0.076	0.000		0.000	0.000	0.000	0.016
Ti	0.008		0.003	0.003	0.000	0.012		0.006	0.025	0.008	0.004
Al	4.490		6.408	4.873	0.000	4.114		6.312	1.216	5.469	
Cr	10.216		8.684	9.026	0.402	10.662		8.501	9.251	9.600	10.643
V	0.050		0.052	0.059	0.002	0.048		0.051	0.109	0.048	0.069
Fe ³⁺	1.224		0.842	2.030	15.444	1.147		1.116	5.371	0.860	1.017
Fe ²⁺	4.228		3.984	5.304	8.005	4.294		4.594	6.678	3.686	4.149
Mn	0.072		0.064	0.108	0.015	0.069		0.076	0.494	0.056	0.061
Mg	3.648		3.891	2.506	0.054	3.595		3.199	0.694	4.219	3.749
Ni	0.012		0.012	0.014	0.001	0.013		0.012	0.057	0.013	0.009
Zn	0.053		0.060	0.076	0.001	0.045		0.132	0.104	0.041	0.046
Total	24.000		24.000	24.000	24.000	24.000		24.000	24.000	23.999	24.001
Mg#	46.3		49.4	32.1	0.7	45.6		41.1	9.4	53.4	47.5
Cr#	69.5		57.5	64.9	100.0	72.2		57.4	88.4	63.7	71.5

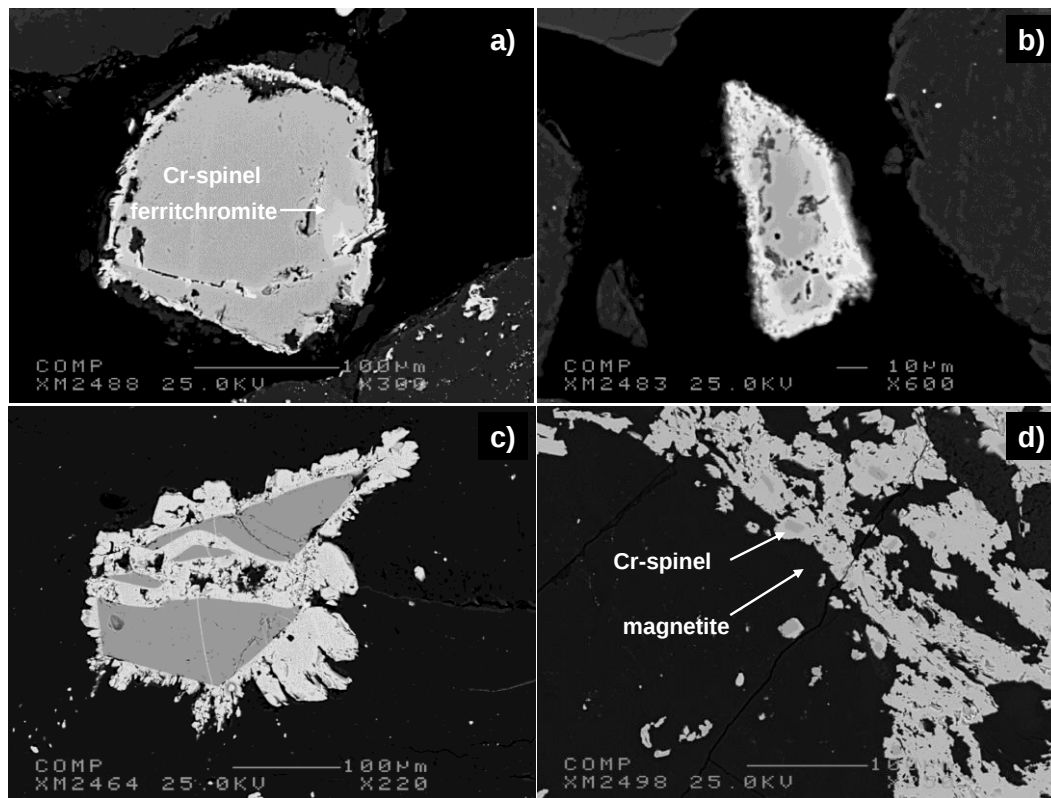


Figure 19. Images en électrons rétrodiffusés présentant les formes types du spinelle riche en Cr :
a) grain grossier de spinelle chromifère avec une petite région de ferritchromite (gris plus pâle) et une mince auréole de magnétite (gris très pâle); **b)** spinelle chromifère, avec auréole de ferritchromite;
c) spinelle chromifère présentant un contact franc avec l'auréole de magnétite; **d)** remplacement important de petits grains de spinelle chromifère par de la magnétite dans un gros grain de serpentine.

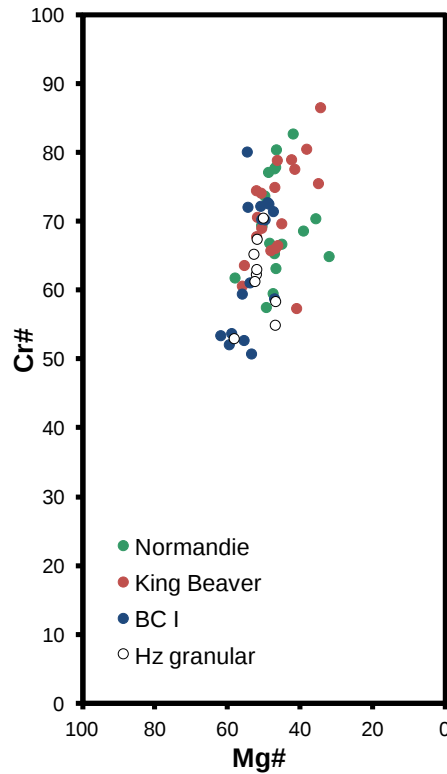


Figure 20. Valeurs du Mg# ($\text{Mg}/[\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}]$) en fonction de celles du Cr# ($\text{Cr}/[\text{Cr}+\text{Al}]$) pour les noyaux de spinelle chromifère dans les échantillons de résidus et pour le spinelle riche en Cr provenant de la harzburgite tectonisée (Hz) de l'ophiolite de Thetford Mines (données pour la harzburgite tirées de Pagé et coll., 2008).

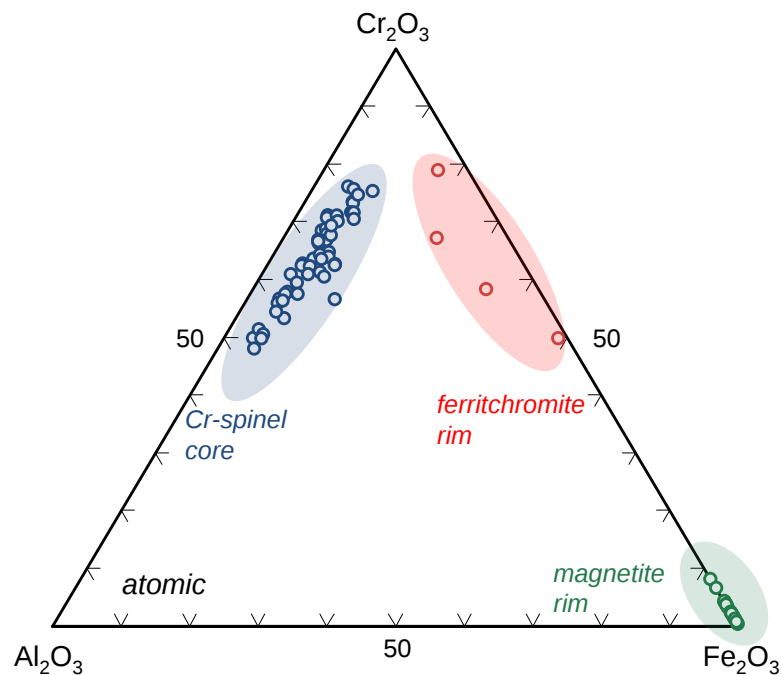


Figure 21. Diagramme ternaire Al_2O_3 - Cr_2O_3 - Fe_2O_3 (proportions atomiques), soulignant les différences de composition entre les noyaux et les auréoles du spinelle chromifère.

Magnétite

Après la serpentine, la phase la plus abondante observée dans tous les échantillons de résidus est la magnétite. Elle se présente sous différentes formes, soit de larges grains libérés, soit des inclusions grossières ou micrométriques dans la serpentine souvent accompagnés de fines inclusions d'awaruite (figure 22) ou encore, comme mentionné ci-dessus, des auréoles autour du spinelle riche en Cr (figure 19). La magnétite est la principale phase porteuse du Fe libéré pendant la serpentinisation des diverses phases primaires dans la harzburgite hôte. Hormis une concentration importante de Cr_2O_3 ($\approx 2\%$ en poids) lorsqu'elle est présente dans les auréoles autour du spinelle chromifère (tableau 6), les compositions de la magnétite sont assez près de celles du membre idéal Fe_3O_4 (tableau 7). Compte tenu de l'abondance modale de la magnétite ($< 10\%$) et de sa teneur en NiO ($\approx 0,04\%$ en poids), elle ne constitue pas une phase porteuse de Ni importante.

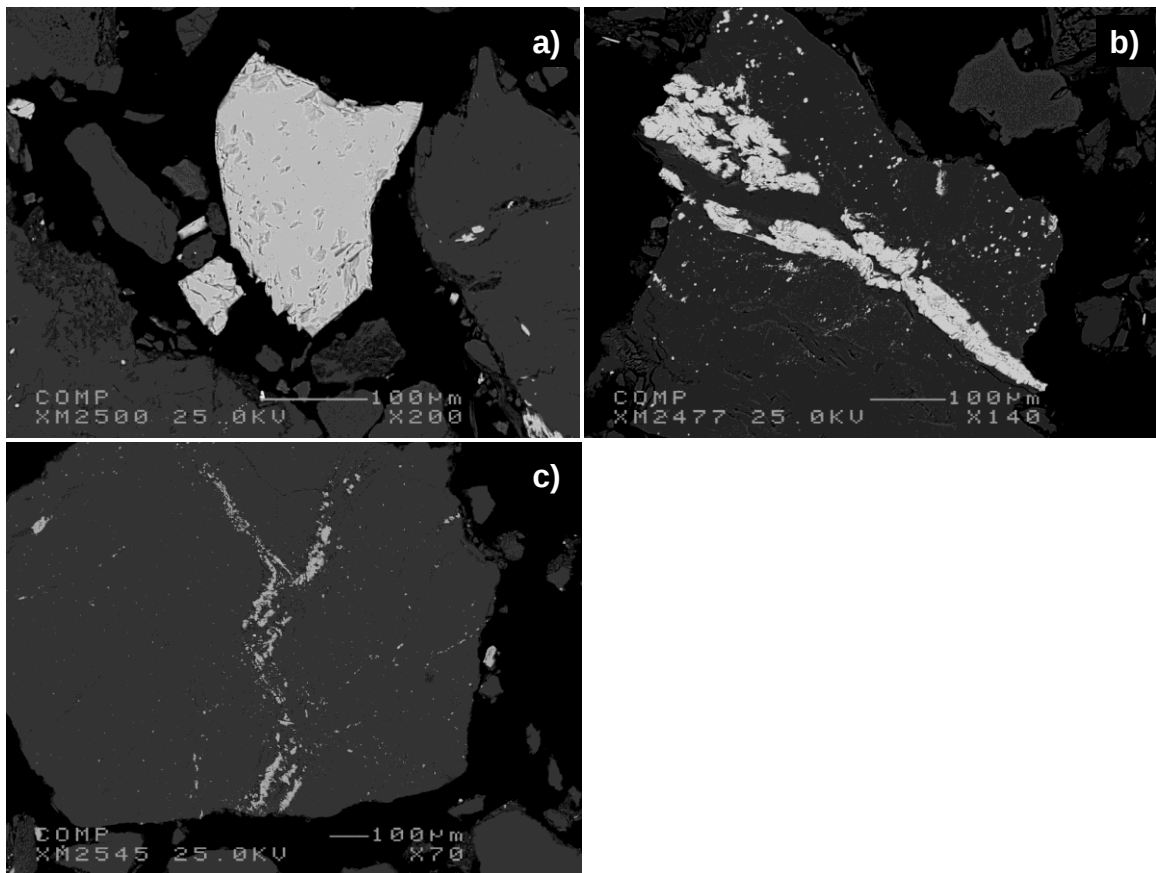


Figure 22. Images en électrons rétrodiffusés présentant les formes types de la magnétite : **a)** large grain de magnétite libéré; **b)** inclusions grossières et micrométriques de magnétite dans la serpentine (sont également présentes des inclusions submicrométriques d'awaruite); **c)** filonnets de magnétite dans la serpentine, associés de nouveau à de nombreuses fines inclusions d'awaruite.

Tableau 7. Composition chimique moyenne des grains de magnétite observés dans les échantillons de résidus des halles Normandie, King Beaver et BC I (**N** : nombre d'analyses; **+/-** : écart type). La proportion de Fe₂O₃ et de FeO calculée à partir du FeO total est basée sur la stœchiométrie.

	Normandie		King Beaver		BC I	
wt%	(N=16)	+/-	(N=18)	+/-	(N=19)	+/-
SiO ₂	0.18	0.20	0.15	0.18	0.28	0.41
TiO ₂	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.10	0.17	0.10	0.10	0.00	0.02
V ₂ O ₃	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Fe ₂ O ₃	68.46	0.66	68.31	0.74	67.85	1.00
FeO	30.68	0.28	30.69	0.20	30.50	0.66
MnO	0.07	0.02	0.05	0.02	0.19	0.57
MgO	0.28	0.20	0.21	0.12	0.26	0.27
NiO	0.04	0.05	0.04	0.05	0.03	0.07
ZnO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03
Total	99.82		99.57		99.14	
<i>cations based on 32 oxygens</i>						
Si	0.056		0.045		0.086	
Ti	0.001		0.003		0.001	
Al	0.001		0.001		0.001	
Cr	0.023		0.024		0.001	
V	0.001		0.001		0.000	
Fe ³⁺	15.861		15.878		15.823	
Fe ²⁺	7.900		7.928		7.906	
Mn	0.019		0.014		0.051	
Mg	0.128		0.095		0.120	
Ni	0.009		0.010		0.007	
Zn	0.000		0.001		0.002	
Total	24.000		24.000		24.000	

Awaruite (Ni₃Fe)

La présence et l'importance potentielle de l'awaruite dans la serpentinite de Thetford Mines est documentée depuis longtemps (p. ex., Nickel, 1959). Elle est présente sous deux formes très distinctes, soit des grains grossiers (> 5 µm) (figure 23a-d) ou une multitude de particules nanométriques (habituellement ≤ 500 nm) dispersées localement dans de larges grains de serpentine (figure 23e-h). L'examen de grains nanométriques individuels sous un fort grossissement révèle la présence d'une auréole sombre. L'auréole est trop mince (< 100 nm) pour en obtenir une composition fiable; toutefois, les analyses EDS suggèrent qu'elle peut représenter une couche d'oxydation.

En termes de composition, l'abondance de Fe et de Ni dans l'awaruite grossière va de 25,5 à 29,7 % mol et de 66,2 à 72,7 % mol, respectivement (tableau 8). Les teneurs en Co sont importantes, allant de 0,7 à 5,7 % mol. Le Cu est présent, mais seulement comme élément mineur, avec des concentrations atteignant 0,3 % en poids. La

caractérisation par SXRF a révélé la présence possible d'As et de Ge à l'état trace (figure 24). Cette observation a été confirmée par des analyses EPMA qui indiquent des concentrations de Ge allant de valeurs inférieures au seuil de détection (0,006 % en poids) jusqu'à 0,02 % (tableau 8). Les concentrations d'As vont de valeurs inférieures au seuil de détection de 0,007 % en poids jusqu'à 0,02 %, bien que dans un cas, où l'awaruite coexiste avec un arséniure de Ni (figure 23d), les concentrations d'As atteignent 0,121 %. On n'a relevé, sans surprise, aucun signe de concentrations significatives d'éléments précieux, comme le Pt trouvé en quantités élevées dans de rares grains d'awaruite contenus dans de la chromitite de l'ophiolite de Thetford Mines (Corriveau et Laflamme, 1990).

Tableau 8. Composition chimique de grains d'awaruite « grossiers » représentatifs observés dans les échantillons de résidus provenant des haldes Normandie, King Beaver et BC I. Les concentrations en rouge (sans incertitude) sont inférieures au seuil de détection. (at % : proportion atomique en %; +/- : incertitude définie comme étant égale à 3σ , basée sur les statistiques de comptage)

Normandie										
wt%	1	+/-	2	+/-	3	+/-	4	+/-	5	+/-
Fe	24.54	0.27	24.65	0.28	24.93	0.28	26.67	0.29	24.68	0.28
Ni	72.19	0.50	72.31	0.50	71.73	0.49	67.64	0.48	71.47	0.49
Co	2.48	0.07	2.39	0.07	2.37	0.07	5.86	0.11	2.58	0.08
Cu	0.09	0.06	0.11	0.06	0.11	0.06	0.10	0.06	0.13	0.06
Ge	0.011	0.007	0.010	0.007	0.021	0.007	0.003		0.009	0.007
As	0.000		0.003		0.001		0.057	0.007	0.000	
Total	99.32		99.47		99.16		100.33		98.87	
at%										
Fe	25.65		25.72		26.10		27.58		25.91	
Ni	71.79		71.80		71.43		66.54		71.39	
Co	2.46		2.37		2.35		5.74		2.57	
Cu	0.09		0.10		0.10		0.09		0.12	
Ge	0.01		0.01		0.02		0.00		0.01	
As	0.00		0.00		0.00		0.04		0.00	
Total	100.00		100.00		100.00		100.00		100.00	
King Beaver										
wt%	1	+/-	2	+/-	3	+/-	4	+/-	5	+/-
Fe	26.51	0.29	26.67	0.29	24.30	0.26	25.92	0.27	26.06	0.27
Ni	71.65	0.49	69.26	0.48	73.05	0.46	71.48	0.45	72.32	0.46
Co	2.50	0.07	2.92	0.08	1.78	0.06	2.62	0.07	2.24	0.07
Cu	0.17	0.06	0.20	0.06	n.a.		n.a.		n.a.	
Ge	0.000		0.003		0.011	0.006	0.011	0.007	0.002	
As	0.005		0.012	0.007	0.001		0.005		0.001	
Total	100.84		99.08		99.14		100.04		100.62	
at%										
Fe	27.28		27.92		25.45		26.88		26.87	
Ni	70.13		68.98		72.77		70.53		70.94	
Co	2.44		2.90		1.77		2.57		2.19	
Cu	0.15		0.19		0.00		0.00		0.00	
Ge	0.00		0.00		0.01		0.01		0.00	
As	0.00		0.01		0.00		0.00		0.00	
Total	100.00		100.00		100.00		100.00		100.00	
BC I										
wt%	1	+/-	2	+/-	3	+/-	4	+/-	5	+/-
Fe	26.60	0.29	28.38	0.30	26.12	0.28	28.56	0.30	24.83	0.28
Ni	71.92	0.50	68.85	0.49	72.20	0.50	67.07	0.48	71.65	0.49
Co	0.67	0.05	3.79	0.09	2.18	0.07	3.84	0.09	2.36	0.07
Cu	0.29	0.06	0.19	0.06	0.15	0.06	0.25	0.06	0.12	0.06
Ge	0.000		0.009	0.007	0.002		0.007	0.007	0.020	0.007
As	0.133	0.007	0.020	0.007	0.001		0.121	0.007	0.001	
Total	99.61		101.25		100.65		99.85		98.98	
at%										
Fe	27.70		29.05		26.92		29.65		26.04	
Ni	71.27		67.07		70.81		66.24		71.49	
Co	0.66		3.68		2.13		3.78		2.35	
Cu	0.26		0.17		0.14		0.23		0.11	
Ge	0.00		0.01		0.00		0.01		0.02	
As	0.10		0.02		0.00		0.09		0.00	
Total	100.00		100.00		100.00		100.00		100.00	

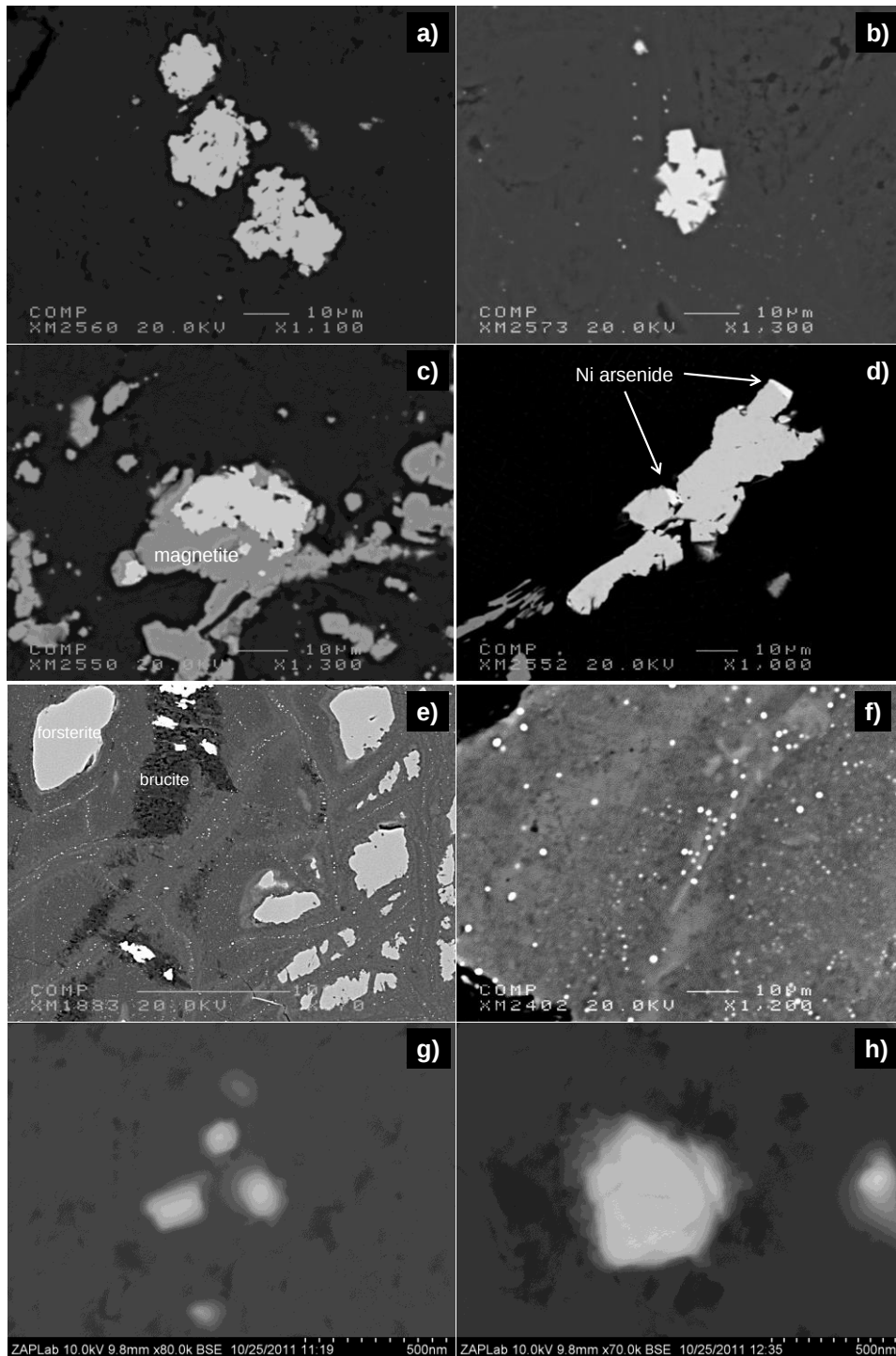


Figure 23. Images en électrons rétrodiffusés présentant les formes grossière et nanométrique type de l'awaruite : **a)** grains grossiers d'awaruite dans la serpentine; **b)** grain grossier d'awaruite présentant un contraste net de taille avec les grains d'awaruite nanométriques environnants à l'intérieur de la serpentine; **c)** grain grossier d'awaruite associé à la magnétite; **d)** grain grossier d'awaruite associé à de l'arséniure de Ni; **e)** gros grain de serpentine, avec reliquats d'olivine, présentant une multitude d'inclusions nanométriques d'awaruite; **f)** région d'un grain de serpentine avec une densité élevée d'awaruite nanométrique; **g)** et **h)** images à grossissement élevé de grains nanométriques d'awaruite (< 500 nm), entourés d'auroles sombres.

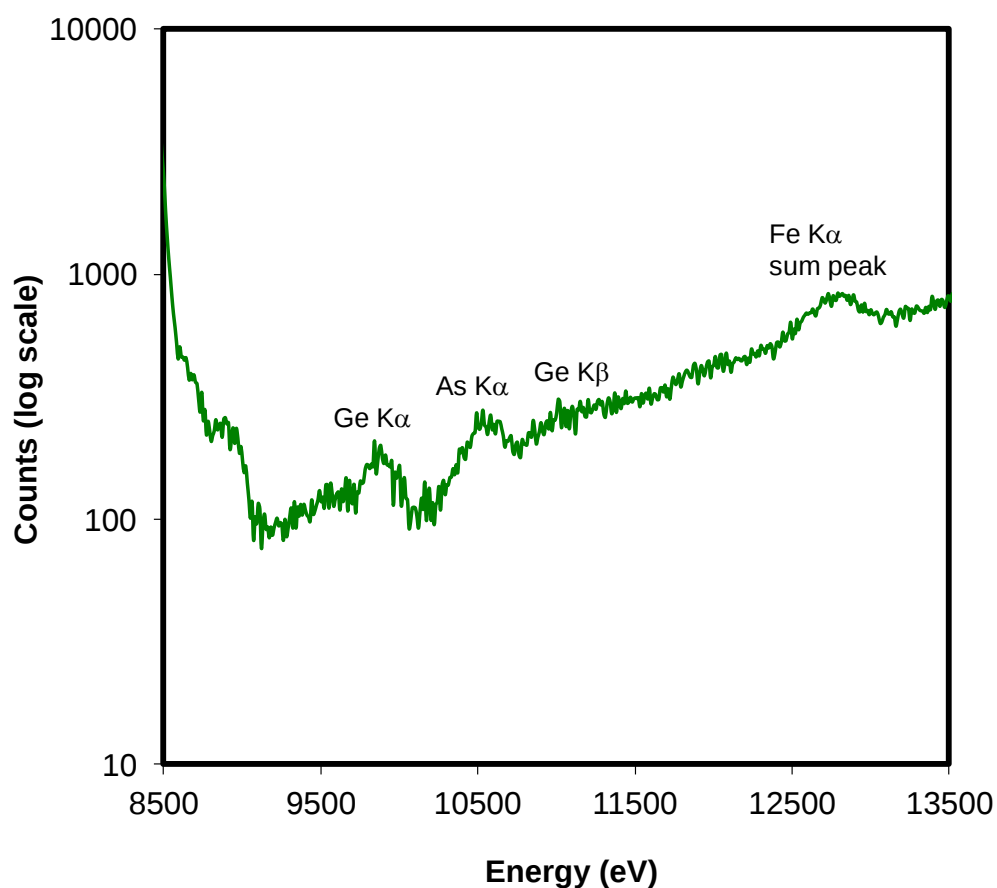


Figure 24. Spectre SXR-EDS obtenu sur un grain grossier d'awaruite, révélant la présence de faibles quantités de Ge et d'As.

Il est plus difficile d'obtenir la composition détaillée des particules nanométriques d'awaruite en raison de leur très petite taille, bien en deçà du volume d'excitation type des techniques de microanalyse de rayons X utilisant un faisceau incident d'électrons. Néanmoins, comme ces inclusions sont contenues dans la serpentine, une phase présentant de faibles quantités de Fe et de Ni, il est facile de confirmer qu'elles représentent effectivement des particules riches en Ni et Fe sous formes réduites. De plus, les analyses micro-XRD de grains de serpentine contenant une proportion élevée de ces particules révèlent clairement qu'elles ont une structure cristalline correspondant à celle de l'awaruite (figure 14).

Comme le Ni est un élément majeur dans l'awaruite, il est important d'en obtenir la proportion modale. Cela est particulièrement vrai pour l'awaruite grossière, car, dans le

contexte d'une éventuelle extraction du Ni, elle sera beaucoup plus facile à concentrer par broyage et séparation physique (p. ex., procédés magnétiques). Comme il est indiqué dans la section sur les techniques d'analyse, l'analyse d'images au moyen du MLA peut résoudre des particules d'une taille supérieure à 3 μm , par discrimination basée sur les niveaux de gris des électrons rétrodiffusés et la composition. Comme tous les grains grossiers d'awaruite observés sont d'une taille supérieure à 5 micromètres, cette technique est adéquate pour obtenir leurs abondances modales. Nous avons utilisé l'échantillon où le plus grand nombre de grains grossiers d'awaruite ont été observés par analyse SEM classique. Une superficie de 87 mm^2 d'une section polie a été balayée, ce qui a permis d'identifier un total de 74 000 grains. Parmi ces grains, la superficie modale couverte par l'awaruite grossière représentait 0,01 %, ce qui, après correction pour tenir compte de la gravité spécifique, donne une proportion en poids d'environ 0,03 %. À cette concentration et considérant une teneur en Ni de 72 % en poids dans l'awaruite (p. ex., tableau 8), la contribution totale du type grossier serait de 0,02 % en poids, représentant environ 10 % de la quantité totale de Ni dans les résidus.

La proportion d'awaruite nanométrique est évidemment beaucoup plus difficile à estimer. Sur une base de bilan massique, en considérant le niveau de substitution du magnésium par le nickel dans la serpentine, ainsi que la proportion d'awaruite grossière mesurée, qui sont les deux seules autres phases porteuses d'une quantité significative de Ni, on peut conclure que l'awaruite nanométrique représente environ 50 % du Ni total dans les échantillons de résidus, avec des variations systématiques associées à l'étendue de la serpentinisation (p. ex., préservation de la forstérite ou oxydation du Ni pendant l'événement continental de serpentinisation). Le fait qu'une proportion importante de Ni est encore sous forme réduite se trouve confirmé par analyse de la position et de la forme la raie $L\alpha$ du Ni lors des analyses EPMA. Comme les électrons de valence participent à la transition électronique responsable de l'émission des photons Ni $L\alpha$, ceci entraîne des décalages prévisibles dans l'énergie de transition lorsque l'environnement chimique local du Ni change. Afin d'estimer l'état chimique « global » du Ni, une petite quantité de résidus a été broyée en une poudre très fine (granulométrie < 5 μm) et compressée sous forme d'une pastille qui a ensuite été polie.

Des balayages multiples (≈ 100) de la région spectrale entourant la raie $L\alpha$ du Ni ont été obtenus à des endroits aléatoires sur la surface de la pastille polie, avec un faisceau d'électrons défocalisé à 50 μm . On a aussi recueilli les spectres de référence pour l'awaruite (Ni^0) et la forstérite (Ni^{2+}). L'examen des spectres du Ni $L\alpha$ démontre clairement une contribution significative de l'awaruite (figure 25). On envisage de recourir à une technique plus sophistiquée, soit la spectroscopie d'absorption des rayons X par rayonnement synchrotron, pour mieux quantifier la contribution des divers minéraux nickélifères et caractériser la structure moléculaire du Ni.

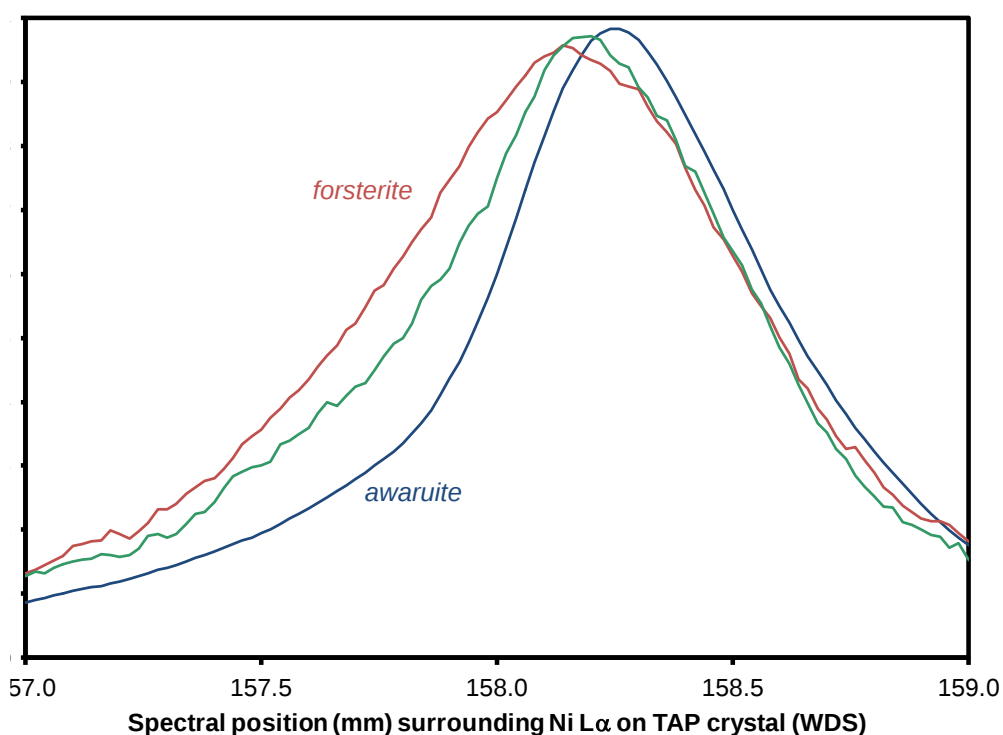
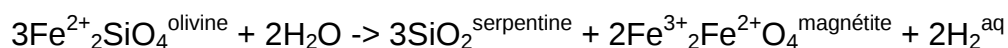


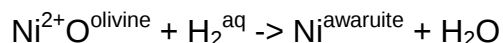
Figure 25. Spectre cumulatif (vert) obtenu par balayages multiples du spectromètre à dispersion de longueur d'onde, dans la région spectrale entourant la raie Ni $L\alpha$ au moyen d'un cristal de diffraction TAP sur une pastille comprimée faite d'une poudre fine de matériau prélevé au sommet de la halde BC I, entre 50 et 75 cm de profondeur. Les spectres de référence sont présentés pour la forstérite (Ni^{2+} ; en rouge) et l'awaruite (Ni^0 , en bleu) (voir les détails dans le texte).

Il n'y a pas d'association claire entre les types grossiers et nanométriques, et de plus leurs formes et répartitions sont très distinctes, ce qui suggère qu'ils ont une origine différente. Il est convenu, en général, que la présence d'awaruite est associée à des conditions réductrices, imposées par la génération d'hydrogène via l'oxydation partielle

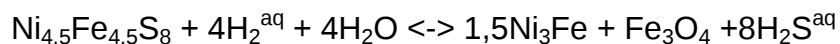
du Fe libéré par l'olivine pendant la serpentinisation dans la lithosphère océanique (p. ex., Wicks et Whittaker, 1977; Laurent et Hébert, 1979; Sleep et coll., 2004; Klein et Bach 2009) :



Comme le Ni est réparti de façon homogène comme élément mineur dans l'olivine, le minéral dominant dans la harzburgite, la réduction du NiO en solution solide dans la forstérite (et/ou la serpentine),



devrait être généralisée et est fort probablement l'origine de l'awaruite nanométrique répartie de façon homogène dans les gros grains de serpentine. En contrepartie, comme l'ont souligné Klein et Bach (2009), la production importante d'hydrogène aura également l'effet de réduire la fugacité du soufre, et d'expulser le soufre des sulfures sous forme de H₂S (Klein et Bach, 2009). Ces auteurs présentent des preuves texturales de la désulfuration de la pentlandite en awaruite (+/- magnétite) dans une péridotite serpentinisée provenant de la ride médio-atlantique et prélevée lors du programme Ocean Drilling Program (ODP), tronçon 209 (voir leur figure 2b, c), suivant des réactions du type :



Dans ce contexte, il est intéressant de noter qu'un rare grain de pentlandite qui a pu être identifié dans les échantillons des résidus de la halde BC I présentant des signes comparables de remplacement partiel par l'awaruite (figure 26a). Ceci suggère que la désulfuration des sulfures pendant l'événement de « serpentinisation océanique » est l'origine possible d'une partie de l'awaruite grossière observée dans les résidus.

Sulfures nickélifères

Les sulfures nickélifères, comme la heazlewoodite et la pentlandite, sont présents dans les serpentinites de la région de Thetford Mines (p. ex., Chamberlain, 1966). Quelques grains de heazlewoodite ont été trouvés dans tous les échantillons de résidus (p. ex., figure 26). Toutefois, l'abondance est beaucoup plus faible que pour l'awaruite grossière ($< 0,01\%$). La composition des grains de heazlewoodite analysés (tableau 9) est très proche de la formule idéale (Ni_3S_2), avec de faibles teneurs en Co (0,0 – 0,2 % en poids). Quelques grains semblent remplacer presque entièrement le NiS (millérite; figure 26c, d). Ceci suggère également une tendance à la désulfuration. Comme nous l'avons mentionné précédemment, quelques rares grains de pentlandite d'une composition proche de $\text{Fe}_{4,6}\text{Ni}_4\text{Co}_{0,4}\text{S}_8$ (tableau 9) ont uniquement été observés dans les échantillons de résidus de BC I, lesquels semblent avoir la plus grande abondance de phases harzburgitiques préservées.

Bien que le Ni soit un constituant majeur de ces phases sulfurées, leur abondance modale est tellement faible que leur contribution à la quantité totale de Ni est insignifiante. Une abondance très faible en sulfures est également indiquée par la très faible teneur en S global ($< 0,01\%$) typiquement observée dans nombre des résidus de la région de Thetford Mines (voir, par exemple, les analyses chimiques présentées par Dupéré et coll., 2007).

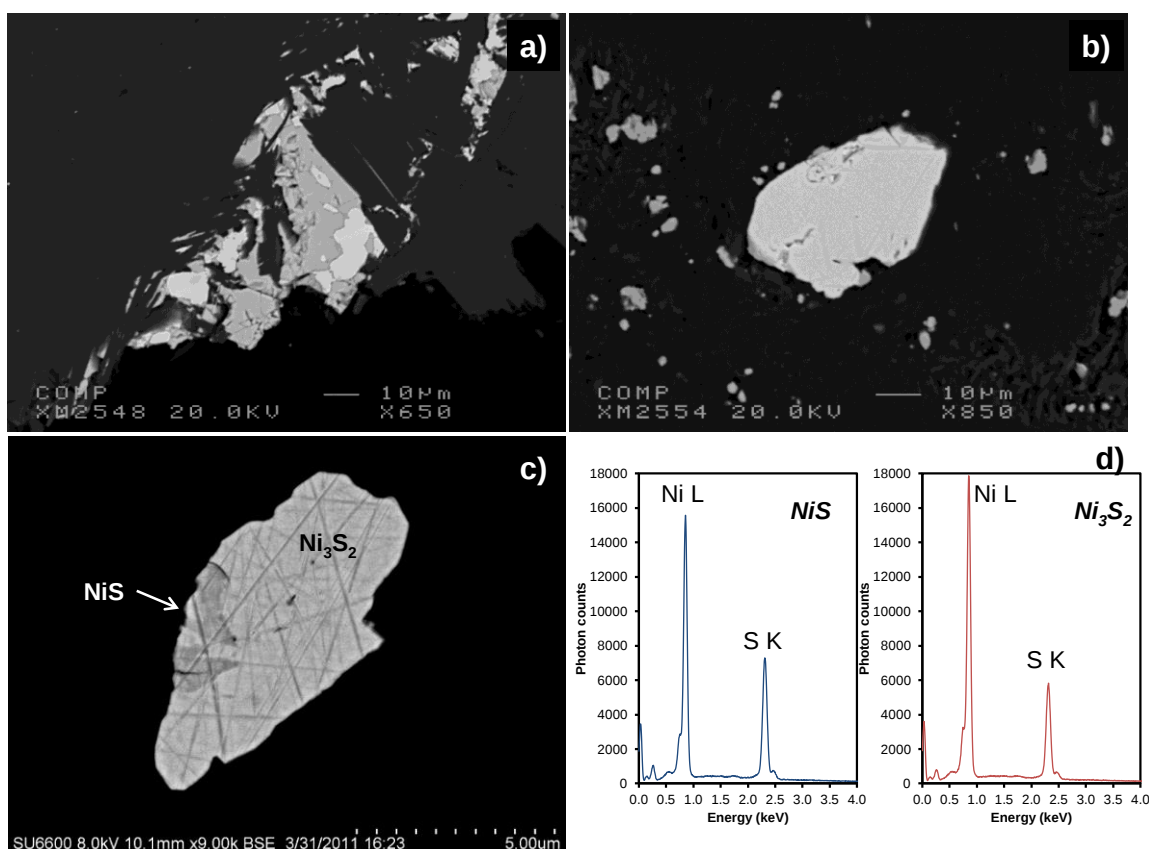


Figure 26. Images en électrons rétrodiffusés : **a)** d'un grain de pentlandite (gris moyen) associé à de l'awaruite grossière (gris clair), **b)** d'un grain de heazlewoodite, **c)** d'un grain de heazlewoodite (Ni_3S_2) qui semble remplacer la millérite (NiS); et **d)** spectres EDS obtenus pour la millérite et la heazlewoodite illustrées en c).

Tableau 9. Composition chimique de grains de pentlandite et d'heazlewoodite représentatifs observés dans les échantillons de résidus des halles Normandie, King Beaver et BC I. Les concentrations en rouge (sans incertitude) sont inférieures au seuil de détection. (at % : proportions atomiques en %; +/- : incertitude définie comme étant égale à 3σ , d'après les statistiques de comptage).

Heazlewoodite												Pentlandite		
Normandie				King Beaver				BC I				BC I		
wt%	+/-		+/-		+/-		+/-		+/-		+/-		+/-	
Fe	0.76	0.06	0.70	0.06	0.60	0.05	0.48	0.05	0.24	0.04	0.23	0.04	32.97	0.34
Ni	71.71	0.48	72.75	0.49	72.81	0.49	73.10	0.49	72.29	0.49	71.95	0.49	29.99	0.32
Co	0.00		0.27	0.04	0.07	0.03	0.21	0.04	0.00		0.00		3.14	0.08
S	26.59	0.19	26.67	0.19	26.61	0.19	26.82	0.19	26.61	0.19	26.73	0.19	32.69	0.20
Total	99.06		100.39		100.09		100.61		99.14		98.91		98.79	
at%														
Fe	0.66		0.60		0.52		0.41		0.21		0.20		27.15	
Ni	59.17		59.34		59.56		59.47		59.61		59.40		23.50	
Co	0.00		0.22		0.06		0.17		0.00		0.00		2.45	
S	40.17		39.84		39.86		39.95		40.18		40.40		46.90	
Total	100.00		100.00		100.00		100.00		100.00		100.00		100.00	

Chlorite

De gros grains de chlorite (figure 27) ainsi que de petits fragments dans la matrice fine sont observés dans tous les échantillons de résidus, mais, comme nous l'avons souligné précédemment, ils ont tendance à être plus abondants dans les échantillons prélevés près de la surface (0-25 cm) et sur les flancs des haldes. Comme le montre le tableau 10, il s'agit de clinochlore avec une teneur assez élevée en Mg ($Mg/[Mg+Fe] = 0,87-0,93$) et qui contient parfois des concentrations importantes de NiO et de Cr_2O_3 (jusqu'à 0,21 et 0,22 % en poids, respectivement). Comme son abondance modale est d'au plus quelques points de pourcentage, on ne peut pas considérer la chlorite comme un porteur important de Ni et de Cr.

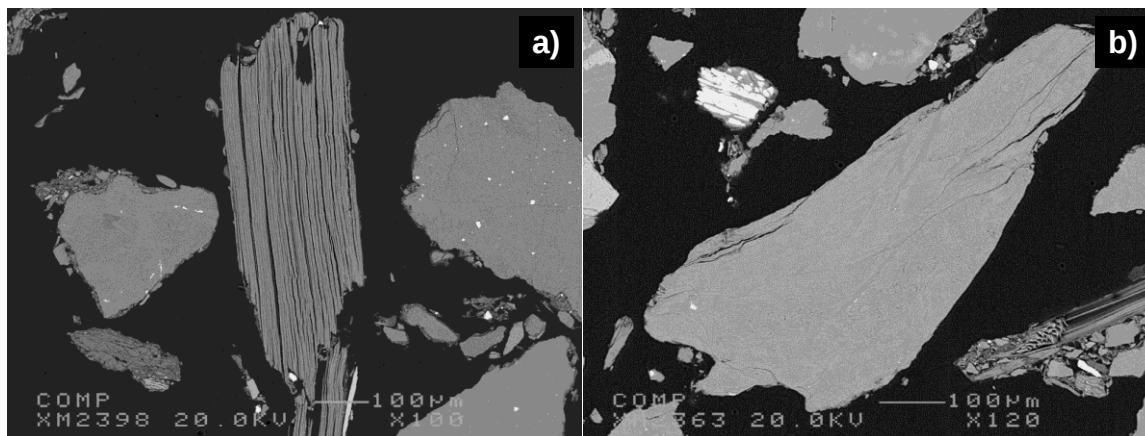


Figure 27. Images en électrons rétrodiffusés montrant la forme représentative des gros grains de clinochlore.

Tableau 10. Composition chimique de grains de clinochlore représentatifs observés dans les échantillons de résidus des haldes de King Beaver et BC I.

	King Beaver							BC I	
<i>wt%</i>									
SiO ₂	33.49	33.53	33.69	33.18	34.73	31.19	30.79	33.62	33.60
TiO ₂	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	12.77	13.51	12.90	14.66	12.92	16.48	16.09	13.46	13.27
Cr ₂ O ₃	0.14	0.07	0.22	0.03	0.00	0.06	0.03	0.05	0.02
FeO	4.07	4.07	4.20	5.72	4.74	7.90	7.93	4.21	4.13
MnO	0.03	0.02	0.01	0.56	0.38	0.16	0.16	0.04	0.02
MgO	35.05	34.57	34.87	31.28	31.06	30.49	30.44	34.78	34.86
NiO	0.20	0.21	0.18	0.04	0.04	0.14	0.14	0.11	0.11
CaO	0.01	0.01	0.00	0.09	0.24	0.01	0.03	0.01	0.02
Na ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01
K ₂ O	0.00	0.00	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.36
Total	85.77	86.00	86.33	85.58	84.15	86.44	85.62	86.55	86.39
<i>cation based on 28 oxygens</i>									
Si	6.442	6.423	6.450	6.436	6.789	6.062	6.051	6.414	6.421
Al	1.558	1.577	1.550	1.564	1.211	1.938	1.949	1.586	1.579
Al	1.337	1.474	1.363	1.787	1.768	1.838	1.780	1.441	1.411
Cr	0.022	0.010	0.033	0.004	0.000	0.009	0.005	0.007	0.003
Ti	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
Fe	0.655	0.652	0.672	0.928	0.775	1.284	1.303	0.671	0.660
Mn	0.004	0.004	0.002	0.091	0.063	0.026	0.027	0.007	0.004
Mg	10.047	9.870	9.948	9.042	9.051	8.832	8.915	9.886	9.931
Ni	0.031	0.032	0.028	0.006	0.007	0.022	0.022	0.016	0.017
Ca	0.002	0.002	0.000	0.018	0.049	0.003	0.006	0.001	0.004
Na	0.001	0.003	0.000	0.010	0.012	0.004	0.000	0.000	0.004
K	0.000	0.001	0.064	0.000	0.000	0.000	0.000	0.067	0.088
Total	20.099	20.049	20.110	19.888	19.725	20.019	20.059	20.098	20.120

L'abondance plus élevée de chlorite sur les flancs à la base de la halde et à leur sommet près de la surface, suggère qu'elle peut être due à une ségrégation vers le haut des matériaux fins et des matériaux à grande aire surfacique, par exemple pendant le transport hydrique. On peut alors se demander si le même mécanisme aurait pu également concentrer les fibres de chrysotile. Pour tester cette théorie une partie des matériaux échantillonnés entre 50 et 75 cm de profondeur au sommet de la halde Normandie a été immergée dans de l'eau distillée et agitée fortement. Après avoir laissé décanter et sécher, la partie supérieure de l'échantillon a été récupérée et analysée par diffraction X. Une comparaison entre le patron de diffraction obtenu et celui du matériau non traité est présentée à la figure 28. Les principaux changements sont, de fait, une augmentation de la proportion de chlorite et une diminution de la proportion de magnétite (et de spinelle). Toutefois, on ne voit pas de changement manifeste dans l'abondance relative du chrysotile par rapport à la lizardite, ce qui

suggère que leur proportion est comparable dans la fraction fine fines et dans l'échantillon global. Cela n'élimine cependant pas la possibilité d'une augmentation de la proportion des fibres détachées.

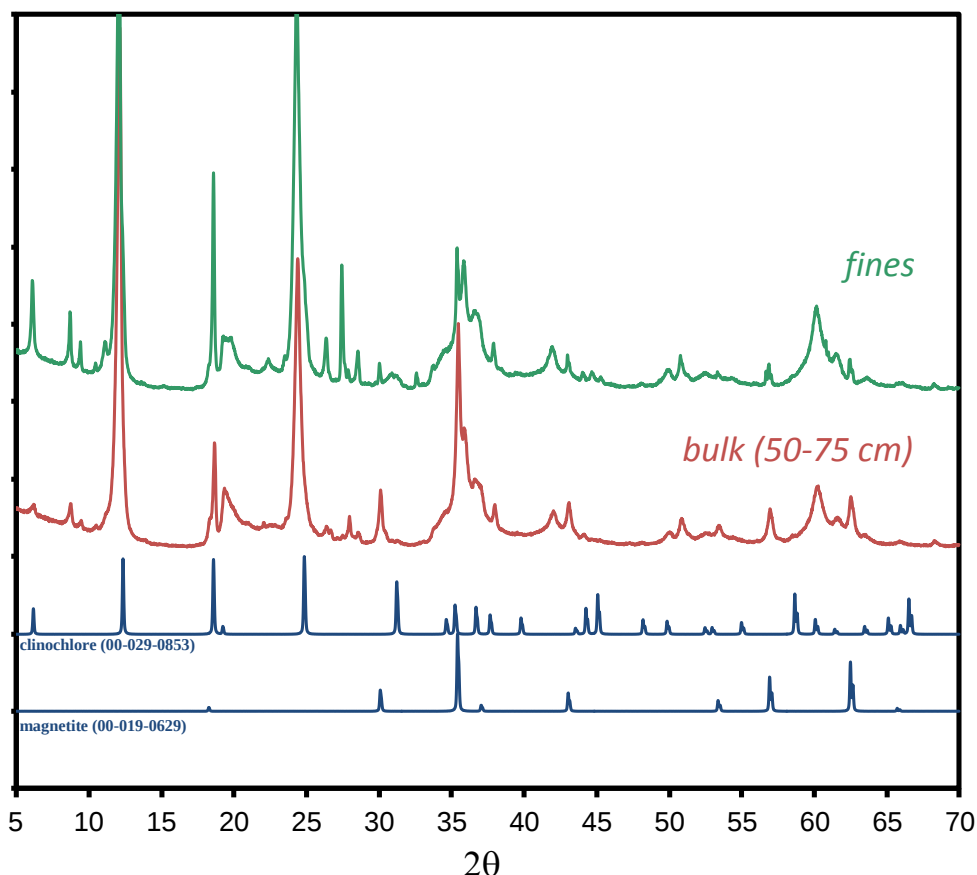


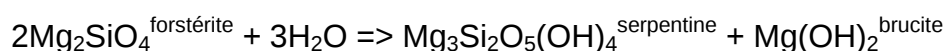
Figure 28. Comparaison des patrons de diffraction X sur poudre obtenus pour la fraction fine (*fines*) et l'échantillon global (*bulk*) provenant d'une profondeur de 50 à 75 cm au sommet de la halde de résidus Normandie. La fraction fine est plus riche en clinocllore et plus pauvre en magnétite (voir les détails dans le texte). Données acquises avec la raie Cu K α (longueur d'onde : 1,54059 Å).

Brucite et hydromagnésite

La présence de concentrations significatives de brucite [Mg(OH)₂] au sommet des trois haldes de résidus étudiées est confirmée à des profondeurs de 25 cm et plus, par l'examen de la réflexion principale de la brucite (101) sur le patron de diffraction X de la figure 29a. La prééminence de ce pic de diffraction, couplée aux observations SEM, suggère que l'abondance de la brucite est de l'ordre de quelques pourcents. Il est intéressant de noter que, dans tous les cas (Normandie, King Beaver, BC I), la brucite

est absente près de la surface (< 25 cm; figure 29a). Ceci est aussi vrai pour les échantillons prélevés sur les flancs, où l'absence de brucite est même constatée à de plus grandes profondeurs (figure 29b).

La brucite est présente sous forme d'intercroissance à l'intérieur des gros grains de serpentine (figure 30a, b) et s'est, fort probablement, formée lors de la serpentinisation, pour accommoder l'excès de Mg libéré par l'olivine, un procédé que l'on peut représenter approximativement par la réaction simplifiée suivante :



La composition de la brucite obtenue par EPMA indique qu'elle est habituellement assez riche en Fe (FeO 5-10 % en poids; tableau 11). Comme elle est souvent en intercroissance intime avec la serpentine, les analyses donnent parfois des quantités appréciables de silice. L'analyse par micro-XRD confirme que ces intercroissances sont réellement composées de brucite (figure 31).

Bien qu'elle soit absente près de la surface (< 25 cm), on peut trouver des indices de sa présence antérieure sous la forme de grandes régions vides à l'intérieur des grains de serpentine (figure 30c, d) qui rappellent la morphologie type de la brucite intacte à de plus grandes profondeurs (figure 30a, b). Ces textures présentent de grandes similarités avec les textures de lixiviation obtenues par Chen de Dutrisac (2000) après avoir fait réagir des échantillons de serpentine dans un medium de HCl 7,0 M, dans le but d'étudier l'évolution minéralogique durant le procédé d'extraction du Mg Magnola de Noranda. Ces observations suggèrent fortement qu'un contact avec une eau de surface légèrement acide entraîne la dissolution du Mg par décomposition de la brucite. Les échantillons prélevés sur les flancs représentent un matériau érodé transporté à la base des haldes, et, par conséquent, beaucoup moins cohésif et plus perméable à l'eau, ce qui permet au front de lixiviation d'atteindre une plus grande profondeur.

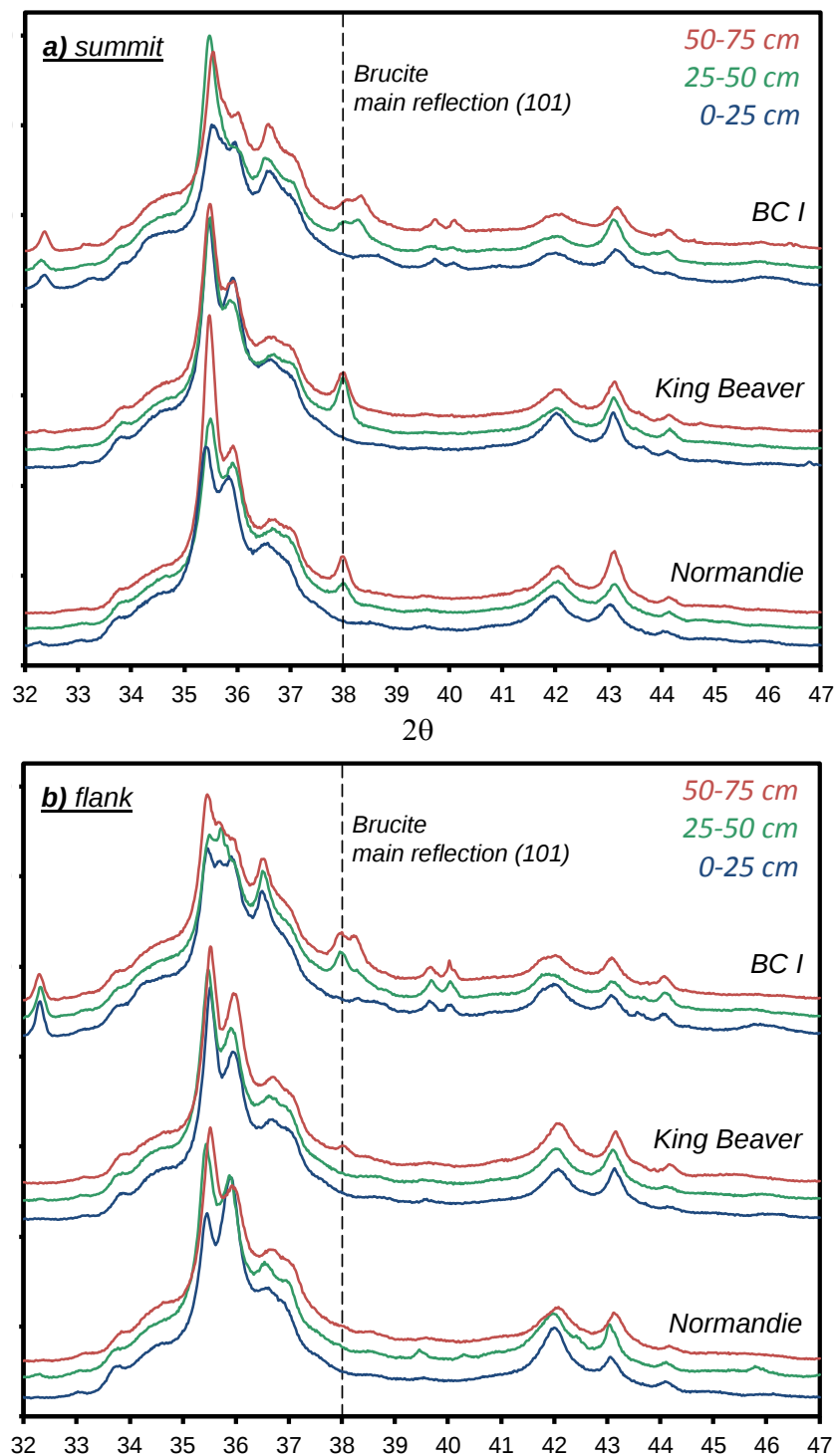


Figure 29. Portion des patrons de diffraction $X^{2\theta}$ autour de la réflexion principale de la brucite (101) : **a)** comparaison de la présence de brucite en fonction de la profondeur pour les échantillons prélevés au sommet des haldes Normandie, King Beaver et BC I; **b)** comparaison similaire pour les échantillons prélevés sur leurs flancs (voir les détails dans le texte). Données acquises avec la raie Cu $K\alpha$ (longueur d'onde de 1,54059 Å).

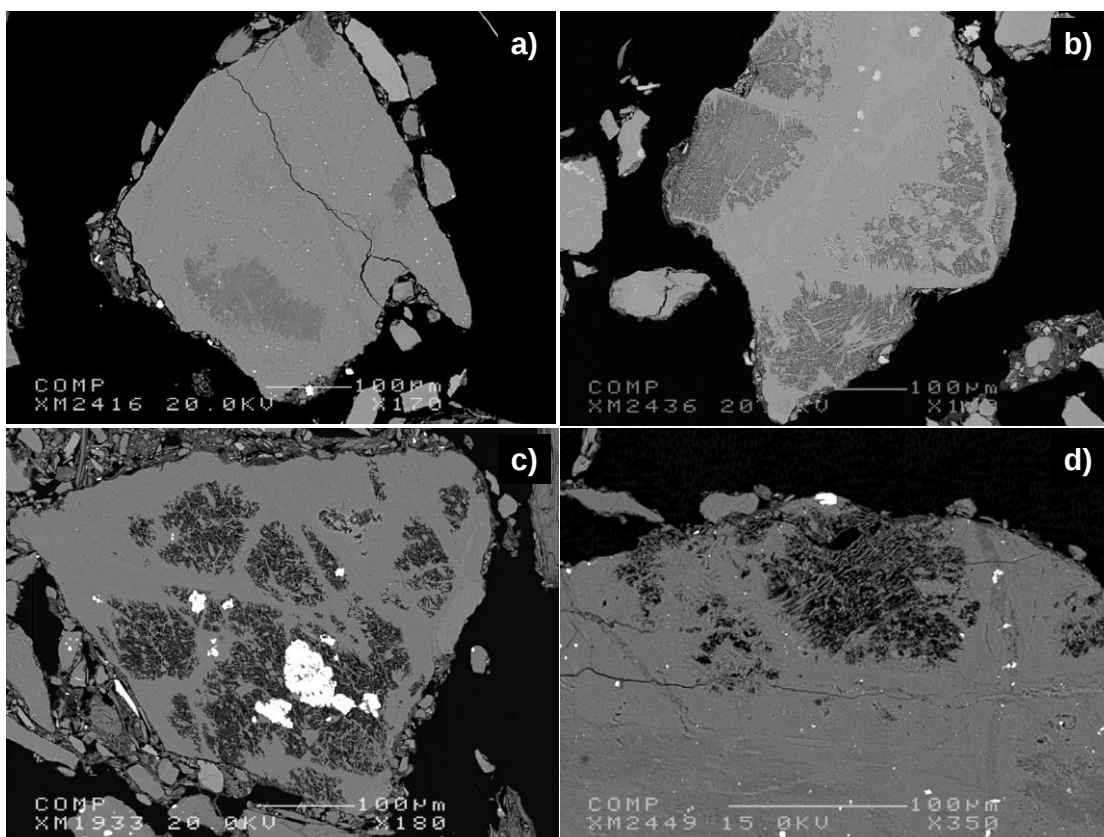


Figure 30. a) et b) Images en électrons rétrodiffusés montrant la forme représentative de la brucite (gris foncé), en intercroissance dans la serpentine (gris clair); c) et d) images en électrons rétrodiffusés montrant des régions vides (foncées) à l'intérieur des grains de serpentine, suggérant une lixiviation de la brucite (voir les détails dans le texte).

Tableau 11. Compositions chimiques représentatives de brucite en intercroissance et d'hydromagnésite.

	Brucite		Hydromagnésite	
wt%	1	2	3	4
SiO ₂	1.05	13.01	0.11	0.20
Al ₂ O ₃	0.00	0.03	0.01	0.02
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.01
FeO	7.89	4.98	0.12	0.12
MnO	0.24	0.17	0.01	0.00
MgO	58.52	56.73	41.97	41.27
NiO	0.00	0.02	0.01	0.00
CaO	0.02	0.01	0.00	0.04
Total	67.74	74.96	42.23	41.66
mol%				
SiO ₂	1.105	12.767	0.177	0.319
Al ₂ O ₃	0.000	0.017	0.010	0.020
Cr ₂ O ₃	0.000	0.001	0.000	0.007
FeO	6.941	4.085	0.159	0.159
MnO	0.216	0.143	0.014	0.000
MgO	91.719	82.964	99.623	99.418
NiO	0.000	0.015	0.009	0.000
CaO	0.019	0.008	0.008	0.078
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

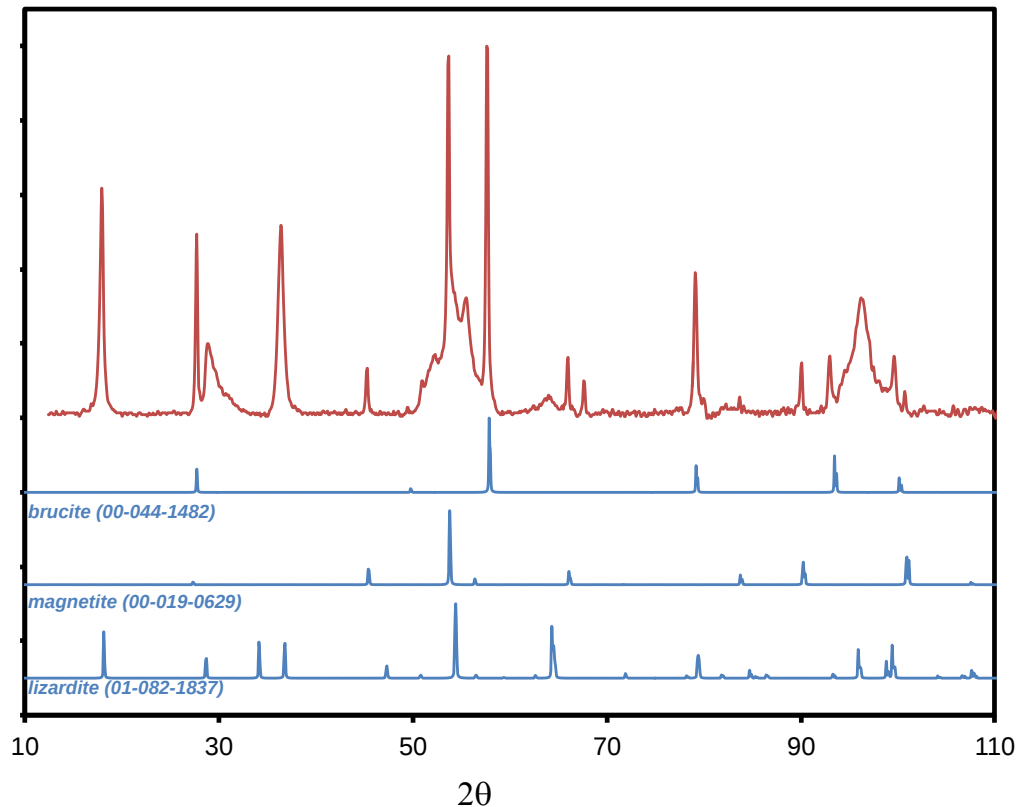


Figure 31. Patron micro-XRD d'un grain de serpentine avec intercroissances de brucite. Les patrons de référence provenant de la base de données de l'ICDD pour la brucite, la lizardite et la magnétite sont également présentés. Données acquises avec la raie Cr K α (longueur d'onde : 2,2896 Å).

La cimentation partielle des résidus dans les haldes par le carbonate de magnésium hydraté est une caractéristique commune des échantillons prélevés près de la surface (figure 32). L'analyse par micro-XRD indique qu'il s'agit surtout d'hydromagnésite $[\text{Mg}_5(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ (figure 33). Au plan de la composition, elle est proche de la composition du membre idéal (tableau 11). L'hydromagnésite se présente sous forme de rosettes constituées de multiples cristaux allongés dont la croissance semble résulter d'auto-nucléation ou de nucléation sur les parois de grains divers (figure 32). Dans la plupart des cas, nous n'avons relevé aucun remplacement évident de la serpentine par l'hydromagnésite et, en fait, les lisières d'hydromagnésite sont continues lorsqu'elles croisent diverses phases comme la serpentine et l'olivine (figure 32a). Ces observations indiquent que l'hydromagnésite se forme par précipitation.

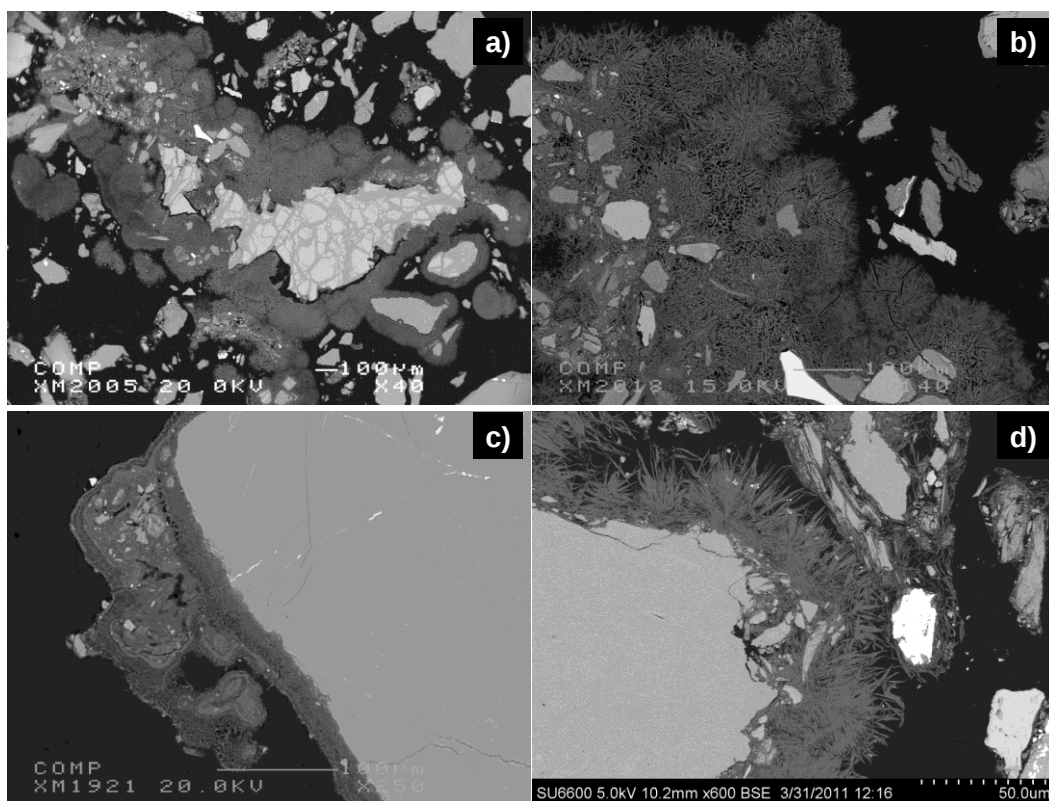


Figure 32. Images en électrons rétrodiffusés illustrant des occurrences types de croissance d'hydromagnésite (voir les détails dans le texte).

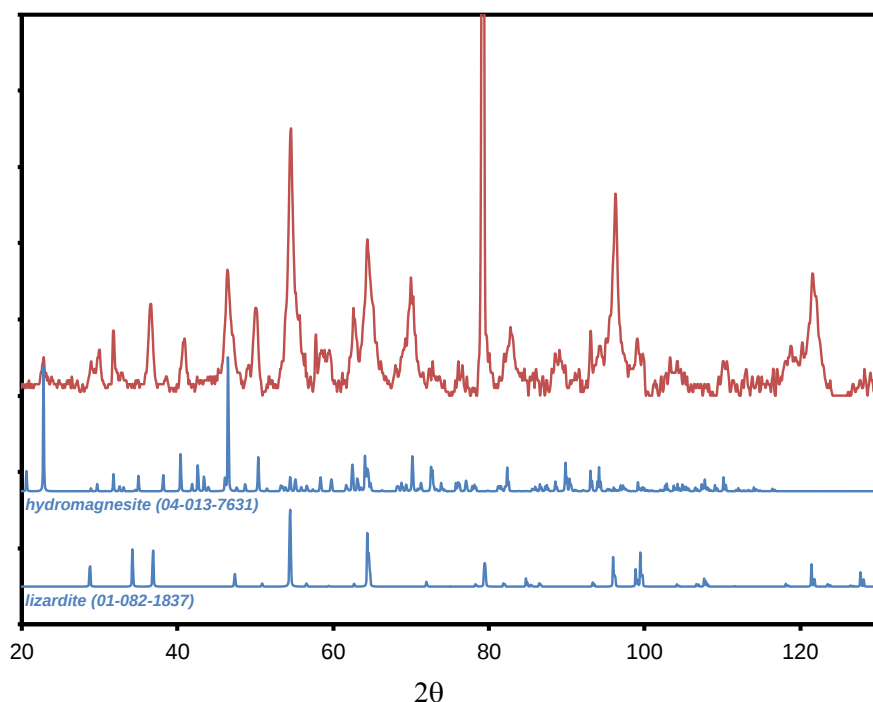
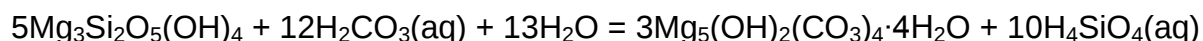


Figure 33. Patron micro-XRD d'un agrégat d'hydromagnésite à la lisière d'un grain de serpentine. Les patrons de référence provenant de la base de données de l'ICDD pour l'hydromagnésite et la lizardite sont également présentés. Données acquises avec la raie Cr K α (longueur d'onde : 2,2896 Å).

Beaudoin et coll. (2008) ont présenté un excellent rapport sur l'occurrence d'hydromagnésite dans les haldes de la région de Thetford Mines, en soulignant l'importance potentielle de ces composés pour la séquestration du carbone. Ils ont démontré que la carbonatation se produisait sur les surfaces exposées avec des concentrations en poids de carbone inorganique allant de 1,0 à 0,25 % C, jusqu'à une profondeur 45 cm, ce qui équivaut à une quantité totale de carbone d'environ 0,6 % en poids. Ils ont proposé un procédé de « carbonatation spontanée », par lequel les grains de serpentine se dissolvent graduellement par réaction avec l'acide carbonique aqueux pour produire la précipitation d'hydromagnésite, selon une réaction de la forme :



Comme on n'observe pas d'enrichissement de la silice à l'interface de l'hydromagnésite et de la serpentine, ces auteurs ont proposé que la silice en excès est libérée sous forme d'acide silicique aqueux (voir la réaction ci-dessus). En tenant compte de la quantité de carbone inorganique observée ($\approx 0,6$ % en poids) et de la durée d'exposition des résidus aux agents atmosphériques, ils ont calculé que ce procédé se traduit par à un taux de cimentation approximatif de 4 cm/an.

Compte tenu de la quantité importante de brucite dans les échantillons de résidus et de sa disparition complète par des procédés de lixiviation dans les premiers 25 cm de la surface, il est fort probable que le Mg libéré en solution réagit avec le dioxyde de carbone dissous pour former de l'hydromagnésite, selon la réaction suivante :



La brucite comme source de magnésium pour la production d'hydromagnésite, permet donc d'expliquer l'absence d'un enrichissement important en silice et le manque de preuve texturale manifeste d'un remplacement de serpentine à la plupart des interfaces entre les grains de serpentine et les lisières d'hydromagnésite. Hostetler et coll. (1966) avaient déjà suggéré un lien entre la brucite présente dans la serpentinite et la

formation d'hydromagnésite par une réaction avec une solution contenant du CO₂. Il est aussi intéressant de noter que certains procédés techniques de carbonatation de la serpentine utilisent une étape intermédiaire où l'hydroxyde de magnésium est extrait des silicates, le Mg(OH)₂ étant donc la phase qui est carbonatée (p. ex., Lackner et coll., 1997; Lin et coll., 2008).

Pour mieux comprendre le rôle potentiel de la brucite dans le procédé de carbonatation à l'intérieur des résidus, une expérience très simple a été réalisée en employant, comme matériel de départ, une portion de résidus provenant de la halde Normandie échantillonnée à une profondeur où la brucite est intacte et où l'hydromagnésite n'est présente que sous forme de traces. Dans un flacon Nalgene de 30 mL, nous avons immergé 1 g de résidus dans 20 mL d'eau distillée précédemment carbonatée par injection de CO₂ sous pression dans un siphon scellé. Le pH de l'eau carbonatée ainsi obtenue était d'environ 3,5, imposée par l'acide carbonique dissous. Le flacon Nalgene a été scellé et laissé à 30 °C pendant 24 heures. Nous avons ensuite ouvert le contenant et filtré la solution aqueuse que nous avons transférée dans un deuxième flacon Nalgene pré-pesé pour la laisser s'évaporer à 60 °C. Le contenant a été pesé de nouveau, et le précipité obtenu a été caractérisé par des analyses XRD et SEM. Une quantité additionnelle de 20 mL d'eau carbonatée a alors été ajoutée au flacon original contenant les résidus afin de répéter le cycle. Après quatre ou cinq cycles, la quantité de précipité provenant de la solution était devenue négligeable. L'échantillon de résidus traité a alors été retiré et également caractérisé. Comme contrôles, un échantillon de brucite monominéralique a été traité avec le même protocole, et nous avons aussi laissé s'évaporer une portion d'eau distillée carbonatée pure sans résidus.

Après le traitement de l'échantillon de résidus, le précipité obtenu de la solution de lixiviation était composé de plusieurs agrégats en « rosette » de cristaux lamellés (figure 34a). Cette morphologie est très similaire à celle de l'hydromagnésite naturelle (voir la figure 32). L'analyse XRD du précipité confirme qu'il est, en effet, composé d'hydromagnésite (figure 35). La lixiviation de la brucite monominéralique produit également de l'hydromagnésite ayant une morphologie « en rosette » comparable

(figure 34b). Comme prévu, aucun précipité observable n'a été formé par l'évaporation de l'eau distillée carbonatée pure sans résidu.

L'échantillon de résidus qui a été traité présente des régions vides à l'intérieur des grains de serpentine (figure 34c, d), indiquant une dissolution de la brucite, et l'analyse XRD confirme que la brucite a entièrement disparu (figure 36). Ces textures de dissolution sont similaires à celles trouvées dans les échantillons prélevés en surface (0-25 cm) où la brucite est absente (voir la figure 30c et d). Dans une des expériences effectuées, la solution aqueuse n'a pas été retirée et on l'a laissé s'évaporer en contact avec les résidus, dans le but de former une croûte cimentée. Dans ce cas-ci, l'hydromagnésite se forme contre certains grains de serpentine (figure 34e) ou en agrégats cimentant divers grains de petite taille (figure 34f).

La quantité totale d'hydromagnésite formée jusqu'à ce que le taux de précipitation devienne négligeable est d'environ 65 mg, nécessitant 16,9 mg de Mg, ce qui équivaut à une consommation de 28,7 mg de $Mg(OH)_2$ de la quantité de 1 g de résidus lixiviés. Cela nécessiterait une concentration originale de 2,9 % en poids de brucite, une concentration conforme aux résultats de l'analyse XRD, et à ce qui est observé lors de l'analyse SEM de l'échantillon de résidus avant traitement. La proportion de C qui réside dans l'hydromagnésite, si on la laisse cimenter l'échantillon de résidus, serait de 0,65 % en poids, soit une concentration du même ordre de grandeur que ce qui est typiquement observé près de la surface (p. ex., Beaudoin et coll., 2008).

Ces résultats suggèrent qu'une dissolution de la brucite est fort possiblement la principale source de Mg dans la production de la majeure partie de l'hydromagnésite observée à la surface des haldes de résidus étudiées. Néanmoins, ceci n'exclut pas l'existence d'un processus de dissolution de la serpentine pour produire l'hydromagnésite (p. ex., Beaudoin et coll., 2008; Larachi et coll., 2010). De fait, en cartographiant de façon détaillée les concentrations de Si et de Mg dans l'échantillon de résidus avant et après le traitement, on peut clairement constater une faible augmentation du ratio $Si/(Si+Mg)$ de la serpentine (figure 37). Il est intéressant de noter

que cette augmentation n'est pas amorcée à la bordure, mais se produit de façon homogène à travers tout le grain. Ceci indique que les grains de serpentine sont perméables à la solution, et que la lixiviation du Mg et la silicification résultante se produisent à l'échelle du cristal.

En conclusion, on peut donc suggérer que la carbonatation est initialement contrôlée par la brucite, qui se dissout beaucoup plus rapidement que la serpentine. Lorsque la brucite est consommée, le taux de carbonatation est contrôlé par la serpentine et, par conséquent, fléchit abruptement. Ceci a des conséquences importantes pour la prévision des taux de cimentation à long terme, et du temps nécessaire pour que les résidus remaniés, dans lequel la brucite a été consommée, produisent une nouvelle croûte.

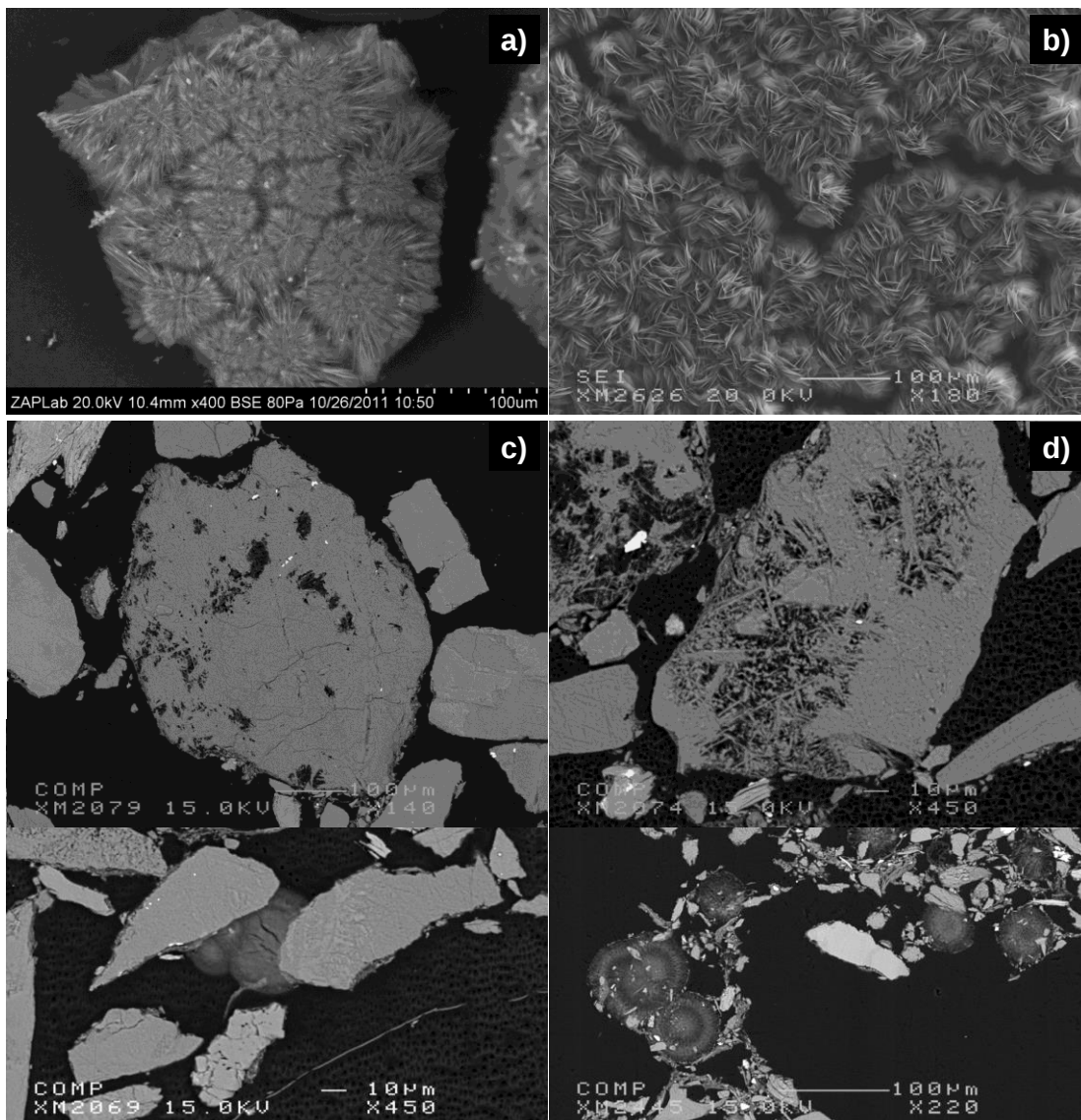


Figure 34. Nombreux agrégats « en rosette » de cristaux d'hydromagnésite lamellés, formés par précipitation du lixiviat suite au traitement de **a)** l'échantillon de résidus et **b)** l'échantillon de brucite monominéralique pendant les expériences de carbonatation décrites dans le texte; **c), d)** images en électrons rétrodiffusés montrant des évidences de dissolution de la brucite dans l'échantillon de résidus traité; **e), f)** images en électrons rétrodiffusés illustrant des caractéristiques de cimentation de l'hydromagnésite formée lorsqu'on laisse la solution s'évaporer en contact avec l'échantillon de résidus traité (voir les détails dans le texte).

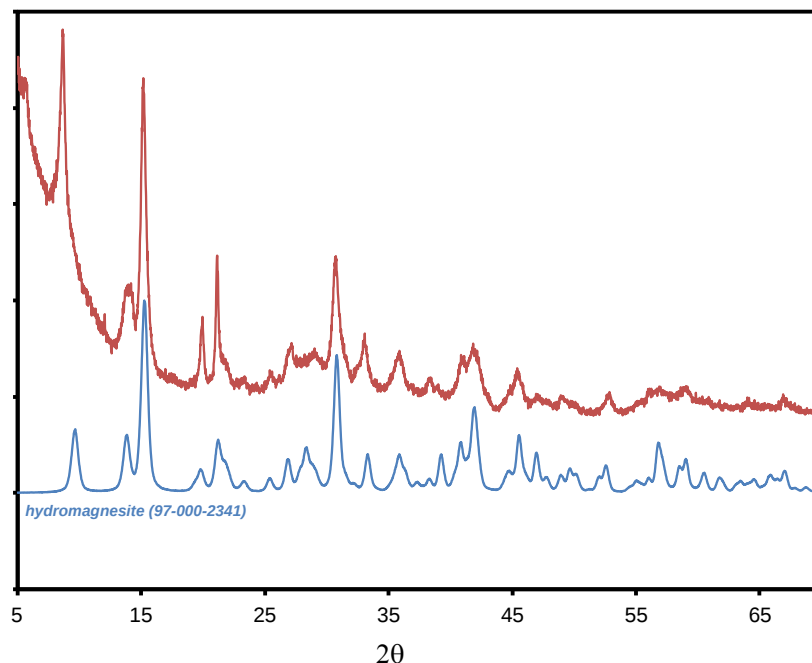


Figure 35. Patron de diffraction X sur poudre obtenu du précipité produit par évaporation de la solution de lixiviation dans l'expérience de carbonatation décrite dans le texte. Le patron de référence provenant de la base de données de l'ICDD pour l'hydromagnésite est également présenté. Données acquises avec la raie Cu K α (longueur d'onde : 1,54059 Å).

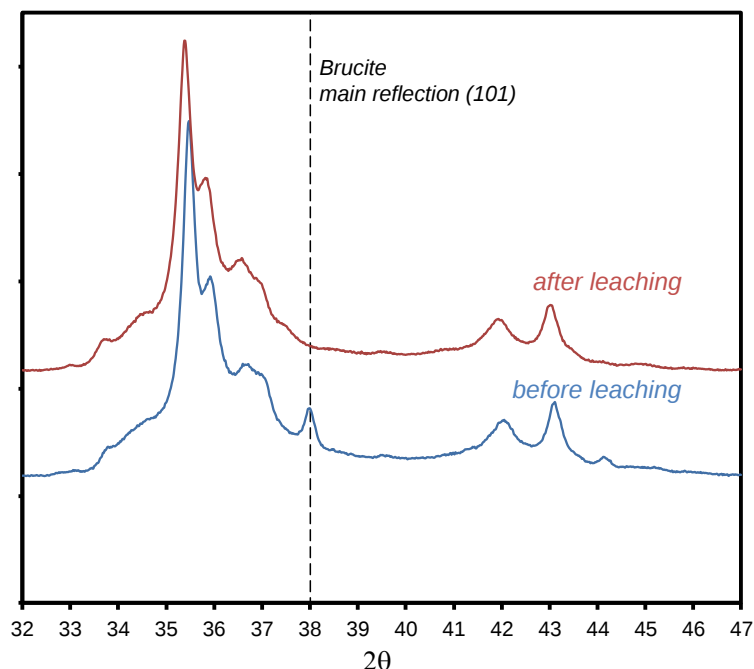


Figure 36. Comparaison des patrons de diffraction X sur poudre obtenus de l'échantillon de résidus avant et après la lixiviation, au cours de l'expérience de carbonatation décrite dans le texte. La disparition de la brucite est évidente.

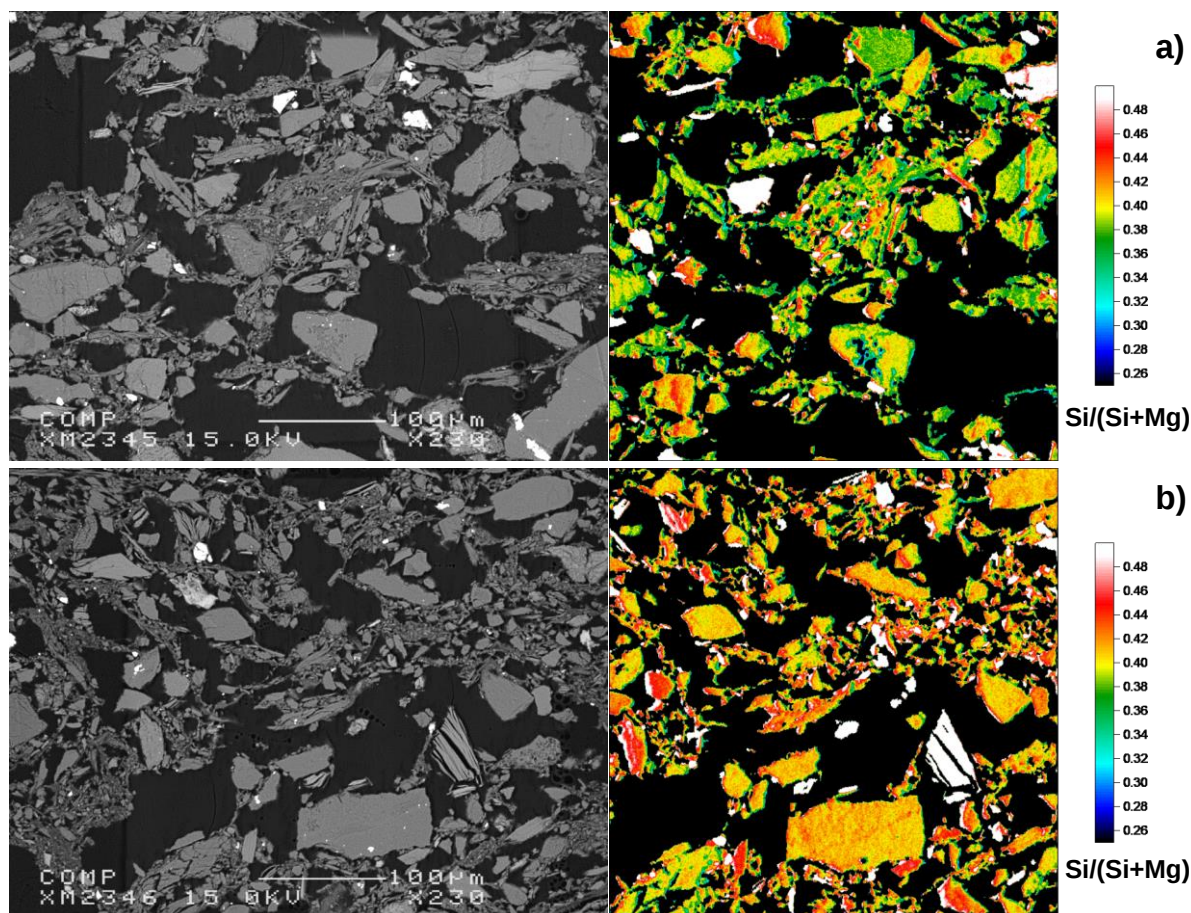


Figure 37. À droite : cartes quantitatives du ratio $\text{Si}/(\text{Si}+\text{Mg})^{\text{atomique}}$, obtenues par microanalyse X, d'une partie de l'échantillon de résidus traité avant (a) et après (b) la lixiviation au cours l'expérience de carbonatation décrite dans le texte. À gauche : images en électrons rétrodiffusés des régions cartographiées (voir les détails dans le texte).

Occurrence de l'amphibole

Les analyses XRD obtenues avec anode rotative permettent de détecter les phases cristallines à des concentrations inférieures à 1 %. En examinant attentivement les patrons de diffraction X, on détecte clairement l'amphibole, bien qu'en très faible abondance ($< 1\%$), dans les échantillons de résidus des haldes Normandie et King Beaver (figure 38). Quant aux échantillons de la halde BC I, l'amphibole ne peut être identifié dans les patrons de diffraction X, mais sa présence en quantités traces est confirmé en examinant les échantillons par SEM et EPMA. Gunter et coll. (2007) ont également observé des quantités traces d'amphibole prismatique dans des échantillons prélevés dans l'ancienne mine de chrysotile qui était exploitée par Carey Canadian Mines, près de Thetford Mines.

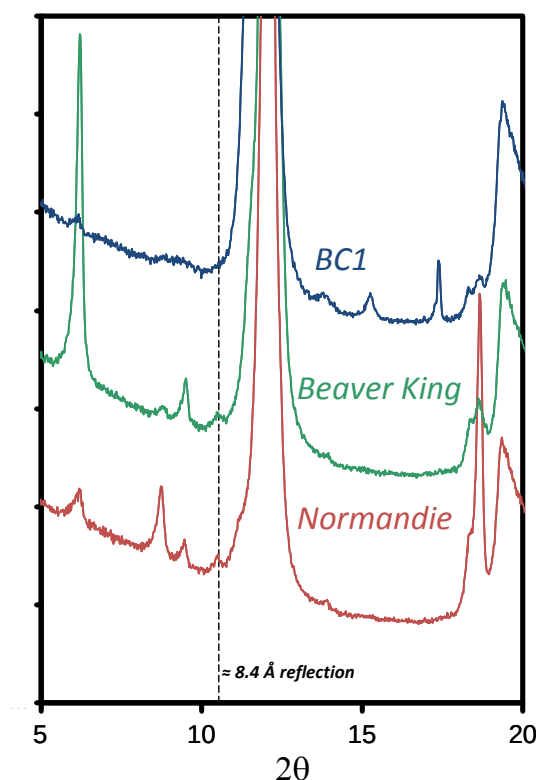


Figure 38. Portion des patrons de diffraction X entourant la réflexion à $\approx 8,4$ Å, représentative de l'amphibole. L'amphibole peut être identifiée dans les échantillons de résidus des halles Normandie et King Beaver (voir les détails dans le texte). Données acquises avec la raie Cu K α (longueur d'onde : 1,54059 Å).

Dans la halde de résidus Normandie, où l'amphibole semble être la plus abondante, celle-ci est invariablement présente dans de gros grains d'albite qui coexistent avec du feldspath potassique et d'autres minéraux accessoires. Comme nous l'avons mentionné plus haut à la section « Considérations géochimiques », ces fragments peuvent être considérés comme des « contaminants », probablement constitués de matériaux intrusifs riches en silice, ayant recoupé la péridotite (p. ex., Williams-Jones et coll., 2001). Dans les fragments d'albite, l'amphibole est toujours étroitement associée à du diopside riche en Fe ($Mg/[Mg+Fe] \approx 0,5-0,6$; tableau 12). En ce qui concerne sa composition, l'amphibole est calcique avec faibles teneurs en Al_2O_3 et en alcalis (tableau 12), et peut être classifiée d'actinolite à ferro-actinolite (figure 39) selon la nomenclature des amphiboles proposée par l'International Mineralogical Association (Leake et coll., 1997). La morphologie type est clairement prismatique (figures 40a-c), avec un faible rapport d'aspect. De très rares occurrences d'agrégats de grains

d'actinolite présentant un rapport d'aspect élevé (figure 40d) ont été observées, et elles sont également associées à du diopside à l'intérieur des grains d'albite. L'observation en détail de ces cristaux allongés (figure 40e, f), indique qu'ils présentent manifestement des faces cristallines développées ce qui les classifie comme cristaux aciculaires, plutôt que fibreux (p. ex., Harris et coll., 2007).

L'abondance d'amphibole dans la halde de résidus BC I est très faible. La seule occurrence que nous pouvons documenter se trouve à l'interface entre des reliquats de grains d'enstatite et de serpentine (figure 40f). Au plan de la composition, il s'agit de trémolite (figure 39) dont la composition (tableau 12) est comparable à celle de la trémolite observée dans la harzburgite hôte (p. ex., Pagé et coll., 2008). Il semble s'agir d'un produit de l'altération de l'enstatite et sa forme est clairement prismatique.

Tableau 12. Compositions chimiques représentatives de l'amphibole détectée dans les échantillons des haldes de résidus Normandie, King Beaver et BC I.

	Normandie				King Beaver							BC I
	actinolite				diopside			actinolite-tremolite			tremolite	
	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	1	
SiO2	55.06	55.36	53.82	54.73	52.96	52.42	51.98	56.42	56.30	55.40	55.02	
TiO2	0.01	0.00	0.02	0.01	0.14	0.20	0.07	0.01	0.01	0.02	0.00	
Al2O3	0.04	0.08	0.18	0.11	0.56	0.47	0.30	1.52	1.97	2.89	1.37	
Cr2O3	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.06	0.00	0.50	
FeO	14.54	14.86	18.96	20.31	11.71	12.73	15.44	5.99	4.25	4.53	2.72	
MnO	0.03	0.04	0.18	0.26	0.07	0.10	0.16	0.28	0.08	0.22	0.09	
MgO	14.82	14.27	11.91	10.95	10.37	10.01	8.55	22.45	21.84	21.58	24.56	
NiO	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.07	0.08	0.08	0.02	
CaO	13.03	13.06	12.51	12.67	24.17	24.11	24.23	10.24	12.64	12.51	12.51	
Na2O	0.11	0.21	0.12	0.09	0.51	0.33	0.21	0.32	0.24	0.55	0.23	
K2O	0.04	0.08	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.02	0.21	
Total	97.70	97.98	97.73	99.14	100.51	100.37	100.96	97.31	97.50	97.79	97.24	
Si	7.985	8.015	7.972	8.025	2.001	1.993	1.992	7.836	7.791	7.672	7.633	
Al	0.006	0.000	0.028	0.000	0.000	0.007	0.008	0.164	0.209	0.328	0.225	
Al	0.000	0.013	0.002	0.018	0.025	0.015	0.005	0.086	0.112	0.144	0.000	
Cr	0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.007	0.000	0.054	
Ti	0.001	0.000	0.002	0.002	0.004	0.006	0.002	0.001	0.001	0.002	0.000	
Fe	1.763	1.800	2.349	2.490	0.370	0.405	0.495	0.696	0.492	0.524	0.316	
Mn	0.004	0.005	0.023	0.032	0.002	0.003	0.005	0.033	0.009	0.026	0.011	
Mg	3.203	3.080	2.629	2.394	0.584	0.567	0.488	4.646	4.504	4.453	5.077	
Ni	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.009	0.009	0.002	
Ca	2.025	2.027	1.986	1.990	0.978	0.982	0.995	1.524	1.874	1.856	1.860	
Na	0.032	0.058	0.033	0.024	0.038	0.024	0.016	0.085	0.063	0.146	0.062	
K	0.008	0.015	0.008	0.004	0.000	0.000	0.000	0.001	0.007	0.003	0.038	
Total	15.030	15.015	15.032	14.979	4.002	4.002	4.007	15.081	15.079	15.164	15.278	
Mg/(Mg+Fe)	0.64	0.63	0.53	0.49	0.61	0.58	0.50	0.87	0.90	0.89	0.94	

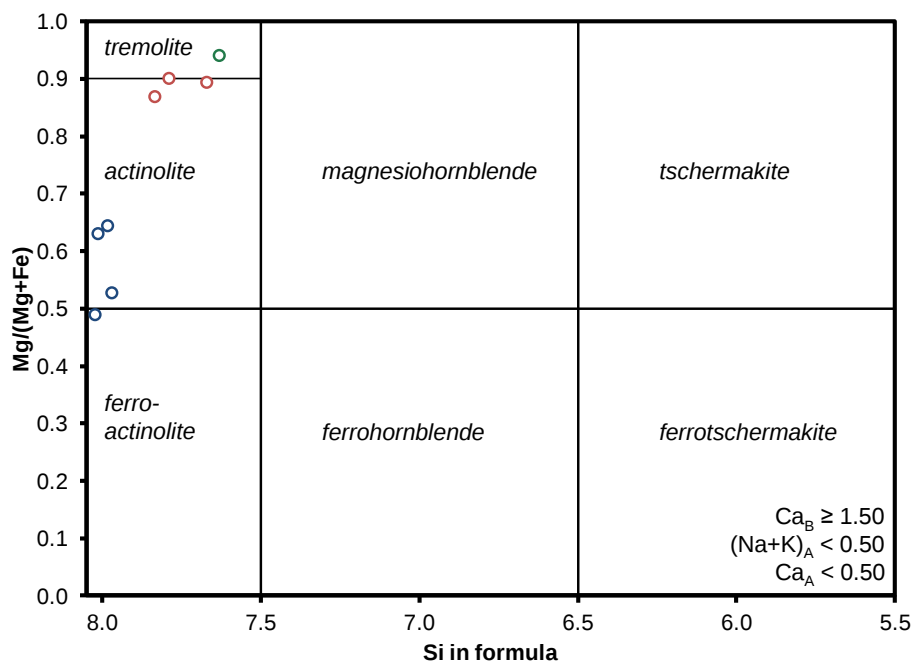


Figure 39. Classification de l'amphibole calcique sur un diagramme du ratio $Mg/(Mg+Fe)$ en fonction de Si calculé avec une formule structurale basée sur 23 oxygènes; selon Leake et coll., 1997. Cercles bleus : Normandie; cercles rouges : King Beaver; cercle vert : BC I.

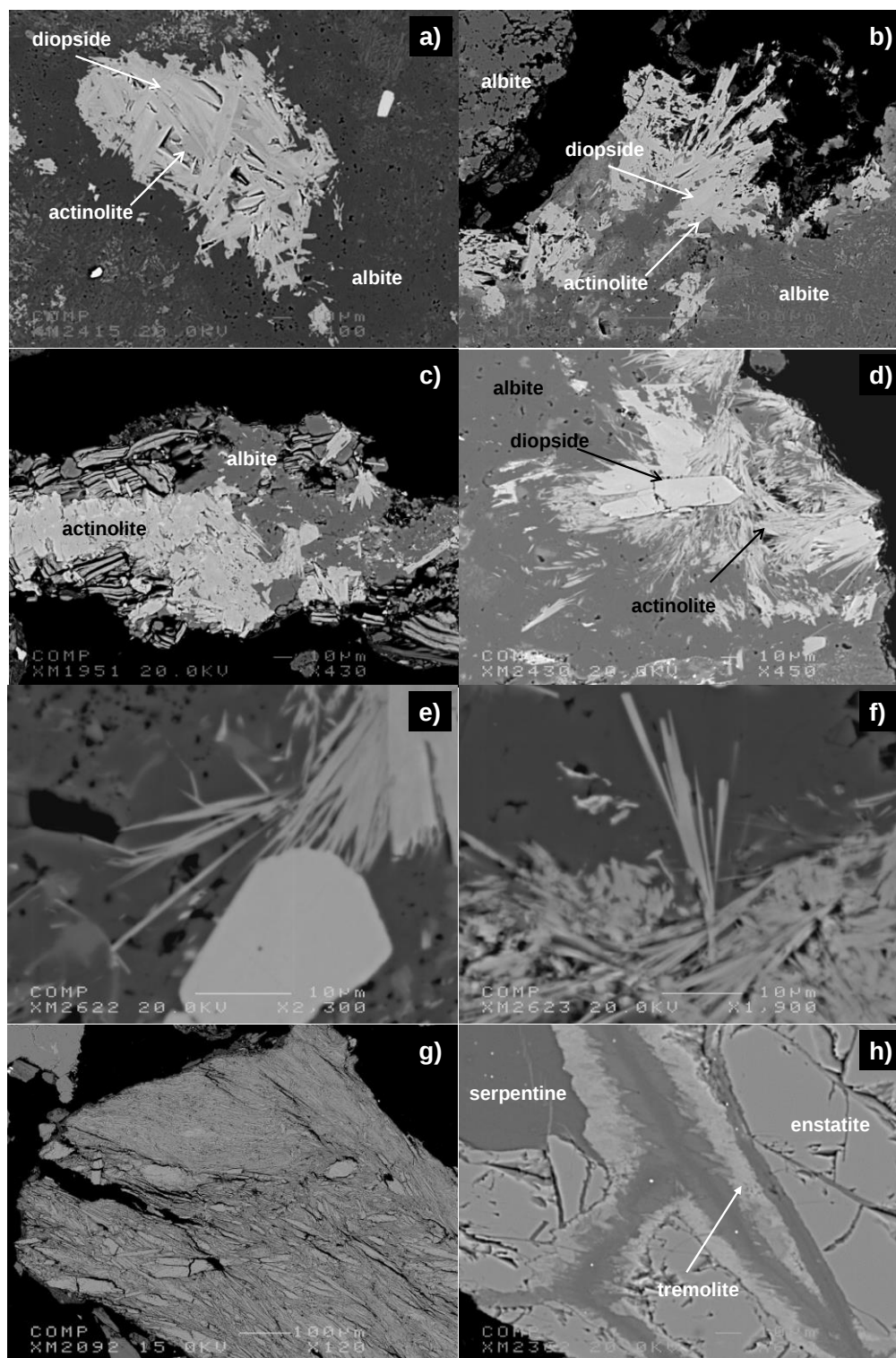


Figure 40. Images en électrons rétrodiffusés illustrant les diverses formes de l'amphibole identifiée dans les échantillons de résidus : **a), b), c), d)** actinolite associée à du diopside à l'intérieur de gros fragments d'albite dans les échantillons de Normandie; **e), f)** détails de la forme des cristaux allongés trouvés en d); **g)** fragment monominéralique d'actinolite dans un échantillon provenant de King Beaver; **h)** trémolite trouvée à l'interface entre l'enstatite et la serpentine dans un échantillon provenant de BC I (voir les détails dans le texte).

Commentaires additionnels sur le bilan du Cr et du Ni

Vu l'intérêt potentiel d'examiner la possibilité d'extraire le Cr ou le Ni contenu dans les haldes de résidus, nous décrivons ci-dessous certaines implications basées sur les bilans de Cr et de Ni observés dans les échantillons de résidus étudiés.

En ce qui concerne le Cr, il est manifeste que le spinelle chromifère représente la seule phase intéressante, contenant environ 75 % du Cr total. La majeure partie du Cr restant est répartie de manière hétérogène, sous forme d'élément mineur dans la serpentine. Le spinelle chromifère préservé est de texture grossière, et il pourrait donc être concentré par broyage et séparation physique.

Pour ce qui est du Ni, sa répartition est très différente et cela a des implications importantes sur les procédés d'extraction possibles. Parmi les principaux minéraux contenant du Ni, l'heazlewoodite et l'awaruite grossière semblent être les seules phases qui pourraient être clairement concentrées en prenant avantage de leurs propriétés physiques. Comme il est indiqué précédemment, l'abondance d'awaruite grossière est d'environ 0,03 % en poids, du moins dans les échantillons étudiés, représentant donc environ 10 % du Ni total, et la proportion d'heazlewoodite est de beaucoup inférieure. Par conséquent, il semble difficile d'obtenir une augmentation avantageuse de teneur directement par concentration de ces deux phases. La majeure partie du Ni (≈ 90 %) est partagée entre la serpentine et l'awaruite nanométrique répartie de façon homogène dans de gros grains de serpentine. Compte tenu de la très petite taille de ce type principal d'awaruite et du fait qu'il est totalement non libéré, on ne prévoit pas qu'il pourrait être séparé de manière efficace de la serpentine hôte par un procédé physique simple basé sur ses propriétés intrinsèques. Cependant, Dupéré et coll. (2007) ont documenté une expérience de concentration par broyage et séparation magnétique de six tonnes de résidus bruts en une tonne de matériau à l'issue de laquelle une augmentation de teneur de 0,2 à 0,5 % en poids a été observée. Même si toute l'awaruite grossière pouvait être séparée, cela ne représenterait que $\approx 0,13$ % en poids de Ni, soit ≈ 25 % du Ni total dans le concentré. On estime donc que l'augmentation de

la teneur est associée à des fragments de grain de serpentine riches en inclusions d'awaruite qui ont été entraînés dans la fraction magnétique, car ils étaient attachés à des grains de magnétite grossiers. En fait, la grande majorité des grains de serpentine contenant des inclusions d'awaruite nanométriques contiennent également des inclusions grossières de magnétite. Cependant, avec un contrôle si indirecte sur la concentration de Ni, il découle que la teneur de Ni du concentré serait plutôt variable, voire imprévisible. Qui plus est, vu l'augmentation relativement faible de teneur, il semble que le recours à une méthode de lixiviation globale serait plus prometteur (voir Dupéré et coll., 2007).

Le procédé Magnola d'extraction du Mg (p. ex., Dutrizac et coll., 2001), indique clairement qu'une lixiviation avec une solution de HCl 7M à 100 °C est très efficace pour complètement dissoudre l'awaruite (Chen et coll., 2000). Dupéré et coll. (2007) signalent également une récupération de 94 % du Ni des résidus bruts, au moyen de HCl chaud. Il est évident qu'une grande quantité de MgCl est produite et que le procédé consomme de grandes quantités d'acide.

On peut aussi envisager un procédé de lixiviation sélective du Ni. Fischmann et Dixon (2009) ont décrit une procédure qui emploie une solution alcaline à base d'ammonium et d'ammoniac, ainsi que de citrate et de thiosulfate (afin d'empêcher la passivation de l'awaruite) qui lessive sélectivement le Ni de l'awaruite contenue dans un matériau riche en serpentine. Ces auteurs mentionnent un taux de récupération d'environ 81 % du Ni provenant de l'awaruite à 70 °C, avec une solution ayant un pH initial de 9 et contenant 5 mM de thiosulfate, 100 mM de citrate et 1,5 M d'ammoniac total. Toutefois, ils ne décrivent pas sous quelle forme l'awaruite était contenue dans la serpentine. Il est évident qu'avec ce procédé, la plupart du Ni qui est en substitution du Mg dans la serpentine ne serait pas récupérée. En fait, la capacité de la serpentine d'emmagasiner le Ni peut avoir un effet négatif sur l'efficacité de l'extraction du Ni pour certains procédés de lixiviation sélective. Par exemple, Cameron et coll. (2009) ont publié les résultats d'une étude traitant d'un procédé de biolixiviation conçu pour maximiser l'extraction du Ni et minimiser la mobilisation du magnésium dans un minerai de sulfure

de Ni à faible teneur et riche en serpentine, dans lequel le Ni réside principalement dans la pentlandite. Ils ont constaté qu'en augmentant le pH de 3 à 5, le rapport nickel/magnésium augmentait fortement dans le lixiviat, ce qui se traduit par une forte baisse de la consommation d'acide. Il est cependant intéressant de noter qu'une partie importante du Ni extrait des sulfures à un pH de 5 et à 45 °C est incorporé dans la lizardite résiduelle, plutôt que de demeurer en solution dans le lixiviat (Thibault et Smith, 2009; Cameron et coll., 2009).

CONCLUSIONS

Les trois haldes de résidus où des échantillons de surface ont été recueillis présentent des caractéristiques chimiques qui suggèrent que le minéral serpentinisé duquel le chrysotile a été extrait demeure, au point de vue de la composition, très proche du précurseur harzburgitique. Ceci est particulièrement vrai dans le cas des échantillons de la halde BC I, qui contiennent une quantité importante d'olivine forstéritique et une quantité mineure d'enstatite préservées. Dans le cas de la halde King Beaver et plus encore de la halde Normandie, les ratios Mg/Si plus faibles s'accompagnent de concentrations élevées d' Al_2O_3 et d'alcalis, ce qui suggère la contribution d'un contaminant riche en feldspath, fort probablement des fragments de roches intrusives riches en silice recoupant la péridotite. Comme ces fragments intrusifs contiennent également de l'actinolite présentant une morphologie allant de prismatique à aciculaire, de très petites quantités de cette amphibole sont identifiées dans les échantillons de résidus de la halde Normandie.

La lizardite est la phase de serpentine dominante dans tous les échantillons, et sa proportion par rapport au chrysotile semble relativement constante au sommet, ainsi que sur les flancs. Sa composition est proche du membre final magnésien, avec une stœchiométrie conforme à la formule idéale de la serpentine. Une population de serpentine riche en Fe présente toutefois des caractéristiques compositionnelles qui suggère une substitution trioctahédrale à dioctahédrale de la forme $3\text{Mg}^{2+} \rightarrow 2\text{Fe}^{3+}$. La teneur en Cr de la serpentine est hétérogène, les moyennes allant de 0,05 % en poids pour Normandie à 0,08 % pour BC I, et les concentrations les plus élevées sont invariablement observées à proximité des phases harzburgitiques primaires. La distribution du Cr dans la serpentine est compatible avec la majeure partie du Cr étant initialement contenu dans les pyroxènes représentant environ 25 % du Cr total. Dans le cas du Ni, on constate une répartition relativement progressive, avec des moyennes de 0,1 % en poids pour les haldes Normandie et King Beaver, et 0,06 % pour BC I. La teneur moyenne beaucoup plus faible en Ni dans la serpentine de la halde BC I peut s'expliquer par une plus grande abondance de forstérite nickélifère ($\approx 0,3$ % en poids)

préservée. La proportion observée de Ni contenue dans la serpentine représente un peu moins de la moitié de la quantité totale de Ni dans les résidus.

Des grains grossiers de spinelle riche en Cr, entourés d'auréoles de magnétite, sont présents dans tous les échantillons. Les noyaux présentent des compositions comparables à celles du spinelle provenant de la harzburgite hôte. En ce qui concerne le Cr, ces grains grossiers de spinelle représentent la seule phase d'intérêt, contenant environ 75 % du Cr total, et se prêteraient à un procédé de concentration par broyage et séparation physique.

L'awaruite est présente sous deux formes, soit des grains grossiers ($> 5 \mu\text{m}$), ou une multitude de particules nanométriques dispersées dans de gros grains de serpentine. Les formes et les distributions très distinctes de ces deux types d'awaruite suggèrent qu'ils ont une origine différente. La réduction du NiO en solution solide dans la forstérite pendant l'événement de serpentinisation océanique est probablement la source de l'awaruite nanométrique. La faible abondance de l'awaruite grossière ($\approx 0,03 \%$ en poids) et son association avec la pentlandite suggèrent qu'elle a pu être formée par désulfuration des sulfures primaires. La contribution de l'awaruite grossière au bilan du Ni total est estimée à environ 10 %, alors que l'awaruite nanométrique pourrait constituer presque 50 %. Puisque la serpentine et l'awaruite nanométrique sont chacun hôte d'environ de la moitié du Ni total, une approche de lixiviation globale pourrait constituer le procédé le plus efficace si on envisageait d'extraire le Ni des haldes de résidus. On sait que la lixiviation acide avec du HCl permet de récupérer efficacement la majeure partie du Ni dans la serpentine et l'awaruite, mais elle entraîne la formation d'une quantité importante de MgCl et une forte consommation d'acide. Une solution alternative consisterait à effectuer la lixiviation sélective du Ni contenu dans l'awaruite sans en provoquer la passivation, mais la récupération totale optimale est évidemment de beaucoup inférieure ($\approx 50 \%$) et, dans certains cas, la rétention possible du Ni par la serpentine résiduelle pourrait constituer un problème potentiel.

Les évidences d'une dissolution importante de la brucite à la surface de toutes les haldes de résidus, suggère fortement qu'elle représente la principale source de Mg responsable de la formation de la majeure partie de la cimentation d'hydromagnésite observée. Des expériences de lixiviation de la brucite peuvent reproduire les textures observées et indiquent qu'elle est dissoute beaucoup plus rapidement que la serpentine. Ceci explique également l'absence d'un enrichissement important en silice, ainsi qu'un manque d'évidence texturale claire d'un remplacement de la serpentine à la plupart des interfaces entre les grains de serpentine et les lisières d'hydromagnésite. Les taux de dissolution de la serpentine sont beaucoup plus faibles, et la silicification résultante n'est pas amorcée aux bordures, mais se produit plutôt de façon homogène à travers tout le grain, ce qui indique que les grains de serpentine sont perméables à la solution et que la lixiviation du Mg se produit à l'échelle du cristal. Un contrôle de la carbonatation par la brucite a des conséquences importantes pour la prévision des taux de cimentation à long terme, et du temps nécessaire pour que les résidus remaniés, dans lequel la brucite a été consommée, produisent une nouvelle croûte.

REMERCIEMENTS

Je désire remercier la Société Asbestos Ltée, et en particulier Mario Simard qui nous a accordé l'autorisation d'accéder et d'échantillonner les résidus des haldes Normandie, King Beaver et BC I, ainsi que Christian Simard qui nous a escortés pendant la campagne d'échantillonnage en octobre 2010. L'accueil chaleureux que nous avons reçu dans la région de Thetford Mines, de la part d'Annie Rochette et de Jovette Marois, et de toutes les personnes du Centre de Technologie Minérale et de Plasturgie Inc. (CTMP) a été réellement apprécié. Leur aide a été indispensable pour définir la stratégie d'échantillonnage. Je remercie également Michel Jacques et Michel Leroux du CTMP et Charles Dubreuil du Cégep de Thetford Mines pour l'échantillonnage des résidus. Je désire aussi remercier Desmond Moser pour l'accès au SEM à émission de champ Hitachi SU-6600 (laboratoire ZAP), du Département des sciences de la Terre de l'Université Western Ontario. Le support technique de Renfei Feng pour les analyses SRXF sur la ligne de faisceau VESPERS, au Centre canadien de rayonnement synchrotron, et d'Ivan Barker pour la caractérisation avec le SEM Hitachi SU-6600, a été grandement apprécié. Je remercie aussi Derek Smith qui a réalisé les analyses XRD et Judith Price qui a effectué la préparation des échantillons. Enfin, une pensée spéciale pour mon ami Allen Pratt, qui nous a malheureusement quittés suite à une lutte courageuse contre le cancer, pour les nombreuses discussions enrichissantes au cours de l'étude et sa révision technique objective du manuscrit.

RÉFÉRENCES

- Beaudoin G., Hébert R., Constantin M., Duchesne J., Cecchi E., Huot F., Vigneau S. et Fiola R., 2008. Spontaneous carbonation of serpentine in milling and mining waste, southern Québec and Italy. *Accelerated Carbonation for Environmental and Materials Engineering* (ACEME 2008), Rome (Italie), p. 73-82.
- Cameron R.A., Lastra R., Mortazavi S., Gould W.D., Thibault Y., Bédard P.L., Morin L. et Kennedy K.J., 2009. Elevated-pH bioleaching of a low-grade ultramafic nickel sulphide ore in stirred-tank reactors at 5 to 45°C. *Hydrometallurgy*, **99**, 77-83.
- Chamberlain J.A., 1966. Heazlewoodite and awaruite in serpentinites of the Eastern Townships, Quebec. *Canadian Mineralogist*, **8**, 519-522.
- Chen T.T., Dutrizac J.E. et White C.W., 2000. Serpentine ore microtextures occurring in the Magnola magnesium process. *JOM*, **52**, 20-22.
- Cogulu E. et Laurent R., 1984. Mineralogical and chemical variations in chrysotile veins and peridotite host-rocks from the asbestos belt of southern Quebec. *Canadian Mineralogist*, **22**, 173-183.
- Dupéré M., Duplessis C. et Rousseau G., 2007. *Resources estimation of the nickel content in asbestos mines tailings*. Technical Report for Nichromet Extraction Inc. Systèmes Geostat International Inc., 226 p.
- Dutrizac J.E., Chen T.T. et White C.W., 2000. Fundamentals of serpentine leaching in hydrochloric acid media. In: H.I. Kaplan, J. Hryn, and B. Clow (Eds) *Magnesium Technology*, The Minerals, Metals & Materials Society, p. 42-51.
- Fischmann A.J. et Dixon D.G., 2009. Awaruite (Ni₃Fe) as a nickel resource-leaching with ammoniacal-ammonium solution containing citrate and thiosulfate. *Hydrometallurgy*, **99**, 214-224.
- Gunter M.E., Sanchez M.S. et Williams T.J., 2007. Characterization of chrysotile samples for the presence of amphiboles: the Carey Canadian deposit, southeastern Quebec, Canada. *Canadian Mineralogist*, **45**, 263-280.
- Hahn-Weinheimer P. et Hirner A., 1975. Major and trace elements in Canadian ore bodies. Analytical results and statistical interpretation. *Third Int. Conf. Phys. Chem. Asbestos Minerals*, Université Laval, Québec, article 6.25.
- Hostetler P.B., Coleman R.G., Mumpton F.A. et Evans B.W., 1966. Brucite in alpine serpentinites. *American Mineralogist*, **51**, 75-98.

- Klein F. et Bach W., 2009. Fe-Ni-Co-S phase relations in peridotite-seawater interactions. *Journal of Petrology*, **50**, 37-59.
- Lackner K.S., Butt D.P. et Wendt C.H., 1997. *Energy Conversion and Management*, **38**, Suppl., S259-S264.
- Larachi F., Daldoul I. et Beaudoin G., 2010. Fixation of CO₂ by chrysotile in low-pressure dry and moist carbonation: Ex-situ and in-situ characterizations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **74**, 3051-3075.
- Laurent R., et Hébert Y., 1979. Paragenesis of serpentine assemblages in harzburgite tectonite and dunite cumulate from the Québec Appalachians. *Canadian Mineralogist*, **17**, 857-869.
- Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J.A., Maresch W.V., Nickel E.H., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W. et Guo Youzhi, 1997. Nomenclature of the amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *Canadian Mineralogist*, **35**, 219-246.
- Levitan D.M., Hammarstrom J.M., Gunter M.E., Seal II R.R., Chou I.-M. et Piatak N.M., 2009. Mineralogy of mine waste at the Vermont Asbestos Group Mine, Belvidere Mountain, Vermont. *American Mineralogist*, **94**, 1063-1066.
- Lin P.-C, Huang C.-W., Hsiao C.-T. et Teng H., 2008. Magnesium hydroxide extracted from a magnesium-rich mineral for CO₂ sequestration in a gas-solid system. *Environmental Science and Technology*, **42**, 2748-2752.
- Merlini A., Grieco G. et Diella V., 2009. Ferritchromite and chromian chlorite formation in mélange-hosted Kalkan chromitite (Southern Urals, Russia). *American Mineralogist*, **94**, 1459-1467.
- Nickel E.H., 1959. The occurrence of native nickel-iron in the serpentine rock of the eastern townships of Quebec province. *Canadian Mineralogist*, **6**, 303-319.
- Pagé P., Bédard J.H., Schroetter J.-M. et Tremblay A., 2008. Mantle petrology of the Thetford Mines Ophiolite Complex. *Lithos*, **100**, 255-292.
- Pagé P., Bédard J.H. et Tremblay A., 2009. Geochemical variations in a depleted fore-arc mantle: The Ordovician Thetford Mines Ophiolite. *Lithos*, **113**, 21-47.
- Sleep N.H., Meibom A., Fridriksson Th., Coleman R.G. et Bird D.K., 2004. H₂-rich fluids from serpentinization: Geochemical and biotic implications. *Proceedings of the National Academy of Science*, **101**, 12818-12823.

- St-Julien P. et Hubert C., 1975. Evolution of the Taconian orogen in the Quebec Appalachians. *American Journal of Sciences*, **275 (A)**, 337-362.
- Thibault Y. et Smith D., 2009. *Potential role of lizardite on Ni extraction efficiency during bioleaching of a low-grade Ni sulphide ore*. Natural Resources Canada, Mining and Mineral Sciences Laboratories, Report MMSL 2009-059(TR).
- Vigneux J. et Roy S., 2010. Revegetation and reforestation techniques of asbestos mine waste piles in Québec. *Canadian Reclamation*, **Issue 1**, 8-11.
- Wicks F.J. et Plant A.G., 1979. Electron-microprobe and X-ray microbeam studies of serpentine textures. *Canadian Mineralogist*, **17**, 785-830.
- Williams-Jones A.E., Normand C., Clark J.R., Vali H., Martin R.F., Dufresne A. et Nayeibzadeh A., 2001. Controls on amphibole formation in chrysotile deposits: evidence from the Jeffrey mine, Asbestos, Quebec. In: R.P. Nolan, A.M. Langer, M. Ross, F.J. Wicks, and R.F. Martin (Eds) *The Health Effects of Chrysotile Asbestos, Canadian Mineralogist Special Edition*, **5**, p. 89-104.
- Wicks F.J., et Whittaker E.J.W., 1977. Serpentine textures and serpentinization, *Canadian Mineralogist*, **15**, 459-488.
- Wu Y., 2011. *Evaluation of ecological risks and benefits of revegetation of the Thetford Mines — Phase 1*. Natural Resources Canada, Mining and Mineral Sciences Laboratories, Report MMSL 11-041.