

**ÉTUDE MINÉRALOGIQUE ET PAR ANALYSE
D'IMAGE DE RÉSIDUS AYANT SUBI UNE
MÉTÉORISATION ARTIFICIELLE ET PROVENANT DU
MINÉRAI D'URANIUM DU MIDWEST
DE LA SASKATCHEWAN**

W. PETRUK et R.G. PINARD
Laboratoire de traitement des minéraux

LABORATOIRES DES SCIENCES MINÉRALES
RAPPORT DE CANMET CM88-6F

Février 1988

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1990

En vente au Canada par l'entremise des
Librairies associées
et autres libraires

ou par la poste auprès du

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnement et Services Canada
Ottawa (Canada) K1A 0S9

N° de catalogue M38-13/88-6F
ISBN 0-660-92994-5

ÉTUDE MINÉRALOGIQUE ET PAR ANALYSE D'IMAGE DE RÉSIDUS AYANT SUBI UNE MÉTÉORISATION ARTIFICIELLE ET PROVENANT DE MINÉRAI D'URANIUM DU MIDWEST DE LA SASKATCHEWAN

par

W. Petruk* et R.G. Pinard**

Résumé

Une étude minéralogique et par analyse d'image a été effectuée sur des échantillons de résidus d'U issus du traitement en usine pilote de minerai du Midwest provenant du nord de la Saskatchewan. Les résidus avaient été soumis à une météorisation artificielle équivalant à 10 ans dans un bac pour résidus (lysimètre); leur pH est passé de 7 à 5.9 du début à la fin de l'essai. Les résultats montrent que pendant la météorisation artificielle une partie de la gersdorffite, de l'uraninite, de la galène et de la pyrite s'est oxydée, la gersdorffite ayant été la plus réactive et la pyrite la moins réactive. La réaction était évidente à la partie supérieure du lysimètre, mais était la plus intense à la décharge de l'infiltration. Certains ions libérés se sont précipités sous forme d'arséniates, de sulfo-arséniates, de sulfates et d'oxydes de Ni, de Pb et d'U sur des particules de tous les minéraux. Des cristaux verts de sulfate de Ni et des cristaux blancs de sulfate de Ca s'étaient précipités à la surface du lysimètre. Des minéraux argileux et de la chlorite ont été entraînés de la partie supérieure du lysimètre vers la décharge.

*Chercheur scientifique principal et **technicien, Section de la minéralogie appliquée, Laboratoire de traitement des minéraux, Laboratoires des sciences minérales, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa (Ontario) K1A 0G1.



TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
INTRODUCTION	1
ÉCHANTILLONS	1
MINÉRALOGIE	1
Minéralogie générale	4
Minéraux silicatés	4
Minéraux oxydés	7
Sulfures, sulfoarséniures et arséniures	7
Sulfates, arséniate et sulfoarséniate	11
Interprétations des réactions minérales dans le lysimètre	12
QUANTITÉS MINÉRALES	12
CONCLUSIONS	22
REMERCIEMENTS	22
BIBLIOGRAPHIE	23

TABLEAUX

1. Quantités moyennes des minéraux en fractions classées et des échantillons combinés dans le lysimètre	3
2. Analyses des minéraux par EDXA	6
3. Quantités des minéraux dans les sous-fractions de +74 μm , précipités dans une solution de densité 3,33	13
4. Quantités des minéraux dans les sous-fractions de +74 μm , surnageant dans une solution de densité 3,33	14
5. Quantités des minéraux dans des fractions allant de 12 à 74 μm	15
6. Quantités des minéraux dans les fractions de 12 à 74 μm	16
7. Quantités des minéraux dans des échantillons.	17

ILLUSTRATIONS

1. Plan du lysimètre montrant les emplacements des carottes	2
2A. Photographie par rétrodiffusion électronique (BSE) de cristaux de muscovite avec des inclusions d'arséniate et de sulfoarséniate	5
2B. Photographie par BSE montrant un grand grain d'illite attaché à de la gersdorffite et renfermant des inclusions de gersdorffite	5
2C. Photographie par BSE de l'uraninite bordée d'un produit d'altération de type 1(a)	5
2D. Photographie par BSE d'uraninite bordée d'un produit d'altération de type 1(a)	5

ILLUSTRATIONS (suite)

2E. Photographie par BSE d'uraninite avec trois variétés de veinules	5
2F. Photographie par BSE montrant de la galène avec un revêtement du produit d'altération de type 1(a)	5
3A. Photographie par BSE de galène avec un revêtement du produit d'altération type 1(a)	8
3B. Photographie par BSE de pyrite avec un revêtement du produit d'altération de type 1(a)	8
3C. Photographie par BSE de pyrite avec un revêtement à la fois du produit d'altération de type 1(a) et de goethite	8
3D. Photographie par BSE d'un grain de pyrite renfermant 2 % en poids de Ni et 3 % en poids d'As	8
3E. Photographie par BSE d'un grain de pyrite zonée	8
3F. Photographie par BSE de pyrite avec des limites nettes du grain	8
4A. Photographie par BSE de la pyrite avec des limites nettes de grain	10
4B. Photographie par BSE de la millérite enrobée ou remplacée partiellement par du sulfate de Ni	10
4C. Photographie par BSE de la gersdorffite bordée du produit d'altération de type 1(a) ...	10
4D. Photographie par BSE de l'uraninite bordée d'une couche du produit d'altération de type 1(a), qui est à son tour bordé du produit d'altération de type 2	10
4E. Photographie par BSE de plusieurs particules cimentées par le produit d'altération de type 3(b) pour former une grande particule	10
4F. Fort grossissement d'une partie de la partie de la particule montrée à la figure 4E	10
5. Modèles montrant l'enrichissement et l'appauvrissement pour des minéraux dans des sous-fractions de +74 μm précipités dans un liquide de densité 3,33, provenant d'échantillons du sommet, du milieu et du fond du lysimètre	20
6. Modèles montrant l'enrichissement et l'appauvrissement pour des minéraux des fractions de -12 μm provenant du sommet, du milieu et du fond du lysimètre	21

INTRODUCTION

L'altération de résidus du minerai du gisement d'U de type discordant du Midwest provenant du nord de la Saskatchewan a été étudiée dans le cadre d'un projet sur des résidus d'U de CANMET. La Fondation de recherches de l'Ontario (FRO) a simulé l'altération de ces résidus aux termes d'un contrat de CANMET et les produits altérés ont été analysés au moyen de diverses techniques (G.M. Ritcey, comm. orale, 1984-1987). Environ 11.5 tonnes de résidus d'U avaient été produites par passages du minerai en usine pilote effectués par la FRO aux termes de contrats distincts. Les résidus acides ont été traités à l'hydroxyde de Ca et déposés dans un bac pour résidus (lysimètre) à l'aide d'une technique de résidus stratifiés (1). La dernière sédimentation a été effectuée en juillet 1982. Le lysimètre mesurait 7,3 m sur 9,1 m et 60 cm de hauteur, et a été conçu de façon à recueillir l'eau de ruissellement et d'infiltration. La composition moyenne des résidus était de : 0,25 % en poids d'U, 2,5 % en poids d'As, 1,3 % en poids de Ni et 4000 pCi/g de Ra-226. On a soumis les résidus à des conditions d'altération simulées correspondant à celles du nord de la Saskatchewan, avec un cycle nuit plus jour de 4,8 heures; l'essai était alors considéré comme équivalent à 10 années d'altération par les agents atmosphériques. Le pH est passé de 7,0 à 5,9 du début à la fin de l'essai. On a prélevé des carottes périodiquement, dont les dernières au printemps de 1984. Des analyses minéralogiques ont été effectuées sur les dernières carottes et sur des résidus fraîchement lixiviés en vue de déterminer les changements survenus et de produire ainsi des données permettant de prévoir l'altération des résidus et la migration des éléments. Cette analyse a permis d'identifier et de caractériser les minéraux et les phases ainsi que de mesurer les quantités minérales. On a identifié les minéraux à l'aide d'une microsonde équipée d'un analyseur en dispersion d'énergie à rayons X (EDXA) et mesuré les quantités minérales au moyen d'un système d'analyse d'image MP-SEM-IPS (2), qui comprend un analyseur d'image SEM-IPS Kontron relié à une microsonde Jeol 733 et à un EDXA Tracor Northern 2000.

ÉCHANTILLONS

Sept carottes ont été prélevées du lysimètre par le personnel de la FRO. La surface du lysimètre avait été divisée en 100 unités réparties sur neuf rangées allant de l'admission à l'évacuation, repérées par les lettres B à J, et sur neuf colonnes allant de droite à gauche, numérotées de 1 à 9. Les carottes ont été prélevées des rangs B, E, H et J aux points 1.5, 5 et 8.5. Elles ont donc été désignées B-1.5, B-5, B-8.5, E-5, H-1.5, H-8.5 et J-5 (voir fig. 1). Les échantillons ont été prélevés du sommet, du milieu et de la base de chaque carotte. Étant donné que la différence de taille des particules dans les échantillons était trop grande pour permettre la tenue d'analyses minéralogiques, la FRO a divisé les échantillons en fractions de +74 μm , de 74 à 12 μm et de -12 μm . Des concentrés de minéraux lourds ont été préparés dans la Section de la minéralogie appliquée de CANMET, à partir des fractions de +74 μm , par séparation selon la méthode de séparation par liquide de densité intermédiaire à l'aide d'un liquide lourd de densité de 3,33. On a ainsi produit 84 échantillons à partir des sept carottes. Des sections polies ont été préparées à partir de tous les échantillons et ont été analysées.

MINÉRALOGIE

Les minéraux ont été identifiés à l'aide d'analyses qualitatives et quantitatives par EDXA de grains en sections polies. Les dosages par EDXA des éléments U, Ni, Fe, Co, Pb, Al, Si, Ca, K, As et S ont été effectués au moyen d'étalons de microsonde CANMET. On a supposé que la différence entre le total des valeurs dosées et 100 était due à l'oxygène, OH et H₂O. On a déterminé qualitativement la

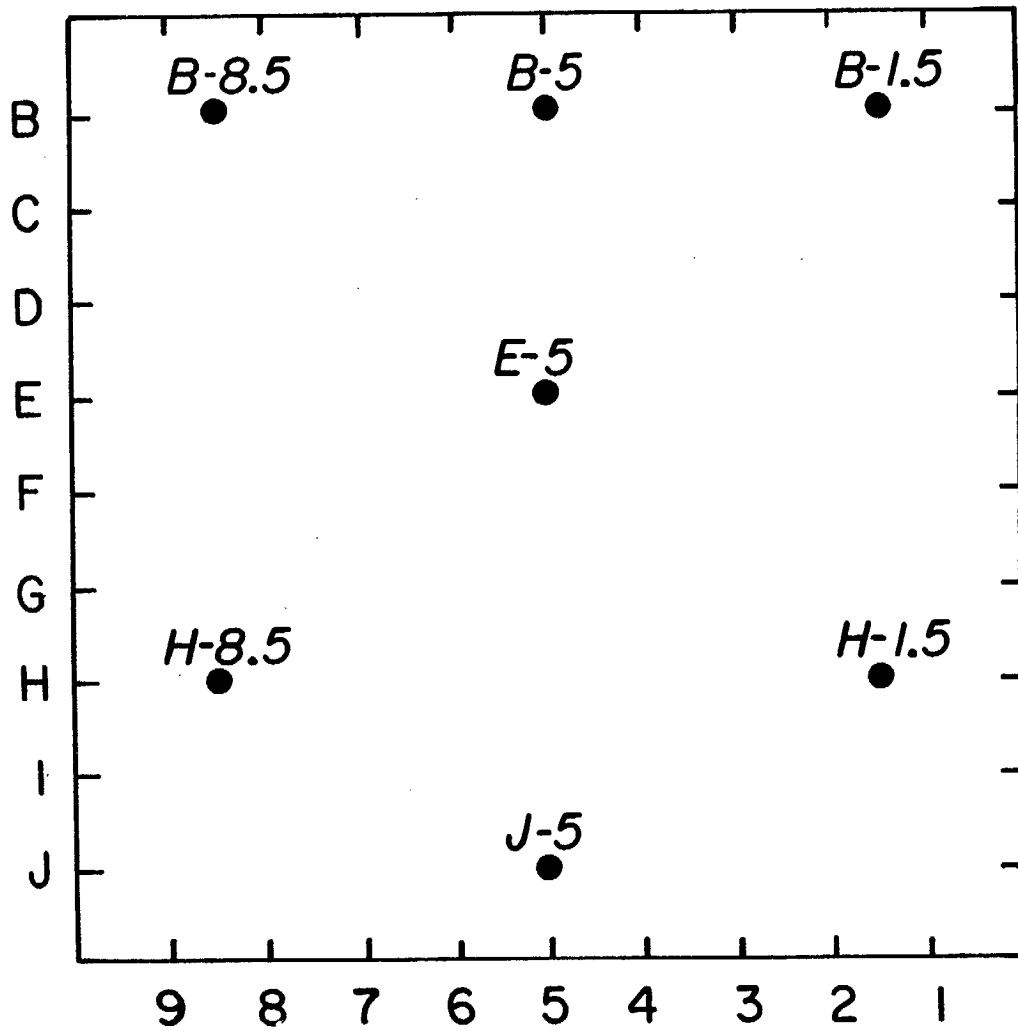


Figure 1. Plan du lysimètre montrant les emplacements des carottes.

Tableau 1 – Quantités moyennes des minéraux en fractions classées
et des échantillons combinés dans le lysimètre

Minéraux	Échantillon total	+75 μm précipité†	+74 μm surnageant†	De 74 μm à -12 μm	-12 μm
Silicates	96.1	10.6	–	88.2	–
Quartz + plagioclase	–	–	83.5	–	13.7
Feldspath potassique + calcite	–	–	6.8	–	14.5
Mafiques*	–	–	1.2	–	3.5
Illite	–	–	–	–	41.8
Mica (muscovite)	–	–	7.4	–	13.7
Zircon	0.3	5.4	tr	0.4	0.4
Gypse	–	–	–	–	0.1
Produits d'altération (types 1 à 3)	1.6	4.9	0.8	1.5	10.0
Produit d'altération (type 4)	tr	0.4	–	0.1	–
Rutile	0.3	8.3	0.1	0.8	0.1
Ilménite	tr	2.7	tr	0.1	–
Hématite + magnétite + goethite	0.2	10.8	0.1	0.8	0.2
Pyrite	0.6	13.3	tr	1.0	0.9
Chalcopyrite	tr	1.5	–	0.3	tr
Sphalérite	tr	4.2	–	0.2	–
Galène	0.3	12.1	0.1	0.6	0.2
Uraninite	0.2	12.8	tr	0.3	tr
Gersdorffite	0.4	13.0	0.1	1.7	0.1
Rammelsbergite	tr	–	–	4.0	–
Nickéline	tr	–	–	–	0.8
Millérite	tr	tr	–	–	–
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

† Dans un liquide de densité de 3,33

*Mafiques = pyroxènes, amphiboles, biotite, chlorite et titanite

+74 μm , précipité = 0,2 % en poids de l'échantillon total

+74 μm , surnageant = 49,8 % en poids de l'échantillon total

+74 μm à -12 μm = 16 % en poids de l'échantillon total

-12 μm = 34 % en poids de l'échantillon total

présence de Mg. Les échantillons et les étalons ont été analysés à 20 kV et 10 nA à l'aide d'une microsonde Jeol 733 reliée à un EDXA Tracor Northern 2000. Des corrections ZAF à neuf éléments ont été appliquées à tous les dosages. En vue d'obtenir des données fiables, les analyses ont été effectuées seulement sur des grains qui semblaient homogènes dans l'image de rétrodiffusion électronique (BSE), qui mesuraient plus de 10 μm de diamètre et qui ne se décomposaient pas sous le faisceau des électrons.

Minéralogie générale

Les minéraux silicatés identifiés dans les échantillons sont le quartz, les feldspaths potassiques, les plagioclases, la chlorite, la biotite, les minéraux silicatés mafiques (pyroxènes et/ou amphiboles), la muscovite, l'argile (illite), la titanite et le zircon. Le carbonate est sous forme de calcite. Les minéraux oxydés sont le rutile, l'ilménite, l'hématite, la magnétite, la goethite et l'uraninite. Les sulfures, les sulfoarséniures et les arséniures sont la galène, la pyrite, la chalcopyrite, la sphalérite, la millérite, la gersdorffite, la rammelsbergite et la nickéline. Les sulfates et les arséniates sont le $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, la barytine (BaSO_4) et les arséniates, sulfoarséniates et sulfates de Ni, d'U et de Pb. Un arséniate de Fe, déterminé par diffraction de rayons X (XRD), a été signalé par la FRO, mais n'a pas été trouvé au cours de la présente étude. Il est possible que l'arséniate de Ni, commun dans les échantillons, présente un diagramme XRD similaire à l'arséniate de fer et qu'il soit identifié comme de l'arséniate de fer par cette méthode. Il se pourrait aussi que de l'arséniate de Fe ait été présent dans les échantillons, et qu'il aurait été perdu (dissous ou entraîné) au cours de la préparation de l'échantillon. On a déterminé des quantités minérales pour tous les échantillons et les données ont été combinées pour obtenir les quantités minérales moyennes pour chaque fraction et sous-fraction ainsi que les quantités minérales dans un échantillon total hypothétique, exprimées en pourcentage en poids de chaque fraction et sous-fraction (tableau 1). Les quantités minérales de l'échantillon total indiquent que la majeure partie de l'U (0,25 % en poids) est sous forme d'uraninite. Par contre, seulement une partie de l'As et du Ni se trouve sous forme de minéraux primaires (gersdorffite, rammelsbergite et nickéline) et la majeure partie sous forme de produits d'altération.

Minéraux silicatés

Les minéraux silicatés sont présents sous forme de particules distinctes et sous forme d'amas de petits grains. La plupart des particules sont monominérales, mais un certain nombre montrent des enchevêtrements de plusieurs minéraux silicatés et d'autres contiennent des inclusions d'oxydes, de sulfures, de sulfoarséniures et d'arséniures. Quelques particules sont enrobées de minéraux argileux, d'arséniates, de sulfoarséniates, de sulfates et d'un matériau en amas. Ce dernier est constitué de très petits grains de minéraux silicatés cimentés de $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ainsi que d'arséniates de sulfo-arséniates et de sulfates métallifères.

On utilise l'expression minéraux silicatés mafiques pour les minéraux qui renferment du Si, du Fe et/ou du Mg, et un ou plusieurs des éléments suivants : Al, Ca, Na et K, mais dans des proportions différentes que dans la biotite, la chlorite et la muscovite. Ces trois derniers minéraux peuvent être identifiés par leur spectre EDXA respectif. La plupart des grains identifiés comme minéraux silicatés mafiques sont soit des pyroxènes, soit des amphiboles. On n'a vu aucune altération, ni sur la biotite, ni sur des minéraux silicatés mafiques; on n'a donc pas étudié leur mode d'occurrence.

La muscovite se présente sous forme de feuillets de cristaux (fig. 2A) et de très petits grains. Elle est associée à des minéraux argileux et les feuillets renferment des amas d'arséniates et de sulfoarséniates.

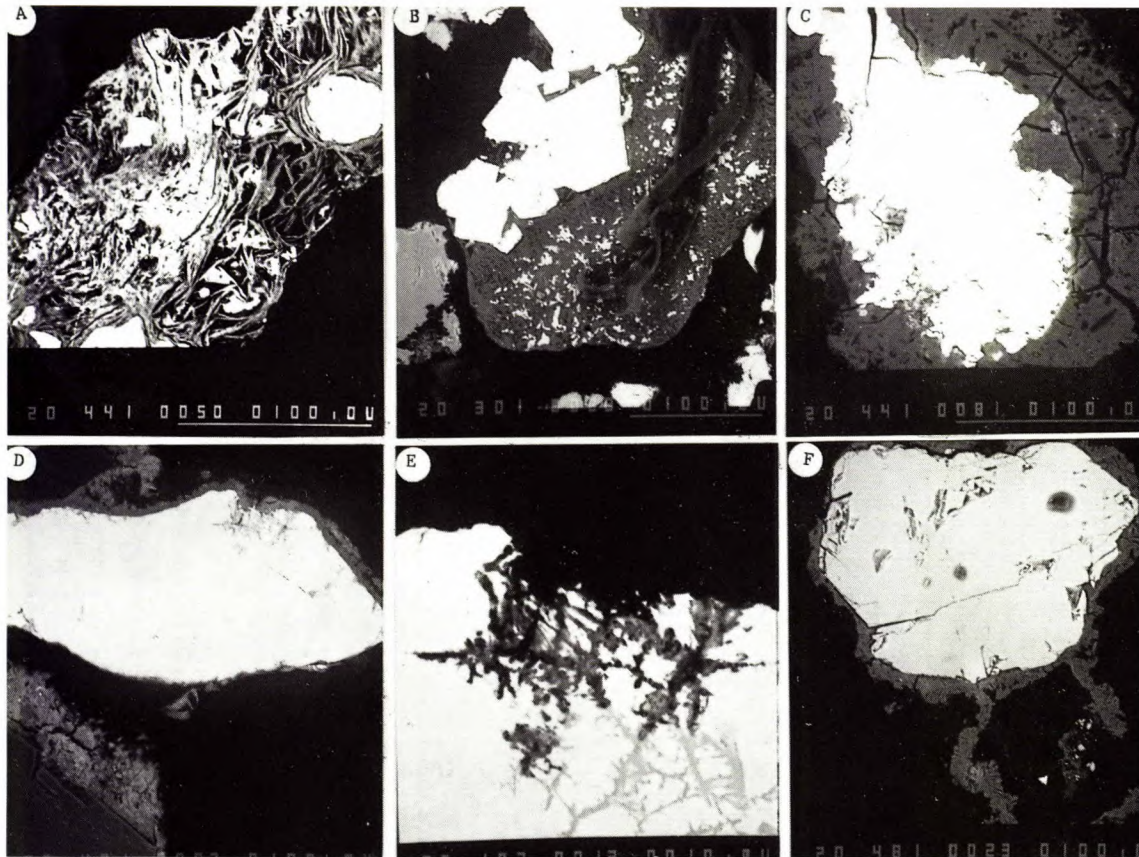


Fig. 2A – Photographie par rétrodiffusion électronique (BSE) de cristaux de muscovite avec des inclusions d'arséniates et de sulfoarséniates.

Fig. 2B – Photographie par BSE montrant un grand grain d'illite (gris) attaché à de la gersdorffite (blanc) et renfermant des inclusions de gersdorffite. Une fibre de tissu couvre une partie de l'illite.

Fig. 2C – Photographie par BSE de l'uraninite (blanc) bordée d'un produit d'altération de type 1(a).

Fig. 2D – Photographie par BSE d'uraninite (blanc) bordée d'un produit d'altération de type 1(a) (gris). Un produit d'altération de type 2 recouvre le produit de type 1(a) sur le bord droit et le sommet du grain. Le produit de type 2 est présent également sous forme de revêtement sur le minéral silicaté (gris), dans le coin inférieur gauche de la photographie.

Fig. 2E – Photographie par BSE d'uraninite (blanc) avec trois variétés de veinules. Les veinules gris clair au centre ont la plus forte teneur en U (59 % en poids); les veinules grises, près des bordures du grain, renferment moins d'U (46 % en poids); et les parties gris foncé au centre des veinules renferment encore moins d'U (37 % en poids).

Fig. 2F – Photographie par BSE montrant de la galène avec un revêtement du produit d'altération de type 1(a).

Tableau 2 - Analyses des minéraux par EDXA

Minéraux	Éléments (en % en poids)										OH.* 0.4 ₂	Remarques
	U	Ni	Fe	Pb	Al	Si	Ca	K	As	S		
Illite		1.3	7.0		11.3	20.3		2.9		2.2	54.0	adjacente à de la gersdorffite
Illite		0.6	5.2		12.7	21.5	0.7	3.8	4.6	0.3	50.6	inclusion dans de la pyrite
Goethite		1.2	57.5		3.0	6.1	0.4		0.8		31.0	bordure de la pyrite
Uraninite	72.4		0.1	13.8		0.1				0.8	12.8	moyenne de 7 endroits**
U-phase 1	59.3			18.5		1.8				1.6	18.8	veinules au centre de
U-phase 2	45.8	1.9	1.2	31.7		1.3	3.3		6.1	1.6	7.2	l'uranium veinules près
U-phase 3	36.8	2.0	1.5	34.7		1.6	3.2		5.6	2.0	12.6	de la bordure du grain
Pyrite		2.1	43.5						3.5	51.0		veinules sur la bordure
Millérite		62.0	1.4							36.6		du grain
Millérite altérée		31.3	5.2			7.3	1.0			25.2	30.0	
Gersdorffite		33.6							49.5	18.3		
Rammelsbergite		27.5							72.5			
Produits d'altération												
Type 1(a)	0.5	25.3	0.4			0.7	2.8		28.4	0.1	41.8	moyenne de 11***
Type 1(b)		9.6					2.4		35.4		52.6	sur du quartz
Type 2	1.7	1.1	2.7	37.5	4.4	1.9	0.6			6.9	43.2	
Type 3(a)	25.8	1.1	1.5	10.2		8.5	2.5			0.8	49.6	sur de la galène
Type 3(b)	8.2	13.2	1.0			2.5	0.8		24.0	12.4	37.8	matériaux du ciment.
Type 4	0.1	28.3	7.6	4.2	0.1	0.3	0.2		1.1	41.1	17.0	moyenne de 6**** moyenne de 4*****

*par différence: **plage : U 70.8-75.6. Pb 8.8-16.0. S 0-1.5 % en poids; ***plage : U 0-1.2, Ni 21.6-30.0. Fe 0-1.8, Si 0.2-1.6, Ca 1-4.1, As 23.3-33.4, S 0-1 % en poids; ****plage : U 4.6-12.4, Ni 12.4-14.4, Fe 0.6-1.3, Si 2-2.8, Ca 0.6-0.9, As 23.5-24.1, S 11.7-13.2 % en poids; *****plage : U 0-0.5, Ni 21.6-35.0, Fe 3.9-12.0, Pb 0-10.1, Al 0-0.4, Si 0-0.6, Ca 0.2-0.3, As 0-2.4, S 37.9-42.3 % en poids.

Les minéraux argileux sont constitués d'Al, de Si et de K et renferment un peu de Fe, de Mg et de Ca. Ils ont été identifiés comme de l'illite à la suite de l'analyse XRD par la FRO. Des analyses EDXA ont été effectuées sur une masse d'illite qui se trouve sur la bordure d'un grain de gersdorffite et qui renferme de petites inclusions de cette dernière (fig. 2B), ainsi que sur une inclusion d'illite dans de la pyrite (tableau 2). On a décelé de petites quantités de Ni, d'As et de S, provenant probablement de petites inclusions d'arséniates, de sulfoarséniates et de sulfates de Ni. L'illite est présente sous forme de petits grains, d'amas et de revêtements sur d'autres minéraux, ainsi que sous forme d'altération de feldspath potassique. Elle est généralement mélangée à du $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ et à des arséniates, des sulfoarséniates et des sulfates métalliques. On ne sait pas si l'illite s'est formée dans le lysimètre ou était présente à l'origine dans les résidus. Toutefois, étant donné qu'elle est mélangée à des arséniates et à des sulfates qui ont été produits dans le lysimètre, l'illite a dû se déplacer vers des endroits où les produits de réaction étaient présents ou encore les produits de réaction se sont déplacés vers des endroits où l'illite était présente.

La chlorite, comme l'illite, est présente sous forme de petits grains, d'amas et de revêtements sur d'autres minéraux. La chlorite présente dans les amas et les revêtements est mélangée à de l'illite, à des sulfates et à des arséniates. Comme l'illite, elle se trouvait donc dans des endroits où se faisait la réaction.

Minéraux oxydés

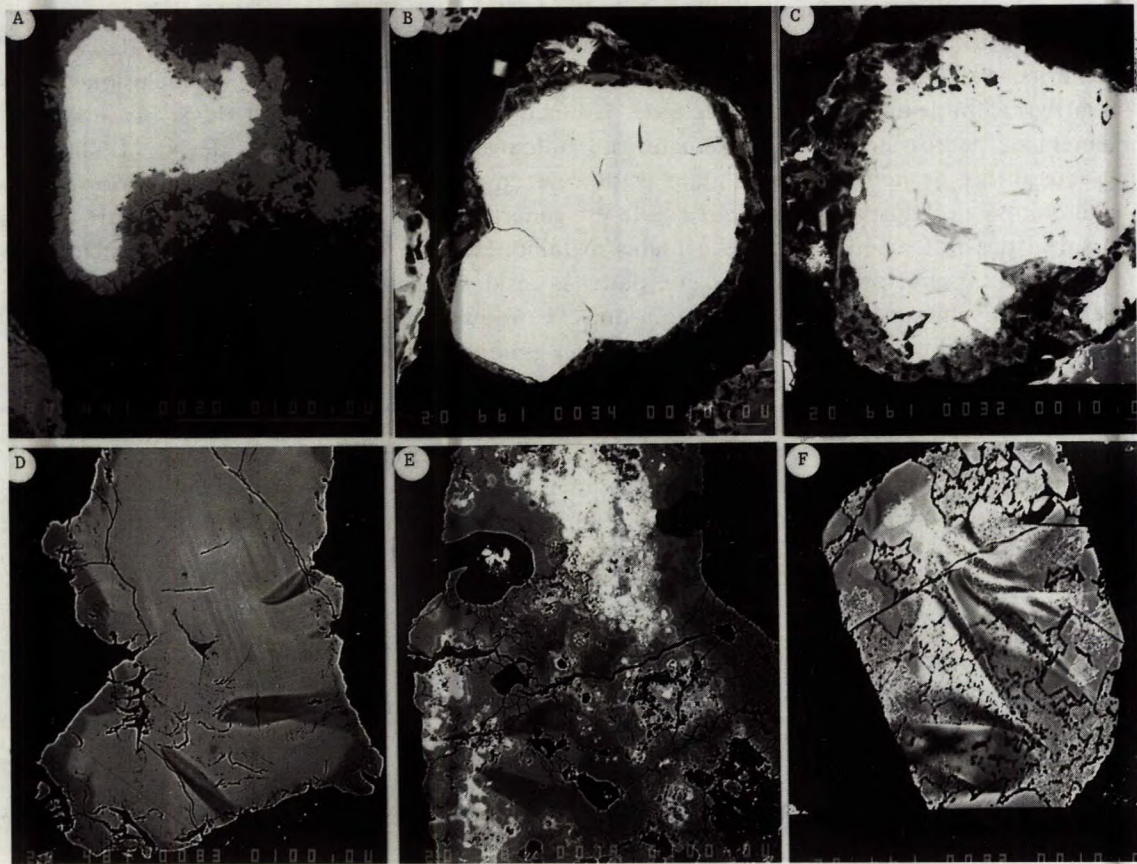
Du rutile, de l'ilménite, de l'hématite et de la magnétite sont présents à la fois sous forme de particules distinctes et sous forme d'inclusions dans des silicates. Aucune altération de ces minéraux n'a été observée; on n'a donc pas étudié leurs propriétés. Toutefois, les quantités de rutile, d'ilménite et d'hématite en plus de la magnétite ont été déterminées (voir la section sur les quantités minérales).

La présence de petites quantités de goethite sur les bords de quelques particules de pyrite indiquent une altération de la goethite. Le tableau 2 donne l'analyse par microsonde de la goethite qui se trouve sur le bord d'une particule de pyrite nickélique et arsenicale.

On trouve de l'uraninite dans la plupart des échantillons sous forme de particules distinctes, dont certaines sont enrobées d'arséniates, de sulfoarséniates et de sulfates (fig. 2C et 2D). La limite entre l'uraninite et le revêtement est irrégulière, ce qui laisse supposer qu'il y a eu une réaction à la surface de l'uraninite. La moyenne des sept analyses de l'uraninite par EDXA est, en pourcentage en poids, de 72,4 d'U et de 13,8 de Pb, de 70,8 à 75,6 d'U et de 8,8 à 16,8 de Pb (tableau 2). L'uraninite renferme des veinules à trois phases uranifères (fig. 2E). La phase en veinules près des centres des grains d'uraninite renferme 59,3 % en poids d'U et 18,5 % en poids de Pb (tableau 2); la phase en veinules du côté des bords des grains d'uraninite renferme 45,8 % en poids d'U et 31,7 % en poids de Pb, et la phase en veinules se trouvant sur les bords des grains renferme 36,8 % en poids d'U et 34,7 % en poids de Pb (tableau 2). Les veinules uranifères se trouvant dans l'uraninite sont interprétées comme étant des minéraux originaux dans le minerai plutôt que des minéraux d'altération dans le lysimètre.

Sulfures, sulfoarséniures et arséniures

Les sulfures, les sulfoarséniures et les arséniures sont présents sous forme de particules distinctes et sous forme d'inclusions dans des minéraux silicatés. Certaines particules sont enrobées d'arséniures,



- Fig. 3A – Photographie par BSE de galène avec un revêtement du produit d'altération type 1(a) (à remarquer la limite irrégulière entre la galène et le produit d'altération).
- Fig. 3B – Photographie par BSE de pyrite avec un revêtement du produit d'altération de type 1(a) (à remarquer la limite nette entre la pyrite et le revêtement).
- Fig. 3C – Photographie par BSE de pyrite avec un revêtement à la fois du produit d'altération de type 1(a) et de goethite (non différenciée dans la photographie). La limite entre la pyrite et la goethite est irrégulière.
- Fig. 3D – Photographie par BSE d'un grain de pyrite renfermant 2 % en poids de Ni et 3 % en poids d'As. Les parties les plus foncées du grain ne renferment ni Ni ni As, et les parties plus claires ont des teneurs plus élevées en As.
- Fig. 3E – Photographie par BSE d'un grain de pyrite zonée. Les parties blanches sont de la pyrite enrichie en As et renferment des quantités décelables (par l'EDXA) d'U. La pyrite dans les parties grises renferme de l'As décelable, alors que la pyrite dans les parties gris foncé n'en renferme pas.
- Fig. 3F – Photographie par BSE de pyrite avec des limites nettes du grain.

de sulfoarséniures, de sulfates et de minéraux argileux. La limite entre la surface du grain et le revêtement est lisse pour certains grains (fig. 2F) et corrodée pour d'autres (fig. 3A). Les limites corrodées des grains indiquent des réactions à l'interface des grains.

Seulement de faibles quantités de sphalérite et de chalcopyrite sont présentes, mais quelques grains sont enrobés d'arséniures et de sulfoarséniures. La présence d'une limite nette entre le minéral et le revêtement serait l'indice d'une absence de réaction importante à la surface du minéral et d'un revêtement lié essentiellement à une phase de sédimentation plutôt qu'à un produit de réaction in situ.

La galène est présente dans la plupart des échantillons sous forme de particules distinctes et sous forme d'inclusions dans des minéraux silicatés. Certaines particules de galène sont enrobées d'arséniures, de sulfoarséniures, de sulfates et d'oxydes d'U-Pb (fig. 2F et 3A), et la limite des grains entre la galène et le revêtement est corrodée par endroits. La corrosion indique qu'une certaine réaction s'est produite à la surface des grains de galène.

La pyrite est présente également sous forme de particules distinctes et sous forme d'inclusions dans des minéraux silicatés. Quelques particules sont enrobées d'arséniures, de sulfates, de minéraux argileux et de goéthite. La limite des grains entre la pyrite et les revêtements est de nette (fig. 3B) à légèrement corrodée (fig. 3C), ce qui indique qu'une très faible réaction s'est produite sur les surfaces de grains de pyrite. La plupart des grains de pyrite renferment environ 2 % en poids de Ni et 3 % en poids d'As (tableau 2), avec des quantités plus élevées à certains endroits (fig. 3D et 3E). Les limites des grains de pyrite dans certaines particules de pyrite sont exceptionnellement bien définies (fig. 3F et 4A). Cette délimitation peut avoir été produite par l'altération dans le lysimètre ou peut être due à la présence de la pyrite dans un massif uranifère. Les analyses effectuées par EDXA indiquent que les espaces entre les grains de pyrite renferment des quantités d'illite à l'état de trace. Une petite quantité de pyrite située sur les bords des particules a été altérée pour donner de la goéthite.

On a trouvé quelques groupes de grains de millérite prismatique (tableau 2). La millérite a été soit partiellement altérée ou remplacée par un sulfate de nickel (fig. 4B et tableau 2). Il est possible que le Si décelé dans le sulfate de Ni provienne d'impuretés, bien qu'il soit difficile de le savoir, car les grains sont trop petits et trop mal polis pour donner de bonnes analyses.

La gersdorffite est le minéral arsenical le plus commun dans les échantillons. Elle présente sous forme de particules distinctes et sous forme d'inclusions dans des minéraux silicatés. Certaines particules sont bordées de couches d'arséniates, de sulfoarséniates, de sulfates et de minéraux argileux. Un grand nombre de bords de grains de gersdorffite sont corrodés par des arséniates de Ni, et des restes de gersdorffite sont présents dans les revêtements d'arséniates de Ni (fig. 4C). De plus, de petites inclusions de gersdorffite sont présentes dans de l'illite massive, adjacente à de grands grains de gersdorffite (fig. 2B). Des analyses par EDXA indiquent que la gersdorffite est légèrement riche en arsenic (tableau 2).

On a trouvé quelques grains de rammelsbergite et de nickéline. Certains sont enrobés d'arséniates de Ni, mais on n'a pas déterminé si la rammelsbergite et la nickéline ont été altérées.

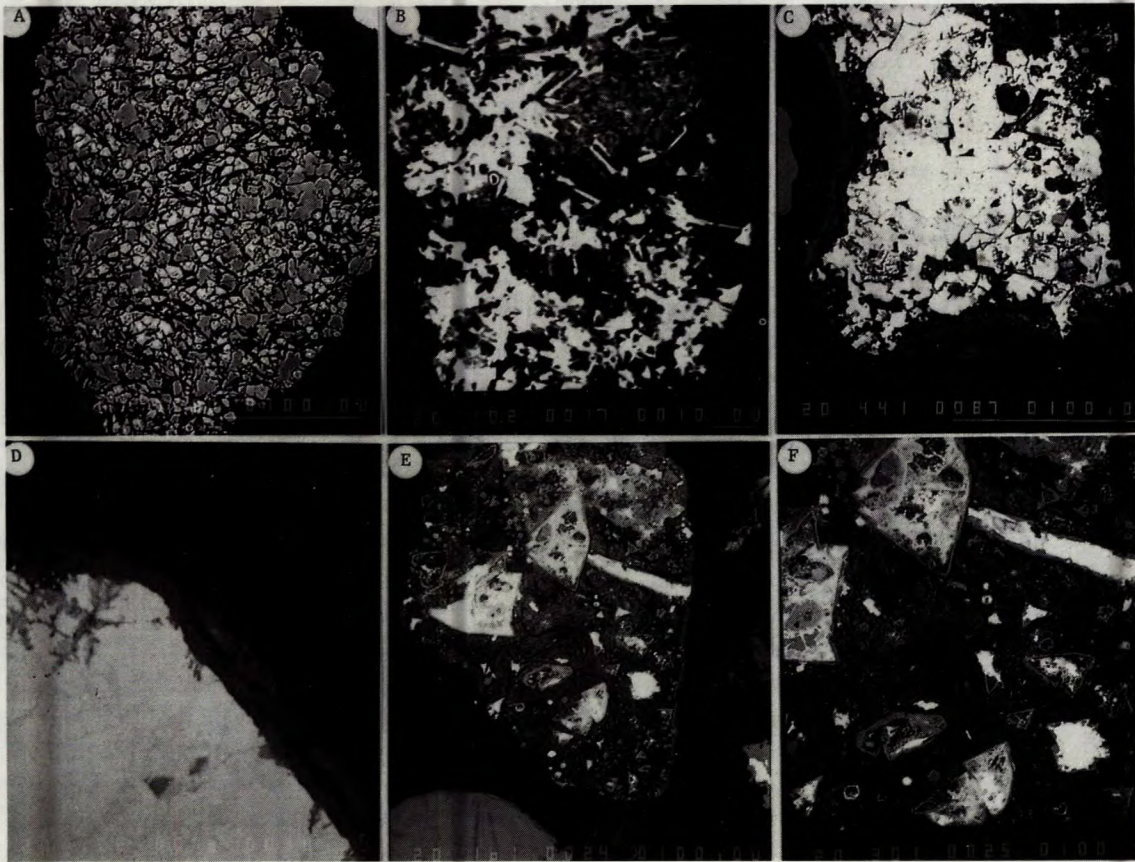


Fig. 4A – Photographie par BSE de la pyrite avec des limites nettes de grain.

Fig. 4B – Photographie par BSE de la millérite enrobée ou remplacée partiellement par du sulfate de Ni.

Fig. 4C – Photographie par BSE de la gersdorffite bordée du produit d'altération de type 1(a). À remarquer la limite irrégulière de la gersdorffite et du produit d'altération.

Fig. 4D – Photographie par BSE de l'uraninite bordée d'une couche du produit d'altération de type 1(a), qui est à son tour bordé du produit d'altération de type 2.

Fig. 4E – Photographie par BSE de plusieurs particules cimentées par le produit d'altération de type 3(b) pour former une grande particule. Celle-ci est bordée à droite du produit d'altération du type 4 (sulfate de Ni).

Fig. 4F – Fort grossissement d'une partie de la partie de la particule montrée à la figure 4E. Les inclusions se trouvant dans le produit d'altération de type 3 sont bordées du produit d'altération de type 1(a).

Sulfates, arséniates et sulfoarséniates

Le sulfate de Ca est commun dans les échantillons. Il est présent sous forme de petits grains associés à de très fines particules granuleuses de minéraux silicatés, généralement sous forme de ciment. Quelques cristaux blancs se sont précipités sur la surface du matériau dans le lysimètre. Des analyses spectrographiques semi-quantitatives effectuées par la FRO (1) montrent que ces cristaux sont constitués de sulfate de Ca. Une petite quantité de barytine, identifiée au moyen de la XRD, est présente sous forme d'amas de substance verdâtre à la surface du lysimètre.

Des arséniates, des sulfoarséniates et des sulfates se sont formés par oxydation de la gersdorffite, de l'uraninite, de la galène et de la pyrite, et par précipitation ultérieure d'ions libérés sous forme de revêtements ou de couches sur la plupart des grains minéraux, particulièrement sur la gersdorffite et l'uraninite. Les revêtements (produits d'altération) ont été classés en quatre types fondés sur leur composition.

Le type 1(a) est le produit d'altération le plus commun. Il apparaît sous forme de revêtement sur chaque minéral (fig. 2C, 2D, 2F, 3A, 3B, 2C, 4C et 4D), mais seulement quelques particules de chaque minéral sont enrobées. Le tableau 2 montre la composition moyenne déterminée par dosage EDXA de 11 grains. Le rapport Ni/As (en proportions atomiques) est de l'ordre de 1/1, et la phase renferme une petite quantité de Ca et des quantités à l'état de traces de Si, d'U, de Fe et de S. La phase est donc un arséniate de Ni probablement hydraté. À certains endroits, le bord extérieur du revêtement du type 1(a) situé sur de la gersdorffite est enrichi d'environ 5 % en poids en As et appauvri d'environ 5 % en poids de nickel.

Le produit d'altération de type 1(b) est également une phase arsenicale de Ni (tableau 2), mais le rapport Ni/As (en proportions atomiques) est de 1/3; c'est donc un triarséniate de Ni, probablement hydraté. On trouve du triarséniate hydraté seulement sous forme de revêtement sur du quartz.

Le produit d'altération de type 2 se présente sous forme de couches extérieures sur le revêtement de type 1(a) qui recouvre l'uraninite et la gersdorffite (fig. 4D), et sous forme d'un revêtement sur des grains silicatés. Des dosages effectués par EDXA montrent que c'est un sulfate de Pb qui renferme un peu de Fe, de Si, d'Al, d'U, de Ni, de Ca et d'As (tableau 2), et une analyse par XRD donne la structure des sulfates de Pb (anglésite).

Le produit d'altération de type 3(a), trouvé sous forme de revêtement sur de la gersdorffite, est un oxyde d'U-Pb-Si contenant de faibles quantités de Ca, de Fe, de Ni et de S (tableau 2).

Le produit d'altération de type 3(b) est également uranifère, mais c'est un sulfoarséniure d'U-Ni. Il se présente sous forme de matrice entre de la gersdorffite, de la galène, de la pyrite, de minéraux silicatés, etc. (fig. 4F). Des inclusions de gersdorffite et de galène à l'intérieur du produit d'altération de type 3(b) sont enrobées de produits d'altération de types 1(a) et 2 (fig. 4F).

Le produit d'altération de type 4 se présente sous forme de revêtements sur des particules composées de produits d'altération de type 3(b) (fig. 4E), sur des amas de minéraux argileux et sous forme de grains distincts. La composition moyenne provenant de quatre dosages par EDXA montre que le produit d'altération de type 4 est un sulfate de Ni-Fe contenant des impuretés de Pb, d'As, de Si, de Ca, d'Al et d'U (tableau 2). Le rapport Ni+Fe/S (en proportions atomiques) est de l'ordre de 1/2. Des cristaux verts se développent par endroits sur la surface du matériau dans le lysimètre. Des

analyses spectrographiques semi-quantitatives effectuées par la FRO (1) montrent que les principaux éléments sont le Ni et le S; les cristaux verts sont donc le produit d'altération de type 4.

Le produit d'altération de type 3(a), trouvé sous forme de revêtement sur de la gersdorffite, est un oxyde d'U-Pb-Si contenant de faibles quantités de Ca, de Fe, de Ni et de S (tableau 2).

Le produit d'altération de type 3(b) est également uranifère, mais c'est un sulfoarséniure d'U-Ni. Il se présente sous forme de matrice entre de la gersdorffite, de la galène, de la pyrite, de minéraux silicatés, etc. (fig. 4F). Des inclusions de gersdorffite et de galène à l'intérieur du produit d'altération de type 3(b) sont enrobées de produits d'altération de types 1(a) et 2 (fig. 4F).

Le produit d'altération de type 4 se présente sous forme de revêtements sur des particules composées de produits d'altération de type 3(b) (fig. 4E), sur des amas de minéraux argileux et sous forme de grains distincts. La composition moyenne provenant de quatre dosages par EDXA montre que le produit d'altération de type 4 est un sulfate de Ni-Fe contenant des impuretés de Pb, d'As, de Si, de Ca, d'Al et d'U (tableau 2). Le rapport Ni+Fe/S (en proportions atomiques) est de l'ordre de 1/2. Des cristaux verts se développent par endroits sur la surface du matériau dans le lysimètre. Des analyses spectrographiques semi-quantitatives effectuées par la FRO (1) montrent que les principaux éléments sont le Ni et le S; les cristaux verts sont donc le produit d'altération de type 4.

Interprétations des réactions minérales dans le lysimètre

L'étude minéralogique laisse supposer que la gersdorffite, l'uraninite, la galène et la pyrite ont réagi dans le lysimètre et que certains des ions libérés ont précipité. Des analyses texturales indiquent qu'un arséniate de Ni [(produit d'altération de type 1(a)) a précipité en premier; il a été suivi d'un triarséniate de Ni [type 1(b)]. Un sulfate de Pb (type 2) a précipité en deuxième lieu et a été suivi d'un oxyde d'U-Pb-Si [type 3(a)] et d'un sulfoarséniate d'U-Ni [type 3(b)]. Le dernier précipité était un sulfate de Ni (type 4).

D'après les observations minéralogiques, on conclut que la gersdorffite a réagi la première et a libéré du Ni, de l'As et du S. Le Ni et l'As ont précipité sur toutes les particules sous forme de revêtements d'arséniate et de triarséniate de Ni. Il est probable que le S libéré a faiblement acidifié l'eau (d'un pH 7 à un pH 5,9), qui a réagi à son tour avec de la galène et de l'uraninite. Certains des produits d'altération sont restés in situ, mais la plupart des ions libérés ont été transportés et ont précipité sous forme de produits d'altération sur d'autres particules ou ont été entraînés vers la décharge. Le plomb libéré a précipité sur toutes les particules sous forme de revêtements de sulfate de Pb. Par contre, l'U libéré a précipité sous forme d'oxyde d'U-Pb-Si qui a enrobé toutes les particules et sous forme de sulfoarséniate d'U-Ni qui a cimenté les particules contiguës. Le Ni restant a précipité sous forme de sulfate de Ni-Fe. À la suite de la faible augmentation de l'acidité, la pyrite a commencé à s'oxyder et à libérer du Fe; une partie du Fe a précipité sous forme de goethite.

QUANTITÉS MINÉRALES

Des quantités minérales ont été déterminées à l'aide du système d'analyse d'images MP-SEM-IPS (2) en vue d'évaluer a) le degré de réactivité de la gersdorffite, de l'uraninite, de la galène et de la pyrite, b) l'extension de la précipitation des arséniates, des sulfoarsénates, des sulfates et des d'oxydes d'U-Pb-Si, et c) le mouvement des petits grains, particulièrement des minéraux argileux, par effet d'entraînement dans le lysimètre. Les fractions triées ainsi que les sous-fractions précipitées

Tableau 3 - Quantités des minéraux* dans les sous-fractions de +74 µm, précipités dans une solution de densité 3,33.

Minéraux	B - 1,5			B - 5			B - 8,5			E - 5			H - 1,5			H - 8,5			J - 5			Ave	Cr	Sp.
	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond			
Silicates**	3,7	2,0	0,9	1,3	2,4	1,8	8,7	1,9	0,7	0,6	7,6	18,0	2,8	3,2	1,5	1,6	1,9	47,2	4,4	52,7	57,3	10,6	2,9	
Zircon	3,1	8,8	4,9	4,1	8,3	2,4	5,0	7,0	10,8	4,9	0,03	2,2	9,0	4,9	7,0	10,2	12,5	3,3	2,8	1,1	0,7	5,4	4,6	
Produits d'altération (types 1-3)	2,7	5,7	4,3	5,2	7,6	3,1	9,3	8,1	3,9	13,7	7,6	1,8	7,3	3,3	3,9	1,0	1,2	1,2	11,4	0,2	0,8	4,9	2,8	
Produits d'altération (type 4)	0,5	0,4	0,3	0,1	0,5	0,1	1,5	0,9	0,6	0,5	0,3	0,3	0,2	0,6	0,9	1,0	0,04	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	4,6	
Rutile	5,0	9,0	9,1	4,1	9,1	6,6	3,0	16,5	10,6	4,9	10,1	8,8	12,4	8,8	5,2	11,3	26,3	5,1	6,8	0,0	0,4	8,3	4,2	
Ilménite	1,7	2,6	1,1	0,4	1,9	0,1	2,1	2,7	0,7	0,3	0,9	3,2	0,6	1,5	0,6	2,1	1,4	4,6	2,0	13,4	12,6	2,7	4,8	
Hématite + magnétite + goethite	11,5	10,3	4,2	5,4	7,9	1,8	15,8	8,9	3,5	3,3	10,7	9,3	7,4	10,2	3,5	7,8	8,0	28,6	8,9	31,4	27,5	10,8	5,5	
Fyrite	7,9	29,8	15,1	12,8	18,8	6,8	12,8	22,5	15,1	13,2	22,8	8,1	15,9	10,3	18,3	18,5	22,4	3,9	10,7	0,4	0,3	13,3	5,0	
Chalcopyrite	0,5	1,6	2,5	3,1	0,7	1,1	0,7	0,7	1,2	1,1	3,9	1,6	2,8	1,2	1,1	1,3	4,9	0,5	0,3	0,0	0,4	1,5	4,3	
Sphalérite	4,8	5,6	3,4	4,7	4,8	2,5	5,3	3,5	5,0	4,4	5,9	4,6	6,4	2,6	5,8	4,4	5,9	1,1	6,9	0,2	0,02	4,2	4,1	
Galène	17,9	14,5	5,0	17,4	19,7	10,7	20,9	17,4	14,0	9,2	9,3	2,9	9,7	9,0	19,7	18,1	13,2	0,5	23,0	0,6	0,0	12,1	7,5	
Uraninite	36,1	1,8	10,9	35,6	5,3	48,3	13,0	3,5	10,5	18,6	9,3	5,0	11,4	27,6	8,1	4,6	0,7	0,1	16,4	0,0	0,0	12,8	7,5	
Gersdorffite	4,6	7,9	38,3	5,8	13,0	14,7	1,9	6,4	23,4	25,3	11,6	34,2	14,1	16,8	24,4	18,1	1,6	3,9	6,4	0,0	0,0	13,0	6,0	
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		

*Quantités en pourcentage en poids = fraction de surface déterminée par l'analyse d'image, calculée en pourcentage en poids d'après les densités

**Silicates = quartz, plagioclase, feldspath potassique, illite, chlorite, biotite, muscovite, séricite, amphiboles, pyroxène, titanite, et comprend également de la calcite et du gypse.

Tableau 4 - Quantités des minéraux* dans les sous-fractions de +74 µm, surnageant dans une solution de densité 3,33.

Minéraux	B - 1,5			B - 5			B - 8,5			E - 5			H - 1,5			H - 8,5			J - 5			Sp.		
	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Ave	Cr	
Quartz + plagioclase	98,0	96,0	84,6	96,9	95,1	94,2	89,7	94,3	93,4	97,4	94,4	72,0	83,4	90,5	91,7	85,7	90,2	53,9	67,2	51,0	32,2	83,4	2,65	
Feldspath potassique + calcite							4,7	-	-	0,03	0,2	0,5	2,7	4,4	3,0	5,7	4,2	43,1	25,1	47,7	1,1	6,8	2,7	
Mafiques**	0,3	1,3	1,6	0,9	1,7	3,8	-	1,1	3,2	-	-	9,6	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	1,1	0,4	1,2	2,9	
Mica (muscovite + séricite)	1,3	2,1	12,2	2,3	2,3	1,4	2,0	3,1	2,1	1,1	4,0	17,4	10,4	4,1	4,1	6,3	4,7	2,5	7,0	0,1	66,0	7,4	2,7	
Zircon	-	0,02	0,05	0,17	0,03	-	-	0,09	-	0,2	0,1	0,1	0,1	-	-	-	-	-	-	-	0,01	0,04	4,6	
Produits d'altération + gypse	0,2	0,4	0,2	0,2	0,5	0,2	2,9	1,3	0,3	0,8	1,1	0,1	3,1	0,6	0,7	1,8	0,6	0,4	0,3	0,02	0,2	0,8	2,8	
Rutile	-	0,02	0,04	0,03	0,05	0,01	0,01	0,1	0,3	0,04	0,01	0,03	0,01	0,02	0,1	0,1	0,1	0,01	0,1	0,1	0,1	0,1	4,2	
Ilménite	-	-	-	0,01	-	-	-	-	-	0,04	-	-	-	0,01	-	0,01	-	0,02	0,01	-	-	-	0,01	4,8
Hématite + magnétite + goethite	-	0,03	-	-	0,01	0,1	0,01	-	0,01	-	0,2	-	0,2	0,2	0,04	-	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	5,5
Pyrite	-	-	0,03	0,1	-	0,01	0,01	-	0,02	-	0,01	0,02	0,02	-	0,03	-	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	5,0	
Galène + sphalérite + chalcopryrite	0,01	0,06	0,1	0,2	0,1	0,04	0,6	-	-	0,2	0,1	0,02	0,05	0,03	0,1	0,2	0,04	-	0,02	-	0,02	0,1	6,0	
Uraninite	0,05	-	-	0,01	-	0,1	-	-	0,2	-	-	0,1	-	0,03	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	7,5
Gersdorffite	0,1	0,1	1,2	0,2	0,2	0,2	0,04	-	0,5	0,2	0,05	0,01	0,01	0,02	0,01	0,1	0,04	0,01	0,06	-	-	-	0,10	6,0
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

*Quantités en pourcentage en poids = fraction de surface déterminée par l'analyse d'image, calculée en pourcentage en poids d'après les densités

**Mafiques = pyroxène, amphiboles, biotite, chlorite et titanite.

Tableau 5 - Quantités des minéraux* dans des fractions allant de 12 à +74 µm.

Minéraux	B - 1.5			B - 5			B - 8.5			E - 5			H - 1.5			H - 8.5			J - 5			Ave	Sp.
	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond		
Silicates**	84,9	84,2	75,2	74,2	75,8	82,4	87,6	93,9	72,7	86,8	90,5	88,7	93,8	93,8	93,6	95,6	95,6	95,4	95,9	95,1	96,5	88,2	7,7
Zircon	0,8	0,5	0,9	0,2	0,5	1,6	1,3	0,3	0,3	0,2	0,5	0,3	0,04	0,1	0,05	0,2	1,0	0,2	0,3	0,1	0,1	0,5	4,6
Produits d'altération (types 1-3)	1,7	2,8	1,4	1,8	2,0	0,6	2,6	1,1	2,0	4,5	1,4	0,8	1,8	0,3	0,6	1,6	1,1	0,3	1,0	1,6	1,4	1,5	2,3
Produit d'altération (type 4)	0,1	-	0,1	0,02	-	-	-	0,02	-	0,1	0,05	0,01	0,1	0,03	0,03	0,1	0,05	0,2	-	0,01	-	0,04	4,6
Rutile	0,9	0,3	0,5	0,2	0,9	0,04	0,9	1,2	0,8	1,2	1,6	1,5	0,9	0,7	1,6	0,7	0,5	0,9	0,9	0,6	0,2	0,8	4,2
Ilménite	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	0,2	0,2	-	-	-	0,1	0,01	0,1	0,04	0,03	0,5	0,1	4,3
Hématite + magnétite + goethite	1,7	1,2	1,4	0,7	0,6	0,5	0,5	1,3	0,7	0,3	0,9	0,2	0,6	1,4	0,8	0,5	1,0	0,8	0,4	0,8	1,3	0,8	5,5
Pyrite	0,7	1,2	2,0	0,9	2,4	1,2	0,9	0,5	1,6	1,4	1,8	1,1	1,3	0,7	0,5	0,5	0,4	0,5	0,3	0,3	0	1,0	5,0
Chalcopyrite	0,4	0,1	0,8	0,4	0,4	0,4	0,2	0,6	0,2	0,2	0,6	0,3	0,1	0,3	0,5	0,03	0,1	0,6	0,1	0,1	-	0,3	4,3
Sphalérite	0,4	0,4	0,05	0,3	0,2	0,4	0,5	0,1	0,5	0,3	0,1	0,2	0,3	0,05	0,03	0,1	0,1	0,1	0,02	0,08	-	0,2	4,1
Galène	2,2	0,9	0,2	0,9	0,9	1,4	1,1	0,1	1,0	0,9	0,8	0,4	0,6	0,3	0,01	0,1	0,1	0,3	0,2	1,1	0	0,6	7,5
Uraninite	1,4	-	0,6	0,8	-	0,7	-	-	0,2	1,3	0,1	0,02	0,2	0,7	0,2	-	-	0,05	0,1	-	-	0,3	7,5
Gersdorffite	1,5	0,1	6,8	0,6	1,1	8,9	0,3	0,1	1,8	1,5	1,4	6,3	0,1	1,5	2,1	0,5	-	0,6	0,3	-	-	1,7	6,0
Rammelsbergite + nickéline	3,3	8,3	10,1	19,0	15,2	1,9	4,1	0,8	18,2	1,1	0,01	-	0,2	0,1	-	-	0,03	-	0,4	0,2	-	4,0	5,5
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

*Quantités en pourcentage en poids = fraction de surface déterminée par l'analyse d'image, calculée en pourcentage en poids d'après les densités

**Minéraux silicatés = quartz, plagioclase, feldspath potassique, muscovite, séricite, illite, chlorite, pyroxène, biotite, titanite et comprend la calcite et le gypse.

Tableau 6 - Quantités des minéraux* dans les fractions de 12 à 74 µm.

Minéraux	B - 1.5			B - 5			B - 8.5			E - 5			H - 1.5			H - 8.5			J - 5			Ave	Sp. Cr
	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond		
Quartz + plagioclase	26,0	30,4	0,02	7,0	15,7	23,8	0,2	0,3	0,2	8,8	19,9	19,6	6,5	0,4	2,7	21,8	17,4	27,6	17,0	24,4	18,4	13,7	2,65
Feldspath potassique + calcite	6,0	10,3	4,1	21,1	17,6	9,7	2,7	2,2	6,1	25,6	29,1	27,2	0,8	13,1	4,3	16,2	23,2	29,2	32,5	20,6	3,0	14,5	2,60
Mafiques	2,2	0,6	0,8	6,4	3,5	2,3	0,4	0,3	1,1	10,8	3,8	1,8	-	5,4	0,9	7,9	6,4	5,7	7,8	2,9	1,7	3,5	2,90
Mica (muscovite)	3,9	2,5	47,4	15,1	18,7	4,5	19,9	19,0	23,2	20,0	12,2	5,2	-	10,4	21,0	19,9	14,0	11,3	11,5	7,3	0,04	13,7	2,9
Zircon	-	-	0,02	0,3	-	0,7	-	0,2	0,4	0,3	-	-	0,9	0,1	3,7	-	0,5	1,5	0,6	-	-	0,4	4,6
Produits d'altération	13,1	17,6	5,4	12,8	11,7	21,2	10,5	12,4	7,9	8,2	7,6	6,2	19,6	7,3	11,9	10,1	8,1	4,9	5,7	7,5	1,3	10,0	2,8
Rutile	-	-	0,4	-	-	-	0,2	-	0,1	-	-	-	-	0,6	0,4	-	-	-	-	-	-	0,1	4,2
Hématite + magnétite + goethite	1,4	-	-	0,3	-	-	-	0,6	0,8	-	-	-	-	0,2	0,1	0,3	-	-	0,4	-	0,2	0,2	5,5
Pyrite	-	-	0,03	0,5	1,9	-	0,6	-	-	4,0	-	-	-	0,2	-	0,6	2,1	2,2	1,9	3,9	0,2	0,9	5,0
Galène	0,3	-	0,04	-	-	3,2	-	-	0,04	-	-	0,8	-	-	-	-	0,4	-	0,1	-	-	0,2	7,5
Uraninite	-	-	0,05	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	7,5
Gersdorffite	0,6	-	0,1	-	-	-	0,3	-	-	-	-	-	-	-	0,7	-	-	-	-	-	-	0,1	6,0
Nickéline	-	-	0,05	-	-	-	9,0	1,7	2,4	-	-	-	2,7	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8	7,1
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Rapport de l'illite (XRD)	0,7	1,6	1,0	1,9	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,8	0,8	2,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,2	
Rapport de la chlorite (XRD)	1,0	1,0	1,0	1,5	0,6	0,9	1,0	1,0	1,0	1,2	0,9	0,7	1,2	1,0	0,7	1,2	0,7	0,9	1,4	0,9	0,9		

*Quantités en pourcentage en poids = fraction de surface déterminée par l'analyse d'image, calculée en pourcentage en poids d'après les densités

Tableau 7 - Quantités des minéraux* dans des échantillons.

Minéraux	B - 1.5			B - 5			B - 8.5			E - 5			H - 1.5			H - 8.5			J - 5			Ave
	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	Sommet	Milieu	Fond	
Silicates**	86,7	85,6	81,5	86,9	86,5	85,7	81,0	81,3	83,5	81,3	82,7	73,6	44,8	52,5	46,7	66,6	68,8	77,9	73,9	70,8	56,2	74,0
Argile et mica	10,6	11,2	14,8	10,4	10,9	9,9	15,4	16,2	13,2	13,8	14,6	22,4	51,2	44,5	42,9	27,5	26,2	17,6	22,8	26,0	42,0	22,1
Zircon	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,5	0,1	2,2	0,01	0,5	0,9	0,4	0,02	0,1	0,3
Produits d'altération	0,5	1,3	1,0	0,7	0,8	0,7	1,8	1,6	0,9	2,0	1,2	1,6	2,3	1,1	6,2	4,0	2,7	1,7	1,0	0,6	0,4	1,6
Rutile	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,3	0,7	0,5	0,6	0,7	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3
Hématite + magnétite + ilménite + goéthite	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,6	0,2
Pyrite***	0,2	0,2	0,2	0,3	0,7	0,2	0,3	0,1	0,3	1,4	0,3	0,2	0,1	0,3	0,1	0,6	1,3	1,3	1,1	2,1	0,2	0,6
Galène	0,5	0,2	0,2	0,8	0,3	0,8	0,7	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,4	0,3
Uraninite	0,5	0,01	0,7	0,3	0,03	0,8	11,1	0,01	0,3	0,3	0,04	0,02	0,05	0,2	0,1	0,04	-	0,01	0,05	-	-	0,2
Gersdorffite****	0,3	0,04	1,1	0,2	0,4	1,4	0,1	0,01	0,8	0,4	0,3	1,1	0,03	0,3	0,9	0,1	0,01	0,1	0,1	-	-	0,4
Total	100,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

*Quantités en pourcentage en poids = déterminées en combinant des valeurs des tableaux 3 à 6 exprimées en poids de chaque fraction

**Comprend du quartz, des plagioclases, du feldspath potassique, de la chlorite, de la biotite, des amphiboles, des pyroxènes, de la titanite, de la calcite et du gypse.

***Comprend de la sphalérite, de la chalcopryrite, de la millérite, et le produit d'altération du sulfate de Ni.

****Comprend de la rammelsbergite et de la nickéline.

et surnageantes ont été analysées (tableaux 3, 4, 5 et 6), et les données ont été combinées en ensembles de données pour chaque échantillon et exprimées en pourcentage en poids de chaque fraction et sous-fraction (tableau 7). Les résultats ne montrent pas de tendance évidente pour les distributions des minéraux et laissent supposer que les résidus constituent un mélange hétérogène.

Une technique de mise en évidence des anomalies (3) a été utilisée pour évaluer les données sur les quantités des minéraux en produisant des modèles qui montrent des zones d'enrichissement et d'appauvrissement minéraux relatifs. Cette technique permet d'associer la quantité d'un minéral dans un échantillon à la quantité moyenne du minéral dans tous les échantillons ainsi qu'à la quantité de tous les autres minéraux dans l'échantillon. On obtient ainsi un nouveau numéro pour chaque minéral dans chaque fraction. Les valeurs du numéro se rapportant aux échantillons provenant des carottes B-1,5, B-5, B-8,5 E-5, H-1,5, H-8,5 et J-5 ont été reportées sur trois plans qui sont : le sommet, le milieu et le fond, et placées sur des courbes de niveau pour montrer des zones d'enrichissement (en noir) et d'appauvrissement (lignes rayées). On a observé les tendances suivantes :

1. Pour des sous-fractions de précipité en liquide de 3,33, et de +74 μm (fig. 5), les distributions de l'ilménite, des oxydes de Fe, du rutile, de la chalcoppyrite, de la pyrite, de la sphalérite et du zircon sont similaires. Cette similarité laisse supposer que les modes de distribution produits par ces minéraux représentent les distributions des minéraux lourds non altérés de plus de 74 μm dans le lysimètre. Ces résultats montrent que, conformément aux observations minéralogiques, l'altération de la pyrite est insignifiante.
2. Pour les sous-fractions de précipité en liquide de 3,33, de +74 μm , les modes de distribution pour les produits d'altération (types 1-3) sont similaires aux modes de distribution des minéraux lourds non altérés. On s'attendait à cette similarité, car les produits d'altération précipitaient sur des grains de tous les minéraux.
3. Pour des sous-fractions de +74 μm , précipitées dans un liquide de densité 3,33, les distributions de la gersdorffite, de l'uraninite et de la galène sont différentes de celles des minéraux lourds non altérés.
 - a. La plus grande différence est pour la gersdorffite, qui montre un appauvrissement relatif au sommet, au milieu et au fond des carottes à la décharge du lysimètre. De grandes quantités de gersdorffite restent au fond au niveau de l'admission.
 - b. L'uraninite montre également un appauvrissement relatif au milieu et au fond des carottes à la décharge. Une quantité importante de minéraux reste au fond des carottes au niveau de l'admission.
 - c. Un certain appauvrissement relatif de la galène est évident au fond des carottes à la décharge et une quantité importante reste au fond au niveau de l'admission.

Ces distributions laissent supposer que, dans les conditions du lysimètre, la gersdorffite est le minéral le plus réactif et que tout le long du parcours de l'eau, elle est de partiellement à complètement altérée. L'uraninite est le minéral le moins réactif et s'est altérée seulement au milieu et au fond du lysimètre. La galène est le minéral le moins réactif et s'est altérée que là où toute l'eau de lavage a été collectée avant la décharge.

4. Les distributions des minéraux dans les sous-fractions de 12 μm à 74 μm est de +74 μm , surnageant dans un liquide de densité 3,33, ne montrent aucune tendance.
5. Pour la fraction de -12 μm (fig. 6) on a obtenu la même distribution pour des minéraux argileux (illite) à l'aide de l'EDXA que pour l'illite et la chlorite par analyse indépendante par XRD effectuée par la FRO. On peut donc se fier aux deux ensembles d'analyses.
6. Pour la fraction de -12 μm , les minéraux argileux, la chlorite, le quartz, l'orthoclase, le plagioclase et les minéraux mafiques sont épuisés au sommet et au milieu des carottes et se sont accumulés au fond à la décharge. probablement parce qu'ils ont été entraînés depuis la partie supérieure et piégés à la décharge.

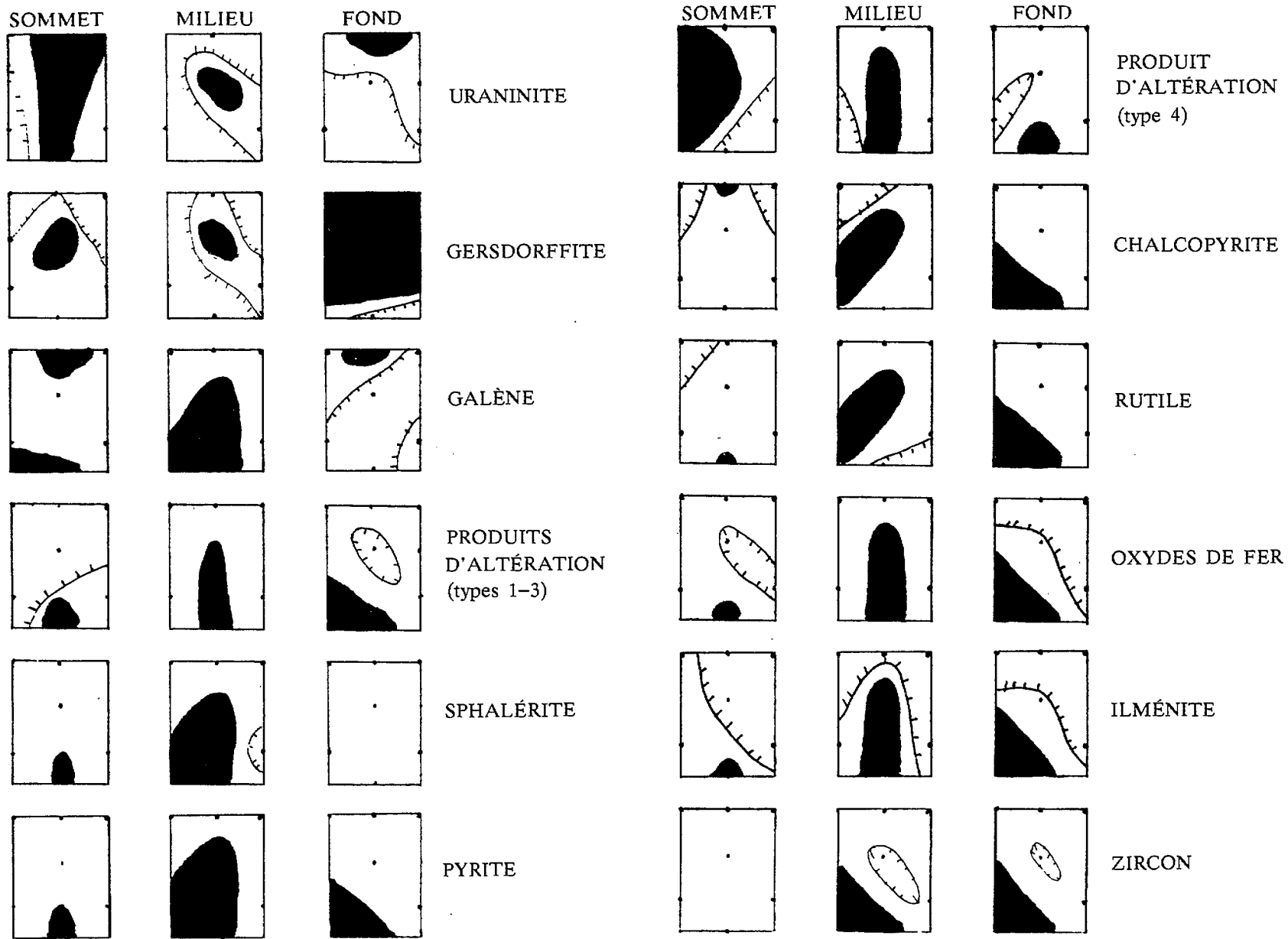


Fig. 5 - Modèles montrant l'enrichissement (noir) et l'appauvrissement (lignes rayées) pour des minéraux dans des sous-fractions de +74 µm précipités dans un liquide de densité 3,33, provenant d'échantillons du sommet, du milieu et du fond du lysimètre.

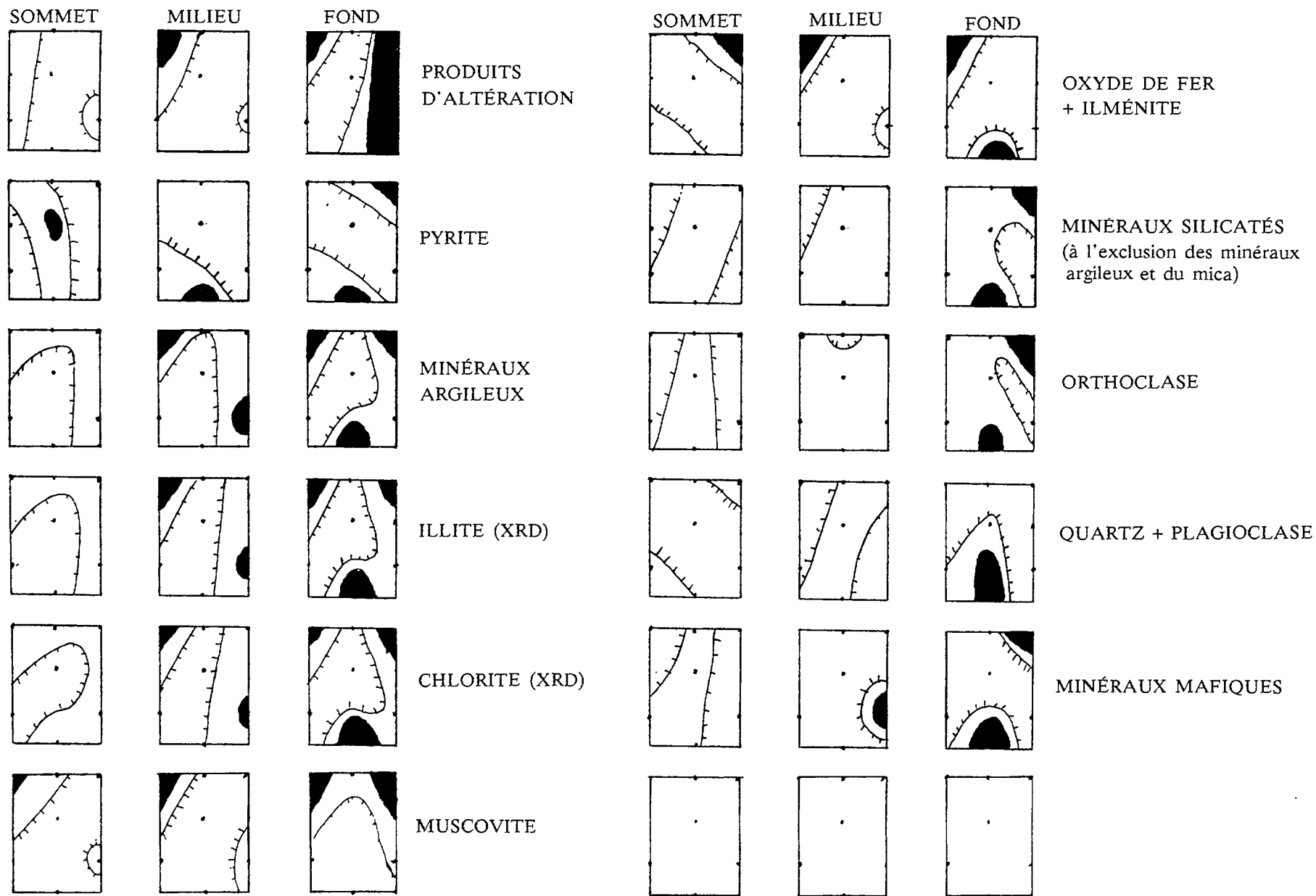


Fig. 6 – Modèles montrant l'enrichissement (noir) et l'appauvrissement (lignes rayées) pour des minéraux des fractions de $-12 \mu\text{m}$ provenant du sommet, du milieu et du fond du lysimètre.

CONCLUSIONS

1. Le tas de résidus à l'intérieur du lysimètre est un mélange hétérogène de minéraux.
2. Les distributions des minéraux lourds non réactifs sont presque identiques. L'écart pour un minéral lourd (gersdorffite, uraninite et galène) par rapport à la distribution observée ci-dessus serait causé par une altération artificielle.
3. Au cours de l'altération artificielle, une partie de la gersdorffite, de l'uraninite et de la galène ainsi que des traces de pyrite ont réagi.
4. Les ions libérés ont précipité sur d'autres minéraux sous forme de revêtements d'arséniates, de sulfoarséniates, de sulfates et d'oxydes de Ni, d'U, de Pb et de Fe.
5. Des cristaux verts de sulfate de Ni et des cristaux blancs de sulfate de Ca ont précipité à la surface du matériau dans le lysimètre.
6. La réactivité minérale, dans les conditions du lysimètre, s'est faite dans l'ordre suivant : gersdorffite, uraninite, galène et pyrite.
7. La réactivité des minéraux est évidente à la partie supérieure du lysimètre, mais elle est la plus intense à la décharge au fond parce que la circulation de l'eau y est la plus élevée.
8. La quantité totale de gersdorffite et d'uraninite à la décharge a réagi, mais la majeure partie de la pyrite n'a pas réagi.
9. Des minéraux argileux et de la chlorite ont été entraînés de la partie supérieure du lysimètre vers la décharge.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier G.M. Ritcey et B. Chomyn, co-animateurs du projet des résidus d'uranium, pour l'aide qu'ils ont apporté dans la définition de l'étude et l'approvisionnement en échantillons. Nous remercions aussi V.I. Lakshmanan pour avoir mené les essais d'altération et avoir pris des dispositions pour a) la collecte et la préparation des échantillons, b) l'analyse par XRD, c) l'analyse spectrographique, et d) d'autres essais liés au projet. Les auteurs remercient enfin K. Haque pour avoir fourni du matériau lessivé non altéré, et Y. Bourgoïn pour avoir effectué les séparations en solution lourde et préparé des sections polies des échantillons.

BIBLIOGRAPHIE

1. Lakshamanan, V.I. "Long Term Monitoring of High Grade Uranium Mill Tailings"; DSS File No. 155223440-3-9140; Fondation de recherches de l'Ontario; rapport final PP-MPHM-84-12, 1985.
2. Petruk, W. "The MP-SEM-IPS Image Analysis System"; rapport 87-IE; CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, 1987.
3. Petruk, W. et Schnarr, J.R. "The Behaviour of Minerals During Flotation of a Base-Metal Ore from the Brunswick No. 12 Deposit in Canada"; in ICAM '81; édité par J.P.R. Devilliers et P.A. Cawthron; Geol. Soc. S. Africa, Spec. Pub. 7; pp 201-208.

