



Projet minier Matawinie de Nouveau Monde Graphite
Saint-Michel-des-Saints (Québec, Canada)

ANALYSE DES RISQUES POUR L'ENVIRONNEMENT, LES EAUX DE SURFACE ET LES EAUX SOUTERRAINES

Pour MiningWatch Canada

Dr. Philippe Marion

Ingénieur et professeur émérite de l'École Nationale Supérieure de Géologie & Laboratoire GéoRessources
Université de Lorraine, France

Janvier 2020



TABLE DES MATIÈRES

	RÉSUMÉ	5
1	PRÉAMBULE	7
2	INTRODUCTION	7
3	CONTRIBUTION CRITIQUE APRÈS LECTURE DU PROJET	7
3.1	CONTEXTE CLIMATIQUE	7
3.2	GÉOLOGIE	8
3.2.1	FACIÈS ROCHEUX RENCONTRÉS	8
3.2.1.1	ROCHES DU SOCLE MÉTAMORPHIQUE	8
3.2.1.2	TERRAINS DE RECOUVREMENT, « MORTS TERRAINS »	9
3.2.1.3	SÉDIMENTS DES LACS ET RIVIERES	9
3.2.2	GÉOLOGIE STRUCTURALE	9
3.3	MINÉRALOGIE DE LA ZONE MINÉRALISÉE: LES SULFURES	9
3.4	ÉCHANTILLONNAGE	10
3.4.1	TYPES D'ÉCHANTILLONS	10
3.4.2	ESTIMATION DES PORTEURS DE SOUFRE	10
3.5	HYDROGÉOLOGIE et HYDROGÉOCHIMIE	10
3.5.1	CIRCULATIONS SOUTERRAINES	10
3.5.2	OXYDATION DES SULFURES, AUTO-ÉCHAUFFEMENT ET POTENTIEL DE DRAINAGE MINIER	11
3.5.2.1	RAPPELS : LES SULFURES : SOURCE DU PHÉNOMÈNE	11

3.5.2.1.1	LA PYRRHOTITE.....	11
3.5.2.1.2	COMPARAISON AVEC LA RÉACTIVITÉ DE LA PYRITE	11
3.5.2.2	AUTO-ÉCHAUFFEMENT	11
3.5.2.3	ATTAQUE SULFATIQUE DES BÉTONS	12
3.5.2.4	POTENTIEL DE DRAINAGE ISSU DES ROCHES STÉRILES, LE MINÉRAI ET LES RÉSIDUS	12
3.5.2.4.1	DES MÉTHODES DIFFÉRENTES ET COMPLÉMENTAIRES	12
3.5.2.4.2	POSSIBILITÉ DE DRAINAGE NEUTRE CONTAMINÉ	12
3.5.2.4.3	PRÉSENCE DE SULFATE	13
3.5.2.4.4	DES MÉTAUX DANS LES EAUX	13
3.5.3	TESTS DE LIXIVIATION	13
3.6	TRAITEMENT DU MINÉRAI	13
3.6.1	RÉACTIFS : CONCENTRATIONS RÉSIDUELLES ET RECYCLAGE	13
3.6.2	QUALITÉ DU RÉSIDU DÉSULFURÉ	14
3.6.2.1	LA SÉPARATION MAGNÉTIQUE	14
3.6.3	QUALITÉ DU CONCENTRÉ DE GRAPHITE	14
3.7	INFRASTRUCTURES et STOCKAGE DES STÉRILES ET RÉSIDUS	15
3.7.1	INFRASTRUCTURES EN BÉTON : ATTAQUE SULFATIQUE	15
3.7.2	STOCKAGE TEMPORAIRE MINÉRAIS ET RÉSIDUS	15
3.7.3	STOCKAGES DÉFINITIFS	15
3.7.3.1	REMARQUES PRÉLIMINAIRES	15
3.7.3.1.1	ÉPAISSISSEMENT DES RÉSIDUS	15
3.7.3.1.2	INCLUSION DE STÉRILES DANS LES STOCKAGES DE RÉSIDUS	15
3.7.3.2	HALDE DE CO-DÉPOSITION	16

3.7.3.3	CO-DÉPOSITION EN FOSSE	17
3.7.3.4	SATURATION DES SÉTRILES ET RÉSIDUS	17
3.7.3.5	TEMPS DE LATENCE : HALDE ET FOSSE	17
3.7.3.6	ENNOYAGE DE FOSSE DONT LA SECTION NORD (LAC)	17
3.7.4	DES TRAITEMENTS POSSIBLES POUR LE RÉSIDU PAG ?	18
3.8	STABILITÉ GÉOTECHNIQUE	19
3.9	MODIFICATIONS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES HYDRO-SYSTÈMES	19
3.9.1	CIRCULATIONS SOUTERRAINES	19
3.9.1.1	MODÉLISATION	19
3.9.1.2	CIRCULATIONS SOUTERRAINES SUITE À L'EXPLOITATION, RABATTEMENT	19
3.9.2	REJET EN RIVIÈRE	20
3.10	INSTALLATIONS DE DÉMONSTRATION	20
3.10.1	USINE DE TRAITEMENT DU MINÉRAI	20
3.10.2	CELLULE DE CO-DÉPOSITION	20
3.11	MODIFICATIONS DU PROJET	20
3.12	COMPARAISONS AVEC D'AUTRES EXPLOITATIONS	21
3.13	CONTEXTE INTERNATIONAL	21
4	CONCLUSION	21
5	ANNEXE 1: LES RÉACTIONS D'ALTÉRATION DES SULFURES	22
5.1	PYRROTHITE	22
5.2	PYRITE	22
6	ANNEXE 2: RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	22

À la demande de MiningWatch Canada, j'ai analysé certains des principaux risques de contamination des eaux de surface et des eaux souterraines pour le projet minier Matawinie de Nouveau Monde Graphite (NMG), à Saint-Michel-des-Saints (Québec). Cette analyse s'appuie sur l'ensemble des documents disponibles en lien avec l'étude d'impact sur l'environnement et le milieu sociale (ÉIES)¹ du promoteur. Elle a été réalisée volontairement, sans aucune rémunération, et au meilleur de mes connaissances, en tant qu'ingénieur, docteur et professeur retraité émérite de plus de 30 ans d'expérience auprès de l'École Nationale Supérieure de Géologie & Laboratoire GéoRessources de l'Université de Lorraine, en France. La documentation scientifique a également été consultée.

Voici mes principaux constats, préoccupations et recommandations:

1.

Risques de contamination des eaux souterraines (géologie, hydrogéologie, hydrogéochimie).

Aucune des représentations géologiques figurant dans le rapport ne fait figurer les « accidents » structuraux : failles, contacts anormaux chevauchants. Les contacts entre les différentes unités lithologiques ne sont pas décrits. Toute discontinuité géologique peut constituer un drain préférentiel pour les mouvements de fluides souterrains. Ces discontinuités ne sont prises en compte ni dans les modèles d'écoulement souterrain ni dans les modèles de stabilité mécanique. Il me semble, en particulier, que la modélisation des circulations d'eaux dans un milieu dont on connaît mal la structuration (fractures, failles, hétérogénéités lithologiques), hormis peut-être par sondages, doit prendre en compte des paramètres hydrodynamiques les plus réalistes possibles. À cet égard, (1) la distinction binaire « roc fracturé » et « roc profond » me semble donc simpliste et (2) les particularités de la zone minéralisée (et donc de conductivité hydraulique plus élevée) dite « Far Ouest » n'est pas prise en compte dans les modèles hydrogéologiques d'écoulement et de transport de métaux en traces vers le nord-ouest, soit donc vers la rivière Matawin, laquelle se jette dans le Lac Taureau.

2.

Contaminants non considérés, non comptabilisés (minéralogie de la zone minéralisée).

La pyrrhotite et, de manière plus discrète, la pyrite, sont les deux sulfures dominants. Il est bien mentionné, dans les tableaux d'analyse QUEMSCAN du faciès paragneiss graphitique, « other sulphides », sans plus de précision. Ces minéraux sont en traces, mais au vu de la masse de résidu sulfuré susceptible d'être produite, ils peuvent représenter presque 38 000 tonnes en fin d'exploitation, qui se reporteront en grande partie dans le résidu PAG. Ces sulfures sont susceptibles de porter une grande partie des éléments molybdène, nickel, zinc, plomb, cuivre, arsenic et cadmium, sachant qu'arsenic et nickel peuvent aussi se trouver dans les deux sulfures majeurs.

3.

Représentativité des échantillons testés en laboratoire (sources et méthodes d'échantillonnage).

Tout indique que le promoteur a utilisé principalement – voire seulement – des carottes de forages pour constituer les composites d'échantillons destinés aux divers tests géochimiques en laboratoire. Il importe donc de s'interroger sur les extrapolations des résultats de caractérisation et de comportement géochimique des contaminants pouvant s'écouler des résidus et des stériles miniers. En effet, il y a une différence de granularité des produits soumis à test en fonction du type de prélèvement. Notamment, l'abatage à l'explosif génère des fines dont la distribution granulométrique n'est pas la même que si on concasse des demi-carottes au laboratoire. Par ailleurs, des explications devraient être données sur l'origine des 40 000 t qui sont destinés à alimenter l'usine de démonstration, et le cas échéant, la proportion de ce volume, et la méthodologie d'échantillonnage, ayant servi aux tests de laboratoire.

4.

Manque de données cruciales pour empêcher la réactivité chimique des minéraux contaminants et pour contenir les substances dissoutes qui en résultent (oxydation des sulfures, auto-échauffement, drainage minier acide).

Les vitesses de réactions rapportées dans la littérature privilégient très nettement l'oxydation chimique de la pyrrhotite par rapport à celle de la pyrite (de 20 à 100 plus rapide). Quelle conclusion peut-on tirer de l'incidence de cette constatation sur la fiabilité du processus de co-déposition pour empêcher la production d'acide ? Tant que la halde de co-déposition de démonstration ne sera pas opérationnelle, on manquera de données essentielles à ce sujet. Pour le moment, les seules disponibles sont acquises au laboratoire, en colonnes ou cellules. Aucune extrapolation réaliste à long terme n'est disponible. L'accès d'oxygène aux couches de résidus générateurs d'acidité est vraiment un point crucial.

¹ telle que présentée sur le registre public du ministère de l'Environnement et de la Lutte aux Changements climatiques du Québec, en date du 20 janvier 2020 http://www.ree.environnement.gouv.qc.ca/projet.asp?no_dossier=3211-16-019

4.

Suite de manque de données cruciales

À la précision analytique près, il y a certainement du soufre *sulfate* dans tous les échantillons analysés jusqu'à présent: ceci semble témoigner d'une altération des sulfures des échantillons prélevés, soit à cause de leur proximité de la surface et/ou d'une zone de circulation d'eau. Ce point est relié à celui des limites actuelles de l'échantillonnage et aussi aux interprétations que l'on peut faire sur les difficultés rencontrées récemment pour la séparation magnétique dans l'usine de démonstration. Il faut beaucoup mieux caractériser ce phénomène et les risques associés.

Les risques à l'auto-échauffement des résidus miniers (réactions chimiques exothermiques) demeurent également, à mon avis, une des questions principales qui doit être résolue. L'aléa est connu et quantifié mais les risques et les moyens de mitigation, beaucoup moins. Les enjeux sont multiples, allant de la foration à la stabilité géotechnique des ouvrages de confinement (risques d'affaissement) à la qualité de l'air (déplétion d'oxygène et risques à la sécurité des travailleurs), et la qualité des eaux souterraines (risques de contamination), entre autres. Par ailleurs, le lien qu'il y a entre l'auto-échauffement et le drainage minier acide (DMA) produit potentiellement par les résidus sulfurés PGA n'est pas explicité. En effet, les réactions d'oxydation de la pyrrhotite et de la pyrite (productrices de DMA) sont exothermiques (productrices d'échauffement). Quant au minerai (et les stériles), qu'en est-il de leur potentiel d'auto-échauffement ? Dans quelle mesure le graphite contenu dans le minerai et les résidus PGA peut-il contribuer à l'auto-ignition? Il ne faut pas oublier que des fines sont générées lors de l'abatage (dynamitages) et que, si toutefois la roche massive ne doit pas présenter a priori de problèmes, la présence de lits riches en sulfures et graphite est, elle, par contre, très réelle.

5.

Méthode de stockage des résidus et des stériles miniers non éprouvée

Il n'y en fait que très peu de références dans la littérature scientifique, au sujet des entreposages de « co-disposition » tels que proposés par le promoteur. De plus, il n'y a pas vraiment d'expérience-terrain connue, déterminante, éprouvée sur le moyen terme, pour un tel stockage avec alternance de couches de stériles potentiellement générateur d'acide (PGA) et d'alternances de résidus épaissis PGA et non générateur d'acide (NGA). Par ailleurs, l'absence, pour le moment, de halde de co-déposition de démonstration, mise en place avec des résidus et stériles représentatifs, empêche toute projection. Ce qui semble faisable et généralement positif au niveau géotechnique (sauf pour les questions de géologie de détail et de tassement soulevées ci-dessus et aussi d'érosion en cas de changement du régime des précipitations) n'est démontré au niveau ni de la géochimie ni des risques réels d'oxydation et de mobilisation des contaminants, si ce n'est par la modélisation.

Concernant la co-déposition en fosse, il est clair qu'aucune démonstration ne peut être effectuée à l'avance. Ma principale remarque au sujet du schéma proposé est que les parements rocheux de la fosse ne sont pas isolés des stériles et donc des infiltrations d'eau (et d'oxygène tant que la nappe ne sera pas remontée dans la fosse) sont possibles y compris depuis la surface (tant que la géomembrane ne sera pas posée), ce qui peut donc favoriser l'oxydation et la mobilisation de contaminants.

L'analyse de sensibilité qui est présentée en Qc-94 (p. 219) évoque clairement une possibilité d'effet capillaire non maintenu dans les résidus Potentiellement Générateurs d'Acides (PGA) liée à la variation de la conductivité hydraulique saturée des stériles situés en-dessous. Parmi les options présentées pour y remédier on trouve la compaction des stériles, leur tri granulométrique, la modification de leur épaisseur. Bien sûr, les expérimentations de terrain doivent guider la conception à choisir mais le risque est réel que la variabilité du stérile (voire également du résidu PGA) mette en défaut toute adaptation valide en cours d'exploitation. Il ne faut pas sous-estimer la difficulté que peut représenter l'atteinte de ces objectifs lors des opérations. C'est un risque très important.

Il est également étonnant que le dossier présenté par NMG ne mentionne pas du tout les expériences accumulées lors de l'exploitation d'un minerai qui ressemble beaucoup géologiquement parlant à celui du projet, celui de Lac-des-Îles (dans le Vol-2 ann. 2-1 page 61 il est écrit que Lac-des-Îles « is an archetypal example of this type of deposit »). D'autant que le directeur de la mine de graphite d'Imerys à Lac-des-Îles a, semble-t-il, rejoint NMG. Quelle est, en particulier, la gestion des résidus et des stériles sulfurés de cette mine ? Quels types de contamination des eaux de surface ou des souterraines sont survenues à cette mine ? Quels types de suivi est fait à cette mine sur ces enjeux par le promoteur, les ministères ? Quelles les données existent ? Quels retours d'expérience depuis son ouverture ?

6.

Marché incertain, risques financiers et risques environnementaux

L'incertitude du marché international du graphite à court et moyen termes, de même que l'évolution rapide de certaines technologies de piles sans graphite qui pourraient affecter la rentabilité du projet soulèvent des préoccupations financières liées aux risques environnementaux : que se passera-t-il si, à cause de problèmes de marché du graphite, la mine est arrêtée en cours de production après le démarrage de Matawinie ? Le retour d'expérience attendu sur le stockage des résidus, en particulier, ne sera probablement pas suffisant pour gérer un arrêt de manière convenable pour l'environnement, sans compter les questions financières afférentes à ce genre de problème. Le texte PR5.5, §8.0 « Mesures en cas d'arrêt temporaire des activités » donne quelques réponses, complétées par la partie §9.0 « Plan d'urgence ». Ces réponses sont conventionnelles et non détaillées, il faut bien le remarquer. Par ailleurs, tel que souligné plus haut, il est certain que les résultats nécessaires à la validation du concept de halde de co-déposition ne seront pas obtenus dans des délais courts, ce qui retardera sans aucun doute la mise en œuvre commerciale du projet.

À la demande de MiningWatch Canada, j'ai analysé certains des principaux risques de contamination des eaux de surface et des eaux souterraines pour le projet minier Matawinie de Nouveau Monde Graphite (NMG), à Saint-Michel-des-Saints (Québec).

Cette analyse, qui s'appuie sur l'ensemble des documents disponibles en lien avec l'étude d'impact sur l'environnement et le milieu social (ÉIES) du promoteur², a été réalisée volontairement, sans aucune rémunération, et au meilleur de mes connaissances, en tant qu'ingénieur, docteur et professeur retraité émérite de plus de 30 ans de carrière auprès de l'École Nationale Supérieure de Géologie & Laboratoire GéoRessources de l'Université de Lorraine et du CNRS, en France. La documentation scientifique a également été consultée.

Bien que le présent rapport reflète également la teneur de conversations tenues avec d'autres experts et d'anciens collègues universitaires – associés à mon laboratoire de recherche ou non – son contenu n'engage que ma responsabilité. Je sollicite par avance la clémence des lecteurs des lignes qui suivent si quelques-unes de mes questions ont déjà des réponses écrites qui auraient pu m'échapper dans ce dossier.

2 INTRODUCTION

Le projet NMG concerne donc une possible ouverture de mine pour produire du graphite (« cristalline flake graphite ») au Québec. C'est un projet minier de taille moyenne mais un gros projet pour la substance graphite (100 000 t de graphite/an pour 59,8Mt de minerai et 9000t de minerai par jour) et il sera souligné plus loin que c'est le possible relais d'une production minière de graphite en cours (Lac des Îles, 25 000 t de graphite/an, fin en 2021 ?) par un autre opérateur, la seule actuelle au Canada et en Amérique du Nord.

Plusieurs aspects du projet ont des points communs avec d'autres projets et ne sont pas spécialement innovants. Par contre, le projet comporte plusieurs nouveautés qu'il importe de souligner et qui, bien entendu, sont plus susceptibles de faire débat, au sens où les innovations proposées n'ont pas d'équivalent et ne peuvent pas ou très peu profiter de retours d'expérience de la part de mines en cours d'activité.

Ces nouveautés concernent en particulier la prévision d'une mine « tout électrique » et la gestion des stériles d'exploitation et résidus de traitement, dont il est prévu le stockage sous la forme de halde et de remplissage de fosse par co-déposition et compactage, précédé par une séparation par flottation (en fin de procédé de valorisation du graphite) de résidus sulfureux –donc potentiellement générateurs d'acidité, dits « PAG »– et de résidus désulfurés –potentiellement non générateurs d'acidité, dits « NAG »-. L'avantage du nouveau mode de « co-gestion » des stériles et résidus est qu'il évite la construction de digues générées par cyclonage ou « spigotage », mode de dépôt présentant des aléas géotechniques importants, attestés par des incidents ou même des accidents majeurs (plusieurs par an dans le monde, y compris pour des mines appartenant à des groupes internationaux).

² telle que présentée sur le registre public du ministère de l'Environnement et de la Lutte aux Changements climatiques du Québec, en date du 20 janvier 2020 http://www.ree.environnement.gouv.qc.ca/projet.asp?no_dossier=3211-16-019

3.1 Contexte climatique

Précipitations modérées sans saison sèche ou humide. Température supérieure au point de congélation 270 jours/an (Avis de projet, 8.1, page 23). Sans développer plus ce point, il est utile de souligner (ce qui a été fait dans le dossier, par ex. en QC 73) que les modifications locales de température et de précipitation induites par les changements climatiques en cours sont difficiles à prédire. « Les changements climatiques vont se refléter principalement par l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de précipitations extrêmes pour l'ensemble des régions minières du Québec, tout comme les précipitations moyennes annuelles » (PR5.5 p. 115)

Ceci invite à une grande prudence dans les raisonnements, en particulier lorsqu'il sera question plus loin de stabilité des haldes ou de débits de rejet des eaux issues de la mine.

Cette prudence est manifeste dans des publications concernant la réhabilitation de sites miniers : par exemple, les conclusions de G. Hotton et al. [1] de l'IRME de l'UQAT sont les suivantes : « No major impact on the performance of the cover system was found. It is important to note that the climate change scenario tested here is idealized and simplified. As next steps, climate projections will be defined by global climate models and will be used to obtain more realistic climate conditions, adapted to the Lorraine mine site. Extreme boundary conditions will be proposed by the development of a drought index, leading to the assessment of the CCBE performance according to these new parameters ».

On peut se demander si cette région très sensible n'est-elle pas incompatible avec une mine à ciel ouvert de cette dimension : je n'ai pas d'avis définitif sur la question. D'autant que, ne connaissant pas la région, je n'ai pas pu me rendre compte de sa sensibilité.

Il est vrai que bien des incertitudes demeurent quant au contenu technique du projet. Il doit évoluer, mais les questions climatiques nous renvoient à d'autres incertitudes, non technologiques, quand à la pertinence des données actuelles, la prévision des événements climatiques et les scénarios du futur. Sur un projet de cette taille et avec les défis qui concernent la stabilisation des sulfures à pyrrhotite dominante, on ne peut absolument pas faire d'erreur de prévision.

Il appartient donc aux autorités compétentes de juger le projet au regard de la présentation claire des incertitudes qui lui sont liées. Il y a, dans les documents présentés, plusieurs analyses de sensibilité bien rédigées. Il importe donc, au minimum, de regrouper et synthétiser ces travaux pour en faire un chapitre à part entière.

3.2 Géologie

3.2.1 FACIÈS ROCHEUX RENCONTRÉS

3.2.1.1 ROCHES DU SOCLE MÉTAMORPHIQUE

Selon 5.3.3 vol 1 EIES page 5.19, il y a présence dans la zone de roches felsiques et mafiques, intrusives et métamorphiques.

La roche porteuse de graphite est un paragneiss à grenat, mica et graphite, roche la plus abondante dans la région: quartz, plagioclase, feldspaths K, biotite ; mineurs graphite (moins de 1% en général sauf zones particulières dont l'anomalie conductrice circulaire autour du lac aux Pierres), grenat, sillimanite, cordierite, sulfures, pyroxènes, muscovite, magnétite ; accessoires apatite, zircon, monazite. On ne peut donc pas attendre de réactivité neutralisante (réactivité faible des feldspaths plagioclases et de l'apatite) de la part de cette roche, malgré la présence signalée de petits niveaux calco-silicatés en son sein.

Les roches « mafiques » (métagabbro) ont une aptitude un peu plus élevée à la neutralisation, compte tenu de la présence, en particulier, de minéraux calciques, mais le caractère massif ou simplement réduit granulométriquement par les explosifs ne donne en général pas une grande surface exposée (sauf les fines générées par l'exploitation).

Les faciès rencontrés lors de l'exploitation de la fosse sont imagés dans la figure suivante (Vol-3-ann-C-app-A-page pdf327) :

Une autre coupe obtenue à partir de forages doit aussi être montrée (détail de la page 292-vol. 1-geol-locale-carte-5-3):

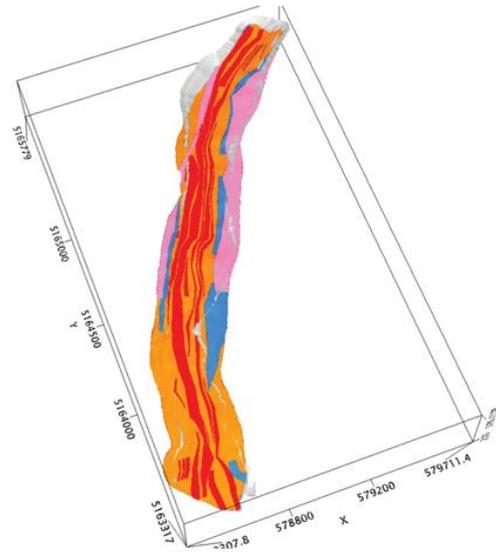


FIGURE 1 : LITHOLOGIES RENCONTRÉES DANS LA FOSSE PRÉVUE.

Rouge : paragneiss graphitique, orangé : paragneiss mixte, rose : charnockite, bleu : paragneiss à biotite, gris : recouvrement (sol et sédiments glaciaires). Note : un métagabbro est aussi présent au sud de la fosse

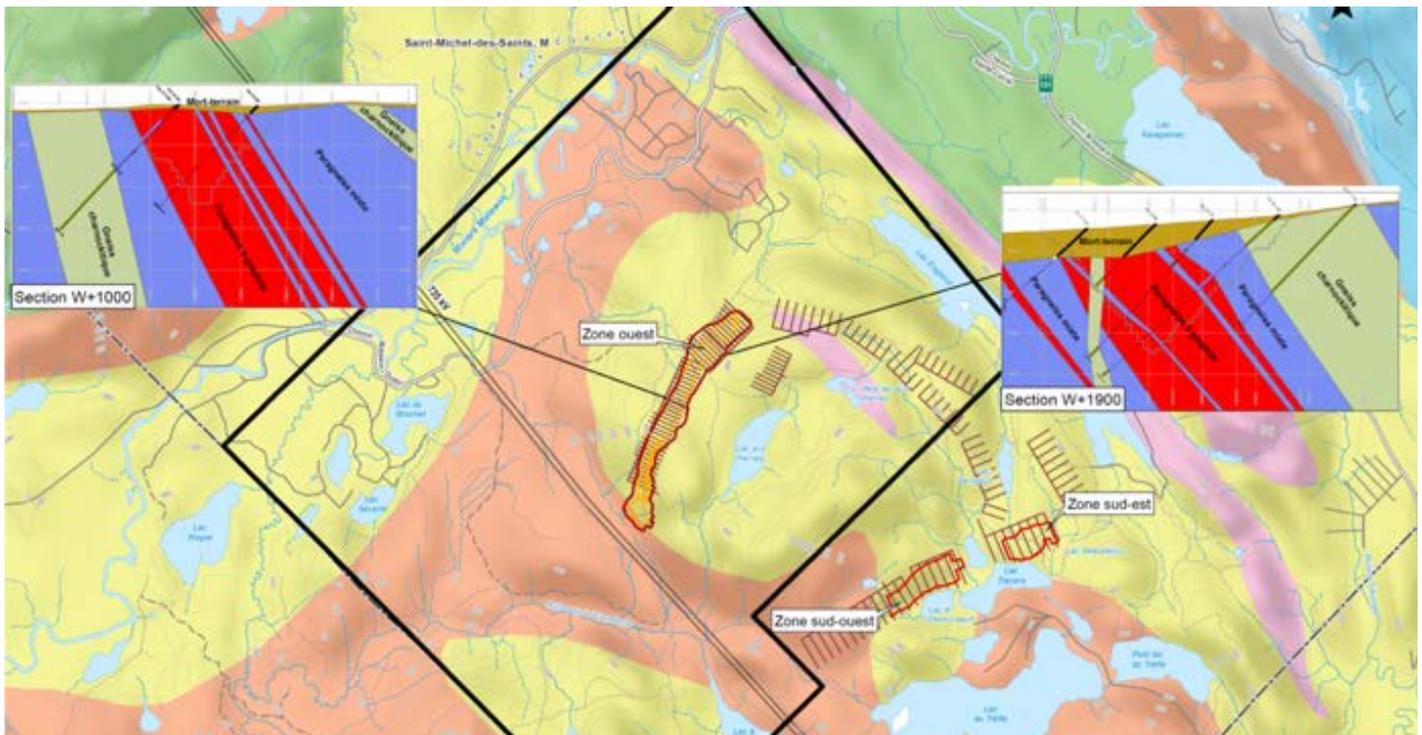


FIGURE 2 : GÉOLOGIE LOCALE AUTOUR DE LA FOSSE PRÉVUE ET DEUX COUPES RÉALISÉES À PARTIR DE SONDRAGES. Pour les deux rectangles : Rouge : paragneiss graphitique, bleu : paragneiss mixte, vert : gneiss charnockitique, marron : recouvrement « mort terrain ». Pour le reste de la carte : série de Grenville : jaune : paragneiss à sillimanite-grenat, rose : amphibolite, vert : granulite, gris : calcaire cristallin, marbre ; série de Morin : orange : monzonite

Il est à noter aussi sur la figure 2 la présence de calcaire cristallin-marbre, représentés en particulier au nord est, derrière le lac Kalagamac au NE : on peut se demander s'il y a des exploitations de ces roches, qui, le cas échéant, pourraient servir (ou leurs résidus d'exploitation/traitement -fines ?-) comme adjuvant anti-acidité dans l'ingénierie du dépôt de résidus et stériles.

Nota : A la mine de graphite de Lac des Iles, il y a présence de marbres qui sont utilisés pour la stabilisation des résidus (source : Imerys)

3.2.1.2 TERRAINS DE RECOUVREMENT, « MORTS TERRAINS »

Il serait nécessaire d'avoir une carte des terrains destinés à être décapés avec leurs épaisseurs. En effet, l'interprétation géologique (voir paragraphe « géologie structurale ») pourrait en être améliorée.

3.2.1.3 SÉDIMENTS DES LACS ET RIVIERES

Il est écrit, en 5.3.10 vol 1 EIES page 5.77 « Les résultats de cette caractérisation initiale indiquent que, dans l'ensemble, les sédiments des lacs dans ce secteur sont de bonne qualité. Toutefois, quelques dépassements des critères de qualité ont été observés pour cinq métaux : l'arsenic, le cadmium, le mercure, le plomb et le zinc. La plupart des dépassements concernent la concentration d'effets rares (CER) et la concentration seuil produisant un effet (CSE), mais quatre concernent la concentration d'effets occasionnels (CEO). Les dépassements de la CEO concernent le cadmium, le plomb et le zinc à l'une des stations du lac aux Pierres, ainsi que le plomb au lac England. ». Cadmium et Plomb ne font pas vraiment partie du cortège géochimique fourni par les paragneiss. Sont-ils d'origine anthropique ? Naturelle filonienne ? Quelles hypothèses privilégier ? La présence de dépassement des normes pour le plomb dans les eaux de deux lacs (Avis de projet, 8.1.8&9, page 26) pourrait être en lien avec la qualité des sédiments.

Il semble aussi qu'une analyse systématique des sédiments des rivières devrait être menée, comme on le fait en géochimie de prospection. Cela permettrait peut-être de rendre compte d'anomalies naturelles en roche, susceptibles donc d'être rencontrées lors de l'exploitation.

3.2.2 GÉOLOGIE STRUCTURALE

Sur la figure 2, on voit très nettement que le gneiss charnockitique (appelé aussi charnockite dans d'autres sections du rapport) est sécant (ce sont des intrusions granitiques métamorphisées) par rapport aux autres formations globalement disposées en bandes parallèles les unes par rapport aux autres, bien mises en évidence dans la figure précédente qui montre la géologie de détail de la fosse.

Ces constatations autorisent la formulation d'une question qui me paraît majeure : aucune des représentations géologiques figurant dans le rapport ne fait figurer les « accidents » structuraux : failles, contacts anormaux chevauchants. Il est admissible qu'il soit difficile d'accéder à ces informations, principalement à cause du recouvrement glaciaire, mais cela doit au moins être signalé car il y a là une source d'incertitude majeure au moins pour la stabilité des terrains de la fosse et la circulation des eaux souterraines.

Pour aller plus loin, on peut considérer qu'une étude géophysique pré-exploitation (méthode à définir !) et après décapage des morts terrains (qui sont un « masque » pour l'interprétation géophysique) semble nécessaire pour rendre compte autant que possible de cette géologie structurale.

Au moment où j'écris ces lignes, je ne sais pas s'il sera possible de donner des prévisions fiables en matière de géologie structurale. Il faut bien simplifier pour faire des modèles, c'est sûr. Mais il me semble que la modélisation des circulations d'eaux dans un milieu dont on connaît mal la structuration (fractures, failles, hétérogénéités lithologiques), hormis peut-être par sondages (mais cela n'apparaît pas dans les documents), doit être très prudente et donc prendre en compte des paramètres hydrodynamiques les plus réalistes possibles. A cet égard, la distinction binaire "roc fracturé" (le roc proche de la limite avec les sables de recouvrement, altéré et dont les fractures sont ouvertes) et "roc profond" ou "roc sain" me semble simpliste.

3.3 Minéralogie de la zone minéralisée : les sulfures

La minéralisation en graphite est souvent accompagnée de sulfures (Vol-2 ann. 2-1 page 60) et une bonne corrélation existe, dans les sondages, entre les zones riches en graphite et l'anomalie magnétique (liée à la pyrrhotite).

La pyrrhotite et, de manière plus discrète, la pyrite, sont les deux sulfures dominants. Il est bien mentionné, dans les tableaux d'analyse QUEMSCAN du faciès paragneiss graphitique, « other sulphides », sans plus de précision. Pour plus de précision, selon le tableau présenté pour le résidu sulfuré du traitement du minerai (référence MI5023-MAR18), on a :

Pyrrhotite	39,5% (massique)
Pyrite	4,9%
Autres sulfures	0,3%

Ceci fait, bien sûr de ces « autres sulfures », des minéraux en traces, mais qui, au vu de la masse de résidu sulfuré susceptible d'être produite (12 570 kt, vol.1 page 209, tab. 4-20), peuvent représenter presque 38 000 tonnes.

Il serait nécessaire alors d'avoir une étude aux microscopes optique et électronique à balayage afin de connaître la nature et les associations texturales de ces sulfures (Molybdène, Nickel, Zinc, Plomb, Cuivre, Arsenic pourraient être de bons éléments candidats pour s'allier au soufre, au vu de l'analyse élémentaire du résidu sulfuré fournie par SGS sous la référence 633679-644-D-2-14253, mais aussi le Cadmium -souvent en solution dans le sulfure de zinc-, au vu des tests de lixivabilité, Vol.1 page 216 tab. 4-31). Une fois la nature de ces minéraux connue (mais peut-être l'est-elle déjà?), on pourra tenter de leur associer une réactivité, au vu de la littérature.

Il est à noter que le Nickel, un élément que l'on retrouve dans les études de panache de dispersion du projet, est susceptible d'être présent en traces dans la pyrrhotite. De même, l'Arsenic peut être retrouvé en traces dans la pyrite (ce peut être aussi un peu d'arsénopyrite ou encore d'autres minéraux). Si la pyrrhotite ou la pyrite s'altèrent, alors ces deux éléments seront, au moins partiellement, libérés. On ne trouve pas, à ma connaissance, d'analyse élémentaire (microsonde électronique ou autre méthode) des deux sulfures majeurs dans le projet.

3.4 Échantillonnage

3.4.1 TYPES D'ÉCHANTILLONS

En "Caractérisation géochimique 4.6.1 vol 1 EIES page 4-81 et suivantes" et le tableau 4-27, il nous est expliqué que plusieurs échantillons et composites successifs ont été soumis à caractérisation. Le mode de prélèvement de ces échantillons est rarement donné. Par exemple, en phase 1 et phase 2, de quel type d'échantillon s'agit-il (demi-carottes de sondage?) ? En phase P-DEMO, les 40 000 t sont certainement du vrac (prélevé comment et où?), mais alors quelle est la représentativité des « composites de deux forages » utilisés pour la génération des deux résidus (sulfuré PGA et non sulfuré NGA) testés? En phase P-EXPANSION, il semble s'agir de sondages d'exploration (demi-carottes supposées).

En Vol-2 ann. 2-1 pages 106-108, il semble qu'on ait une réponse partielle à ces questions. En effet, ce paragraphe est dédié à l'étude de la valorisation du minerai et précise : « The metallurgical programs started with initial scoping level flotation tests on grab and trench samples », puis « Two (2) bulk concentrate production pilot plant campaign on 12 tonnes and 50 tonnes of mineralized South Zone and West Zone material, respectively » et « « The West Zone Master composite that was used in the 2017 process optimization program was generated by combining a total of 125 drill core intervals. The drill core intervals were chosen to duplicate the grade profile of the West Zone mineralization and to provide a full spatial representation of the West Zone. Eight (8) variability composites were generated by combining 362 drill hole intervals from different locations within the specific sampling zone. The drill hole intervals were selected to ensure a good spatial distribution and a combined head grade that was representative for the specific zone. »

L'utilisation généralisée de carottes semble bien confirmée. Là encore, je peux être passé à côté de renseignements qui répondent à ces questions, mais on voit bien que des synthèses claires manquent à ce sujet.

Mes questions sont surtout là pour finalement s'interroger sur les résultats de caractérisation/comportement géochimique (voir plus loin). En effet, il doit y avoir une différence de granularité des produits soumis à test en fonction du type de prélèvement. Notamment, l'abatage à l'explosif génère des fines dont la distribution granulométrique n'est pas la même que si on concasse des demi-carottes au laboratoire (et encore, cela dépend des concasseurs utilisés : à mâchoires, giratoire, à cylindres).

3.4.2 ESTIMATION DES PORTEURS DE SOUFRE

En 4.6.1 vol 1 EIES page 4-81, il est écrit « Les proportions de sulfures dans ce matériau (le minerai) sont de l'ordre de 7,13 % de pyrrhotite et de 1,24% de pyrite ». Des calculs simples donnent donc une teneur totale en soufre pour ces deux sulfures de 3,49%. Ce qui va très bien avec la valeur de 3,49% de soufre total citée pour le "West zone master composite" dans le tableau 13.2 du Vol-2 ann. 2-1 page 108.

Mais en Vol-2 ann. 2-1 page 120-12, le tableau 13.7 donne les teneurs en soufre total et en soufre sulfure, ceci pour plusieurs échantillons de minerais. La teneur totale en soufre du Master composite est ici de 3,07%, dont seulement 2,77% de soufre sulfure... Par ailleurs, les mêmes pages commentent «Pyrite ranged from 0.5 % to 2.4 %, pyrrhotite from 7.5 % to 10 %».

Même si on voit bien dans le tableau 13.7 que la teneur totale en soufre sulfure est située entre 2,6 et 3%, il n'en reste pas moins que

- sauf erreur ou manque de précision analytique, il y a du soufre sulfate dans tous les échantillons (question discutée en partie «Drainage minier»).
- les questions liées à l'échantillonnage ne sont pas clairement exposées et synthétisées.

3.4 Hydrogéologie et hydrogéochimie

Le paragraphe dédié plus haut à la géologie structurale pose déjà la question de l'anisotropie du milieu : lithologies variées, discontinuités.

3.5.1 CIRCULATIONS SOUTERRAINES

Toute discontinuité géologique (voir paragraphe « géologie ») peut constituer un drain préférentiel pour les mouvements de fluides souterrains. Ces discontinuités ne sont pas prises en compte dans les modèles d'écoulement.

En particulier, la zone dite « Far Ouest » n'est pas prise en compte dans les modèles hydrogéologiques d'écoulement pour métaux en traces, voir la figure ci-dessous :

Or cette zone est minéralisée (voir Qc 88 p. 206pdf) et est située en aval de l'écoulement vers le nord-ouest. Elle doit avoir déjà et aura donc inévitablement une influence sur la réalité des écoulements souterrains (flux et teneurs), d'autant que les conductivités hydrauliques les plus élevées du roc sain sont celles des zones minéralisées (PR5.5 p.79pdf).

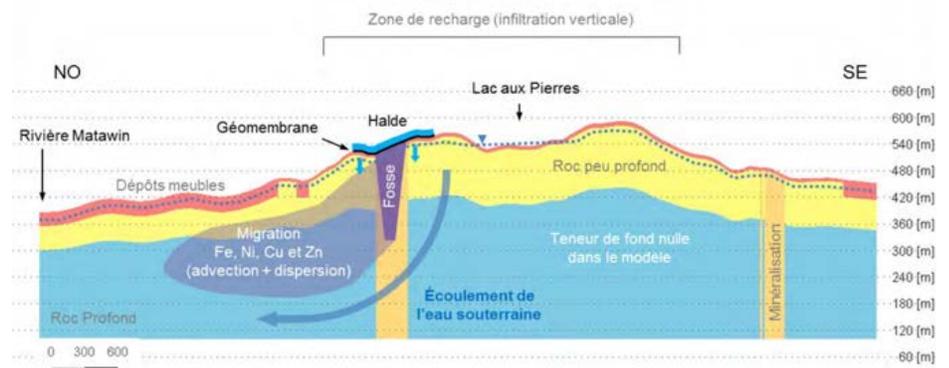


FIGURE 3 : MODÈLE CONCEPTUEL DE TRANSPORT.

Il est visible que la minéralisation « Far ouest » n'est pas prise en compte. Figure 4-1 de l'annexe 7-4 de l'ÉIES

3.5.2 OXYDATION DES SULFURES, AUTO-ÉCHAUFFEMENT ET POTENTIEL DE DRAINAGE MINIER

3.5.2.1 RAPPELS : LES SULFURES : SOURCE DU PHÉNOMÈNE

En 4.6.1 vol 1 EIES page 4-81, il est écrit « Les proportions de sulfures dans ce matériau (le minerai) sont de l'ordre de 7,13 % de pyrrhotite et de 1,24% de pyrite ».

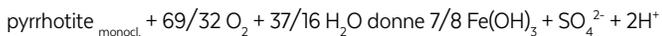
La présence de pyrrhotite majoritaire en proportions importantes, associée à de la pyrite, est un facteur pénalisant la stabilité chimique des stériles et surtout des résidus, qui sont des matériaux fins. D'autant que les minéraux neutralisants sont en quantité mineures dans la plupart des roches et dans les résidus. Les analyses de potentiel d'acidification sont démonstratives en ce sens. Il faut simplement avoir à l'esprit les remarques du paragraphe dédié à l'échantillonnage.

3.5.2.1.1 LA PYRRHOTITE

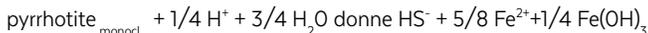
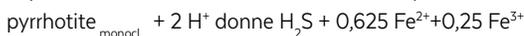
La pyrrhotite monoclinique, très majoritaire dans le gisement, est un sulfure qui a une propriété ferromagnétique (voir les anomalies magnétiques détectées en prospection, qui coïncident avec les anomalies de conductivité du graphite -la pyrrhotite est aussi un semi-conducteur qui contribue à l'anomalie de conductivité-).

Pour Fe_7S_8 ($x=0,125$) on a donc (formule la plus probable) $Fe^II_5Fe^III_2S_8$

La réaction globale à $pH > 2,5$ (précipitation de l'hydroxyde ferrique) est donc la suivante (voir l'annexe 1 pour plus de détails):

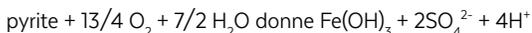


La pyrrhotite peut aussi se dissoudre simplement en milieu non oxydant acide selon les réactions et selon le pH :



3.5.2.1.2 COMPARAISON AVEC LA RÉACTIVITÉ DE LA PYRITE

Si on compare la réaction d'oxydation de la pyrrhotite avec celle de la pyrite FeS_2 :



on remarque que la pyrite nécessite plus d'oxygène par mole de sulfure, mais donne plus de sulfate et d'acidité.

La pyrite, contrairement à la pyrrhotite, ne se dissout que très faiblement en milieu non oxydant acide.

Enfin, on notera que ces réactions sont catalysées par la présence de bactéries et les couplages galvaniques (contact entre deux conducteurs ou semi-conducteurs -ici les sulfures- différents) -même si cela reste à confirmer pour le couplage pyrite-pyrrhotite-. Pour le cas où le milieu s'acidifie jusqu'à descendre en dessous de 2,5, alors un phénomène majeur apparaît : le Fer ferrique est soluble et constitue alors le principal oxydant pour tout sulfure présent (en effet, l'oxygène est peu soluble, même si thermodynamiquement il est un excellent oxydant).

Pour finir, et c'est peut-être le plus important ici, les vitesses de réactions rapportées dans la littérature privilégient très nettement l'oxydation de la pyrrhotite par rapport à celle de la pyrite (de 20 à 100 plus rapide) [2].

Quelle conclusion peut-on en tirer sur son incidence sur la fiabilité du processus de co-déposition pour empêcher la production d'acide ? Tant que la halde de co-déposition de démonstration ne sera pas opérationnelle, on manquera de données à ce sujet. Pour le moment, les seules disponibles sont acquises au laboratoire, en colonnes ou cellules. Aucune extrapolation réaliste à long terme n'est disponible. L'accès d'oxygène aux couches de résidus générateurs d'acidité est vraiment un point crucial.

3.5.2.2 AUTO-ÉCHAUFFEMENT

Compte tenu de la présence de sulfures -et surtout de la pyrrhotite-, des tests ont été effectués. Le projet a été revu, puisque, initialement, le taux d'humidité des résidus sulfurés était prévu à 6% (Avis de projet, 7.1.3.2, page 20) et qu'après les tests un taux de 15% a été recommandé (4.4 vol 1 EIES page 4-62) à cause du transport de l'usine vers les lieux de stockage (résidu suffisamment humide mais sans possibilité de liquéfaction (4.6.2 vol 1 EIES page 4-101)). A 15%, ce résidu serait donc classé en catégorie 3 « ne pas exposer à une source de chaleur élevée », mais je n'ai pas trouvé de résultats de tests à ce taux d'humidité là.

De plus, selon Et 4.6.1 vol 1 EIES page 4-88 « Le test selfheating a été réalisé sur plusieurs échantillons de résidus PGA avec des teneurs en eau de 6%, 10% et 14 % et 18% et sur les résidus miniers non désulfurés. Les essais sur les résidus miniers PGA à des teneurs en eau de 6% à 14% ont montré des résultats qui placent ce matériau dans la catégorie 5 « action de prévention recommandée » et celui sur le même matériau à 18% dans la catégorie 3 « ne pas exposer à une source de chaleur élevée »

On pourra faire remarquer qu'entre 14 (catégorie 5) et 15%, il n'y a pas beaucoup de différence et que des contrôles très stricts devront alors être effectués pour que le taux d'humidité en sortie usine ne soit pas variable (ce qui se comprend au sens du transport du produit) et surtout ne descende pas en dessous des 15% retenus.

Je ne recopie ci-dessous qu'un passage intéressant de Vol-3 ann. 4-4 pages 768-9, où le laboratoire chargé des tests attire l'attention du futur exploitant sur les limites de son étude, dont l'échantillonnage :

« The Client is advised to ensure itself that the sample tested here will be representative of future materials being, or to be, produced. The Client is also advised to read the reference article by Rosenblum, Nessel and Spira (2001) in order to more fully understand the risks and mitigation methods in general. In addition to the mineralogical basis, it needs to be emphasized that actual self-heating will depend on the history of weathering (oxidation), storage conditions, ambient temperature and relative humidity, in-transit/storage time, and moisture content of the material as well as the specific surface area (m^2 /g). Conditions of higher temperature ($>30^\circ C$) and high humidity ($>70\% RH$), coupled with prolonged transport or storage times, are often the contributing factors that lead to problems due to self-heating of potentially reactive materials. »

Une des questions principales, à mon avis, serait d'avoir une bonne idée sur le risque d'auto-échauffement et le lieu où il peut se passer. L'aléa est connu. Il a été chiffré et les informations et limites fournies par le réalisateur de l'étude d'échauffement permettent de se faire une bonne idée du potentiel d'auto-échauffement pouvant mener à une éventuelle ignition. Par contre, si l'aléa est connu, le risque l'est beaucoup moins : les enjeux sont multiples, allant de la stabilité des ouvrages de confinement à, bien sûr, la qualité de l'air et des eaux souterraines, entre autres.

Par ailleurs, le lien qu'il y a entre l'auto-échauffement et le DMA produits potentiellement par les résidus sulfurés PGA n'est pas explicité. En effet, les réactions d'oxydation de la pyrrhotite et de la pyrite (productrices de DMA) sont exothermiques (productrices d'échauffement). Dans quelle mesure les 0,2% de carbone graphite contenus dans les résidus PGA peuvent-ils contribuer à l'auto-ignition? Même si c'est peu, est-ce vraiment négligeable? (Nota : on n'a, dans les documents, que la donnée Carbone graphite et pas le Carbone carbonate, que j'ai calculé devant être à 0,035% en fonction des % des carbonates contenus, soit donc alors un total de 0,235% de Carbone total).

Quant au minerai, qui contient 7% de sulfures (6,2% de pyrrhotite) et 4,4% de graphite, qu'en est-il de son potentiel d'auto-échauffement? Et les stériles (Paragneiss mixte : 1,8% de sulfures, 0,8% de graphite, Métagabbro : 2,3% de sulfures)? Pas de données à ce sujet dans les documents (sauf erreur de ma part), alors que des fines de ces stériles sont générées lors de l'abatage et que, si toutefois la roche massive ne doit pas présenter a-priori de problèmes, la présence de lits riches en sulfures et graphite est, elle, par contre, très vraisemblable! A ce sujet, il peut être utile de vérifier si l'interaction, signalée dans des travaux de recherche [3],[4] et potentiellement explosive, est possible dans les forages entre la charge (Ammonium nitrate de l'ANFO) et pyrite et/ou graphite.

Pour un évitement du processus dans les haldes, on peut retarder la diffusion d'oxygène et inhiber l'oxydation (voir ma remarque plus loin dans le rapport, au sujet des adjuvants phosphatés qui passivent les surfaces des sulfures) : les deux sont complémentaires mais la deuxième solution, mise en application en amont du stockage, peut éviter bien des ennuis ensuite.

Il faut aussi surveiller les haldes pour mettre en évidence de l'existence (ou non) du processus : surveillance humaine et surveillance instrumentée : caractères organoleptiques (odeur, en particulier); analyse de gaz, d'effluents, mesure de la température, analyse de la teneur en eau des résidus. Concernant la mesure de température, on peut pratiquer la thermographie infra-rouge [5], éventuellement embarquée (sur drones [6]) ou directement dans les haldes (par exemple, par mesure de température par fibre optique distribuée [7]).

Si une auto-ignition se met en route : de nombreux cas-histoires sont présents dans la littérature au sujet de ces phénomènes, pour le cas particulier des mines de charbon. Je n'ai pas trouvé de référence particulière sur les « feux de pyrite ». Les arroser ne me paraît pas une solution, contrairement aux « feux de charbon », car alors il faudra gérer des effluents sulfatés-acides. Par ailleurs, l'apport d'eau n'a pas forcément des conséquences que sur le refroidissement externe de la masse minérale. Il faut aussi prendre en compte les effets chimiques (pour mémoire, la combustion interne des terrils à charbon est parfois encore entretenue (par injection d'eau) afin de créer des résidus oxydés pour utilisation en génie civil [8]).

3.5.2.3 ATTAQUE SULFATIQUE DES BÉTONS

Concernant la pyrrhotite, un phénomène bien documenté peut se produire, à savoir l'attaque sulfatique des bétons (formation d'étringite secondaire et aussi de gypse, expansifs) qui est un autre aspect de la réactivité très importante de la pyrrhotite (mais aussi à moindre titre la pyrite). On peut lire, par exemple [9] : "sa présence dans le béton conduit à l'éclatement de celui-ci et entraîne de graves malfaçons dans les constructions. C'est le cas dans plusieurs centaines de maisons dans la région de Trois-Rivières (Québec) où les fondations de plusieurs centaines de maisons devront être refaites à cause de la présence de pyrrhotite dans le gravier utilisé pour le béton des fondations". Il semble par conséquent difficile, par principe de précaution, d'utiliser les stériles (à cause du salissage d'exploitation), ou résidus (a fortiori bien sûr PGA), pour la construction des infrastructures minières. En Europe, la teneur maximale en soufre total admissible pour des granulats est de 1%S [10]. Cela pose la question des ressources en granulats à béton adéquats pour la construction. Ce point ne semble pas abordé dans le projet.

Un sujet très connexe est celui de la conception des stalles de dépôt temporaire du minerai (en attente de traitement) et surtout du résidu sulfuré (en attente de stockage), sous dôme. Ce sujet est traité plus loin.

3.5.2.4 POTENTIEL DE DRAINAGE ISSU DES ROCHES STÉRILES, LE MINERAI ET LES RÉSIDUS

3.5.2.4.1 DES MÉTHODES DIFFÉRENTES ET COMPLÉMENTAIRES

Dans le tableau 4-30 de Vol1-page 216-"analyse de PGA", est présentée une analyse comparative des résultats donnés par trois différentes méthodes au sujet du potentiel de génération acide (tests ABA, cellules humides et colonnes). La mise en évidence du caractère PGA ou NGA est très cohérente entre méthodes (principe différent pour ABA, type de lessivage différent et cinétique différente pour les deux autres méthodes) et par rapport au type de roche concerné (et donc de minéralogie) -voir plus haut "Faciès rocheux rencontrés". Les objections à ces résultats que l'on peut mettre en avant sont les suivantes :

- une fois de plus, l'échantillonnage pour réaliser les tests (voir ce paragraphe),
- et, reliée au point précédent, les granularités utilisées dans les tests, comparées aux granularités réelles rencontrées sur le site, en conditions géologiques ou non (roches en place, abatage de celles-ci à l'explosif, concassage etc...).

3.5.2.4.2 POSSIBILITÉ DE DRAINAGE NEUTRE CONTAMINÉ

Par ailleurs, in Lévesque-Michaud [11], on peut lire : «La prédiction du drainage minier est une étape primordiale lors de la conception des infrastructures de surface sur un site minier. La plupart des tests de prédiction utilisés par l'industrie ne sont pas adaptés pour la détection de drainage neutre contaminé (DNC), car ce type de contamination est souvent associé à un effet de délai ne pouvant pas être contrôlé par les essais cinétiques conventionnels, ou qui nécessitent alors des essais sur une très longue période de temps. Des nouvelles méthodes de prédiction nécessitent donc d'être développées afin de répondre à cette problématique....».

Je n'ai pas plus de commentaires car le texte ci-dessus est assez explicite.

3.5.2.4.3 PRÉSENCE DE SULFATE

En Vol-2 ann. 2-1 page 120-12, le tableau 13.7 donne les teneurs en soufre total et en soufre sulfure, ceci pour plusieurs échantillons de minerais. La teneur totale en soufre du Master composite est ici de 3,07%, dont seulement 2,77% de soufre sulfure... Les pourcentages de soufre «non sulfure» varient de 4 à 15% environ.

Donc du sulfate est potentiellement présent dans tous les échantillons et ceci n'est, à ma connaissance, pas discuté. Si ce n'est pas du sulfate, alors, il doit être expliqué.

La présence de sulfate semblerait vouloir dire, en l'absence d'autres sulfates signalés dans les analyses minéralogiques (ils sont de toutes façons très rares dans les roches métamorphiques telles que celles qui sont présentes sur le site), que le minerai est susceptible d'être oxydé, quelque soit le niveau de prélèvement. Ce qui veut aussi dire que de l'oxygène et de l'eau ont déjà pénétré profondément dans le roc dit sain (et pas seulement dans le roc fracturé).

La présence de sulfates, s'ils sont issus d'une oxydation (à vérifier au microscope électronique à balayage), jette alors le doute sur la notion de «temps de latence», utilisée dans le rapport pour éclairer un comportement «inerte» des résidus et stériles PGA en attente de la remontée des eaux de la nappe dans la fosse. On pourrait objecter que les sulfates sont pris en compte dans les tests de comportement vis-à-vis du DMA/DRA (mais alors ils doivent donner des lixiviats avec une cinétique très rapide, par forcément visibles avec l'échelle de temps utilisée en colonnes ou en cellules humides), qui intègrent globalement tous les minéraux, mais force est alors de revenir aux questions d'échantillonnage.

Pour éclairer la présence de sulfates, il faut signaler ce qui est écrit en PR5.5 p79pdf : « La profondeur de la nappe phréatique dans le roc varie grandement d'un endroit à l'autre. Elle est à la surface à certains endroits alors qu'elle peut atteindre 38 m sous cette dernière dans une autre zone. » Ceci veut dire que la zone vadose (oxygénée) est développée dans les zones rocheuses fracturées et donc que l'oxydation des sulfures y est en cours. On peut noter aussi que « les eaux souterraines sont douces, carbonatées calciques plus Mg, SO₄ dans le roc. Mn et Fe peuvent être en excès ponctuellement » (Avis de projet, 8.1.8&9, page 26) : le sulfate doit être issu de l'altération de la pyrrhotite et la pyrite, le magnésium de l'altération de biotite, le manganèse des grenats et le fer des sulfures et de la biotite.

3.5.2.4.4 DES MÉTAUX DANS LES EAUX

Une évidence du drainage acide en cours dans la zone vadose du roc est la présence d'arsenic et de cuivre dissous, en dépassements ponctuels, signalés en 5.3.11 vol 1 EIES page 5.88 «Eaux souterraines au site minier».

Ainsi, il est aussi possible d'avoir des traces d'arsenic dans les eaux de rejet, même si les teneurs dans les roches (7µg/g max.) et résidus PGA (19µg/g) ne sont pas importantes. Il faut noter que la présence de fer contribue, au pH normaux, à la précipitation de l'arsenic. Je suis plutôt optimiste sur ces points.

3.5.3 TESTS DE LIXIVIATION

Lorsqu'on regarde les tests de lixiviation du gneiss graphitique et ceux du résidu sulfuré (Vol.1 page 216 tab. 4-31 «Résumé des résultats du

potentiel de lixiviation»), on constate qu'un métal signalé dans les lixiviats du premier ne se trouve pas dans les lixiviats du second, le cuivre : c'est très difficile à expliquer, puisque le résidu sulfuré est un concentré des sulfures de métaux (dont certainement au moins la chalcopyrite CuFeS₂) provenant du minerai, le gneiss graphitique.

Même si on prenait en compte la possible précipitation d'une partie du cuivre dans les lixiviats du résidu sulfuré -co-précipitation avec des hydroxydes ferriques-, on peut raisonnablement encore mettre en cause l'échantillonnage. Ce n'est pas une très bonne nouvelle de trouver des anomalies de ce genre alors que l'étude se sert des résultats des tests pour la prédiction du transfert des métaux dans les eaux.

Néanmoins, ce qui vient d'être écrit doit être nuancé par les données de la Caractérisation géochimique : 4.6.1 vol 1 EIES page 4-93 et suivantes, où le cuivre apparaît bien, mais seulement dans les résultats des travaux en colonnes de l'URSTM.

3.6 Traitement du minerai

3.6.1 RÉACTIFS : CONCENTRATIONS RÉSIDUELLES ET RECYCLAGE

En Et 4.4 vol 1 EIES page 4-62, on peut lire : « Les réactifs de flottation pour le graphite sont le diésel ou mazout (agent collecteur du graphite) et le Methyl Isobutyl Carbinol (MIBC) (agent moussant). Ils seront adsorbés par les particules de graphite où ils seront presque entièrement brûlés lors du séchage du concentré de graphite. Selon l'analyse de la qualité de l'eau de procédé de l'usine de démonstration, la concentration résiduelle en diésel sera sous le seuil de détection (0,1 mg/l) ».

COMMENTAIRE :

- le fioul n'est pas à proprement parler un collecteur au sens habituel (par exemple les amyl-xanthates utilisés pour la flottation de pyrrhotite ou pyrite) car il s'adsorbe sur une surface de graphite qui est apolaire, déjà spontanément hydrophobe. La conséquence est qu'il est faiblement lié, facilement désorbable. D'autre part, comme c'est un équilibre, il y a du fioul en solution (et émulsion). Donc : une partie sera dans les eaux d'essorage et l'autre partira en vapeur (et non pas brûlée) au moment du séchage du graphite. Que faire avec le fuel dans les eaux et avec cette vapeur ?
- le MIBC est un moussant: ces réactifs s'adsorbent en général peu sur les surfaces minérales. Même conclusion donc que ci-dessus : il ne semble pas réaliste d'attendre que ce réactif soit entièrement lié au graphite puis « brûlé ».

On lit aussi plus loin : « Advenant qu'il ait une concentration résiduelle des réactifs, la plupart seront recyclés avec la recirculation d'eau interne 2 208 m³/j qui sera pompée dans les bassins de collecte final (BC) dans lesquels la volatilisation et la dégradation naturelle et/ou biologique auront lieu. Un traitement additionnel pourrait être requis dans l'unité de traitement des eaux usées si requis. » : en traitement de minerais, il est notoire que la circulation « en boucle » des réactifs ne peut que conduire à des dégradations du rendement, par augmentation progressive des teneurs et dérèglement des conditions initiales. Dans les diagrammes opératoires, une « purge » est nécessaire afin d'éviter

ces accumulations de réactifs (plus ou moins dégradés d'ailleurs) ainsi que des espèces mises en solution par altération des minéraux. Ceci est valable même si à ma connaissance, les xanthates et le MIBC sont facilement dégradables et leur durée de vie est très courte ([12] pour le xanthate et [13], [14] pour le MIBC).

3.6.2 QUALITÉ DU RÉSIDU DÉSULFURÉ

Il est écrit en 4.6.1 vol 1 EIES page 4-81 « Les proportions de sulfures dans ce matériau (le minerai) sont de l'ordre de 7,13 % de pyrrhotite et de 1,24% de pyrite » (proportions massiques supposées, même si ce n'est pas précisé). Si on compare ces valeurs à celles mentionnées plus haut («Minéralogie de la zone minéralisée»), à savoir pyrrhotite 39,5% et pyrite 4,9% dans le résidu sulfuré, on se rend compte que le rapport pyrrhotite/pyrite est dans le premier cas (minerai) de 5,75 et, dans le second cas (résidu sulfuré), de 8,06 : il y aurait donc relativement plus de pyrrhotite dans le résidu sulfuré -obtenu par flottation puis séparation magnétique- que dans le minerai source.

Plusieurs hypothèses peuvent se présenter mais l'une d'elles (mis à part un problème possible lié à l'échantillonnage, voir plus haut) est que de la pyrite se sépare différemment de la pyrrhotite (à cause de leur flottabilité et/ou leur comportement en séparation magnétique) et se reporte dans d'autres produits de l'usine, le résidu désulfuré et le concentré de graphite étant les deux candidats possibles.

Le résidu désulfuré analysé (analyse référence M15023-MAR18) a effectivement bien un rapport pyrrhotite/pyrite plus faible, 0,2/0,04 soit donc 5, aux incertitudes du QUEMSCAN près (elles ne sont pas données). Ce point demande à être précisé, car on pourrait supposer que le résidu désulfuré pourrait être, suivant le fonctionnement de l'usine, de composition «variable» vis-à-vis de son contenu en sulfures... ce qui n'est pas vraiment le but de cette opération (désulfuration maximale).

La question de la qualité du concentré de graphite est abordée au paragraphe « Qualité du concentré de graphite ».

3.6.2.1 LA SÉPARATION MAGNÉTIQUE

La pyrrhotite présente à Matawinie est heureusement, en très grande partie, séparable par magnétisme. La pyrite ne l'est pas du tout. De même qu'une très faible proportion de pyrrhotite hexagonale, non magnétique (2% sur les 30% présents dans le résidu acidogène). Le procédé semble efficace (au vu des analyses des produits résultants) combinant flottation (la pyrite et la pyrrhotite flottent globalement plutôt bien) puis magnétisme sur les non-flottés (ces procédés sont bien connus et largement pratiqués dans l'industrie).

Pourtant, le promoteur nous apprend récemment que son procédé de séparation magnétique n'a pas fonctionné et qu'il a dû changer son équipement, passant de 600 Gauss à 7000 Gauss, et que ce nouvel équipement est encore à l'essai.

Il me semble qu'une séparation magnétique basse intensité devrait suffire pour la pyrrhotite monoclinique (cela a été fait à Sudbury [15] et à bien d'autres endroits), qui a un comportement ferrimagnétique, contrairement à la pyrite qui est paramagnétique.

Il faut aussi noter que le type d'appareillage et donc la géométrie de l'entrefer ont une importance très grande et que ce n'est pas forcément le champ, mais plutôt le gradient de champ magnétique et sa géométrie dans le séparateur, qui vont être déterminants.

Le fait constaté récemment par NMG est peut-être dû à l'oxydation (partielle) et la transformation de la pyrrhotite (en pyrite -avec oxydation du soufre de valence -II en soufre de valence -I- et/ou oxy-hydroxydes de fer -avec oxydation du fer +II en fer +III), en lien avec des échantillons qui ont été influencés par les conditions atmosphériques oxydantes (échantillons proches de la surface mais aussi par stockage). Il est difficile de prédire à l'avance ce que sera l'impact de la transformation de la pyrrhotite sur ses propriétés magnétiques, puisque le résultat d'une oxydation modérée est un mélange de plusieurs phases minérales. De fait, une oxydation provoquée de la surface de la pyrrhotite faiblement ou non magnétique (pyrrhotite hexagonale) par un grillage modéré peut en faciliter la séparation magnétique...

Il faudrait savoir quels échantillons sont utilisés actuellement pour la séparation par flottation qui prépare le concentré et les résidus destinés aux tests ultérieurs dont la cellule expérimentale de co-déposition.

3.6.3 QUALITÉ DU CONCENTRÉ DE GRAPHITE

Quant au concentré de graphite, il y a deux possibilités :

1. En l'absence de KAX dans les premières étapes du circuit, il peut quand même y avoir des sulfures qui flottent avec le graphite, à cause d'une association très intime des deux ou trois minéraux -graphite, pyrrhotite, pyrite- et possibilité d'avoir de la pyrite fine dans les feuillets du graphite.
2. De fait, depuis peu, le promoteur a révélé avoir des problèmes avec le PAX (Potassium Amyl Xanthate, plus souvent appelé KAX et utilisé en désulfuration du premier « non-flotté » issu de la récupération du graphite) qui ne se résorbe pas et qui risque de se retrouver dans le concentré de graphite ou de provoquer la présence de sulfures dans ce concentré. Effectivement, dans la mesure où les eaux de procédé tournent en boucle, on a une accumulation de réactifs et produits de réaction, non compensée par (1) la dégradation des réactifs et (2) par l'apport d'eau fraîche. Le PAX va donc revenir dans le circuit et participer à une co-flottation du graphite et des sulfures, ce qui est indésirable. Il semble bien que les tests initiaux ne montraient pas ce phénomène à cause probablement du non recyclage des eaux au stade laboratoire. En l'absence de données sur le concentré de graphite et sa minéralogie, je ne peux être très affirmatif sur le phénomène qui se passe vraiment. Par exemple, il est impossible de trouver le teneur en soufre du concentré de graphite ni en vol. 1, EIES 4.4 p. 188pdf « Traitement du minerai », ni en vol. 2, ann. 2-1 Faisabilité § 17.0 « Recovery methods », ni dans vol. 3, ann. 4-3 p. 342 et suivantes, ann. C, Appendix B, « mineralogy test work ».

Que le point 1 ou le point 2 soient avérés, il est préoccupant de savoir que des sulfures peuvent se reporter dans le concentré de graphite, ce qui peut causer des problèmes dans le traitement ultérieur du concentré pour obtenir des variétés commerciales)

3.7 Infrastructures et stockage des stériles et résidus

3.7.1 INFRASTRUCTURES EN BÉTON : ATTAQUE SULFATIQUE

Concernant la pyrrhotite, un phénomène bien documenté peut se produire, à savoir l'attaque sulfatique des bétons (formation d'ettringite secondaire et aussi de gypse) qui est un autre aspect de la réactivité très importante de la pyrrhotite (mais aussi à moindre titre la pyrite) [9]. Il semble par conséquent exclu, par principe de précaution, d'utiliser quelque stérile que ce soit (à cause du salissage), ou pire, résidu (a fortiori bien sûr PGA), pour la construction des infrastructures minières. Cela pose la question des ressources en granulats à béton adéquats. Ce point ne semble pas abordé dans le projet.

3.7.2 STOCKAGE TEMPORAIRE MINÉRAIS ET RÉSIDUS

Les stockages temporaires des produits miniers et de traitement, compte tenu de leurs teneurs en sulfures et en fonction de leur granularité, peuvent présenter des risques de drainage acide et d'auto-échauffement.

Un sujet très connexe du drainage acide et de l'attaque sulfatique des bétons est celui de la conception des stalles de dépôt temporaire du minerai (en attente de traitement) et surtout du résidu sulfuré (en attente de stockage). En effet, le béton sera certainement attaqué très vite par l'acidité issue de l'oxydation des sulfures restants au niveau du sol, même si l'entreposage est de courte durée. J'aurais tendance à suggérer que la dalle béton soit surmontée d'un goudronnage étanche rendant le roulage possible ainsi que les bordures soient protégées.

Par ailleurs, selon 4.5.11 vol 1 EIES page 4-74 « La capacité maximale de ces dômes est de trois (3) jours de production, soit environ 3 100 m³ de PGA et 12 500 m³ de NGA » : ce qui veut dire que, pour le remplissage maximal (ce qui peut très bien arriver), les produits résident au moins trois jours, ce qui est un strict minimum, respecté uniquement si on vide totalement l'espace disponible. Comme les produits arriveront en continu de la mine ou de l'usine, alors, c'est des durées beaucoup plus longues que l'on peut pré-supposer pour le temps de résidence de certaines parties stockées sous le dôme d'entreposage. Dépassent-elles la durée du « temps de latence » (apparition d'un pH inférieur à 5) de 12 à 28 semaines annoncé pour le résidu sulfuré (4.6.1 vol 1 EIES page 4-93 et suivantes) ?

Dans le rapport, contrairement aux études de potentiel d'acidification ou de lixiviation auxquelles on affecte un temps de latence et malgré le lien fort qui existe entre acidification et échauffement (réactions exothermiques) on ne trouve pas de notion de temps de latence.

De plus, en cas d'arrêt de production ou même de grève, que se passera-t-il si la durée de stockage est prolongée ? Pour les résidus sulfurés, qu'est-il prévu comme dispositif en cas d'échauffement ?

D'autre part, selon 4.3 vol 1 EIES page 4-44, « Tel qu'illustré au tableau 4-12, la période d'exploitation chevauche légèrement la période de construction (année 0) sur une période d'environ 5 mois, durant laquelle il est prévu extraire 133 000 tonnes de minerai à faible teneur, qui seront entreposées puis traitées ultérieurement, soit entre les années 3 à 8 ». Si on comprend bien ce qui est écrit là, alors une certaine fraction du minerai exploité précocement pourrait attendre jusqu'à 8 années avant d'être traité ? Sur le même plan, selon 4.5.3 vol 1 EIES page 4-68 « Durant les années de pré-production, 133 000 tonnes de minerai seront extraites

et seront empliées dans la fosse où les eaux de ruissellement seront captées » : je suppose que la fosse mentionnée est la fosse d'exploitation.

3.7.3 STOCKAGES DÉFINITIFS

3.7.3.1 REMARQUES PRÉLIMINAIRES

Il n'y en fait que très peu de références dans la littérature au sujet des entreposages prévus au projet et pas vraiment d'expérience déterminante sur, au moins, du moyen terme, sur un dépôt avec alternance de couches de stériles PAG et d'alternances de résidus PAG et NAG.

3.7.3.1.1 ÉPAISSISSEMENT DES RÉSIDUS

La pratique proposée semble attractive et adaptée à la méthodologie de stockage proposée. Il n'en reste pas moins que plusieurs réserves à ce sujet ont été faites dans la littérature, en particulier au niveau de la mise en œuvre de la filtration et aussi du redémarrage possible de DMA : par exemple, en [16], on peut lire « Constraints that must be considered when evaluating filtered tailings include potential difficulties dewatering finer grinds, current limitations on daily throughput, increased operating costs, and increased potential for oxidation of potentially acid generating tailings. »

Le document très intéressant. Il est plutôt en faveur de ce type de stockage (mais le site Matawinnie n'est pas une zone à permafrost et donc il n'est pas sûr que les conclusions de ce travail y soient extrapolables)

De même, Aubertin et al. 2015 [17], écrivent : page 42 : « Il faut noter en terminant que les résidus filtrés (avec $P \geq 85\%$, ou $w \leq 20\%$), employés de plus en plus dans certains secteurs de l'industrie, ne constituent pas une approche de gestion appropriée pour les rejets de concentrateur générateurs de DMA en climat humide, car les résidus sulfureux peuvent alors devenir fortement réactifs (lorsqu'exposés à l'air et à l'eau). »

3.7.3.1.2 INCLUSION DE STÉRILES DANS LES STOCKAGES DE RÉSIDUS

La même publication [17] confirme ce que j'écrivais au paragraphe dédié plus haut à la « Possibilité de drainage neutre contaminé » : « L'application de cette technique, présentement utilisée à la mine Canadian Malartic, demande toutefois une planification détaillée et une analyse de certains aspects particuliers, comme par exemple le risque de produire du DNC dans le parc (si les roches stériles sont potentiellement réactives). Dans le cas des résidus et/ou de stériles réactifs, il faut maintenir la nappe élevée en permanence, ce qui augmente les pressions sur les digues et le débit de fuite, en plus de maintenir les rejets dans un état relativement lâches (par rapport aux cas où la nappe est abaissée). »

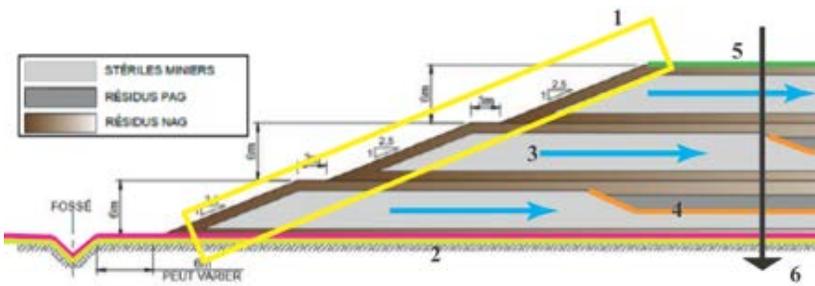


FIGURE 4 : SCHÉMA DE LA HALDE DE CO-DÉPOSITION AVEC NUMÉROS DES PROBLÉMATIQUES POUR COMMENTAIRE DANS LE TEXTE :

1 : érosion, 2 : sous-bassement (rouge : géomembrane, jaune : sable), 3 : transfert hydrique, 4 : oxydation et intrusion, 5 recouvrement CEBC, 6 : tassement . Figure d'origine en vol 1, 4.6.2 p. 4-102, fig 4-13

3.7.3.2 HALDE DE CO-DÉPOSITION

Le schéma qui suit permet de rendre compte des problématiques identifiées :

Si on suit les numéros de la figure ci-dessus, on a donc les problématiques suivantes :

- 1 Erosion possible en cours de montage du talus, avant que le recouvrement ne soit mis en place. 3 ou 4 années seront critiques à ce propos car il est écrit en 4.9 vol 1 EIES page 4-130 « La restauration progressive au site NMG débutera dès l'année 4 avec la restauration de la halde de co-disposition et des infrastructures connexes. Ainsi, lorsqu'une section de la halde de codisposition aura atteint son élévation finale (pente des bancs et dessus de la halde), cette section sera restaurée avec la mise en place d'un recouvrement adéquat.»
- 2 Selon 4.3 vol 1 EIES page 4-41, « Une couche de 0,3 m de sable ou autre matériel équivalent (provenant du mort-terrain par exemple) sera mise en place après le décapage afin de permettre l'installation d'une géomembrane (de type PEHD de 1.5 mm) sur toute la superficie des aires d'accumulation». On constate qu'il n'est pas prévu de drains sous la géomembrane: pourtant ces drains sont utiles afin de contrôler les éventuelles fuites et leur charge;
- 3 Circulation d'eau dans un milieu granulaire non saturé, susceptible de transporter de l'oxygène vers le dessous des couches de résidus PAG compactés. Comment éviter ces transferts lors de l'ingénierie de la halde en cours de montage? Comment être sûr que les résidus NAG déposés sur la pente seront bien saturés et joueront leur rôle de barrière capillaire tant que la CEBC ne sera pas installée par dessus? d'autant que la problématique 1 existe;
- 4 Création de couche oxydée, éventuellement de "hardpan", sous les couches de résidus PAG.
- 5 Durabilité de la CEBC, une fois installée. Et qu'en est-il sur les pentes?
- 6 Tassement. A ce propos, voir "Stabilité géotechnique".



FIGURE 5 > PRÉSENCE D'UNE OXYDATION ET D'UN « HARDPAN » AU SEIN D'UNE COUCHE SABLEUSE PERMÉABLE SOUS UNE COUCHE DE RÉSIDU ARGILEUX ET PYRITEUX PEU PERMÉABLE, AU SEIN D'UNE HALDE À RÉSIDUS DE FLOTTATION. (PHOTO PERSONNELLE DE L'AUTEUR DU PRÉSENT RAPPORT) Ce phénomène résulte de la non saturation de la couche sableuse et il est significatif que ce phénomène se produit sous et non sur la couche pyriteuse.

D'autre part, est-ce que la compaction provoquée ne va pas "extruder" du résidu PAG vers les stériles situés en dessous, qui ont une granularité bien plus grossière? Cela aurait pour conséquence probable de perturber la saturation de ces "extrusions" de sable à sulfure et de provoquer des réactions indésirables, en milieu non saturé. Ce phénomène est bien entendu susceptible de se produire aussi dans les couches co-déposées en fosse et après le dépôt, par tassement différentiel. A ce propos Kalonji, 2014 [18], en introduction et après la présentation des données complémentaires, évoque l'influence de la pente de la CEBC sur la saturation (faible influence), la profondeur de pénétration des fines de la couche capillaire dans la sous-couche de bris capillaire (visualisée et mesurée en tant qu'effet sur les propriétés hydrauliques des couches).

On notera aussi, en PR5.5 §3.4.3.4 p.87pdf : « Bassins de collecte : Ces eaux de contact proviennent du dénoyage de la fosse, du procédé d'enrichissement du minerai et du ruissellement de la halde de co-disposition des résidus et des stériles miniers, de la halde à mort-terrain et de la halde de terre végétale. Les sédiments seront excavés périodiquement ou lorsque requis et seront disposés dans la halde de co-disposition". Il est donc question ici de placer en co-déposition des sédiments de bassins de collecte. Où seront-ils placés dans le schéma des haldes?

3.7.3.3 CO-DÉPOSITION EN FOSSE

Le retour des résidus dans la fosse s'effectuera à partir de l'année 6 selon le plan minier (4.6.2 vol 1 EIES page 4-101), sauf si l'expérience acquise les premières années ne le permet pas (voir "Temps de latence halde et fosse").

Le schéma qui suit permet de rendre compte des problématiques identifiées :

(nota : selon la réponse à Qc-117 p.256pdf : « Une géomembrane est positionnée au-dessus de la fosse », c'est à dire, selon la figure 4-1 de l'étude de modélisation hydrogéologique (annexe 7-4 de l'ÉIES), entre le remplissage de la fosse et la halde qui vient au dessus.)

Si on suit les numéros de la figure ci-contre, on a donc :

- 1 Les parements rocheux de la fosse ne sont pas isolés des stériles et donc
- 2 Fes infiltrations d'eau (et d'oxygène tant que la nappe ne sera pas remontée dans la fosse) sont possibles y compris
- 3 Fepuis la surface (tant que la géomembrane ne sera pas posée);
- 4 & 5 Oxydation et création éventuelle de couches indurées au dessous mais aussi possiblement au dessus des couches de résidus sulfurés PAG;
- 6 Tassement : comme on le signale plus loin dans la "Stabilité géotechnique", il ne semble pas avoir vu d'étude du tassement de la fosse remplie et recouverte de la halde à son élévation maximale. Ce tassement potentiel, s'il est avéré, pourrait perturber l'agencement des couches de résidus et provoquer aussi le déchirement de la géomembrane séparant la fosse de la halde;
- 7 Durabilité de la CEBC, une fois installée.

Nota : Concernant l'aspect visuel, il faut être conscient que le site de stockage final ne pourra recevoir qu'une végétation herbacée ou de petits arbustes. De grands arbres ne sont pas bienvenus sur un site à CEBC, afin de ne pas endommager la couche capillaire.

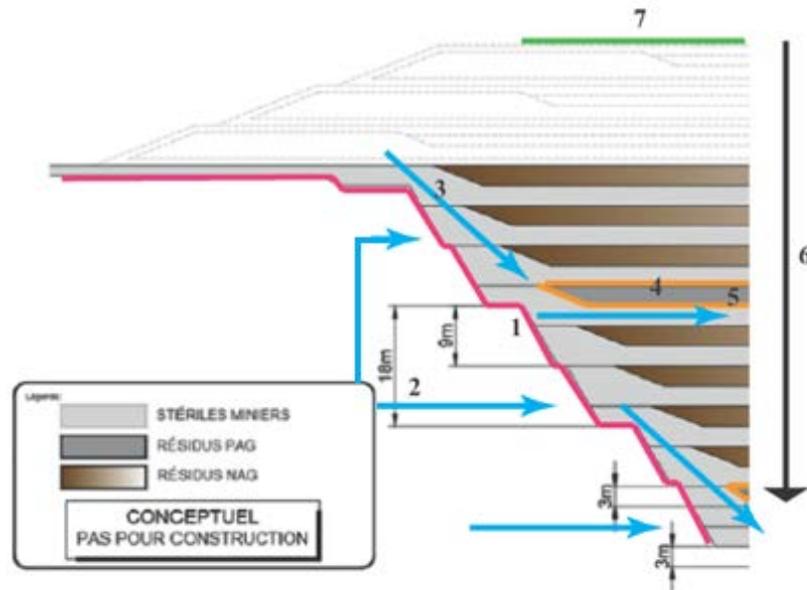


FIGURE 6 > SCHÉMA DE LA FOSSE APRÈS CO-DÉPOSITION AVEC NUMÉROS DES PROBLÉMATIQUES POUR COMMENTAIRE DANS LE TEXTE:

1 : parements de la fosse, 2 et 3 : transferts hydriques, 4 : oxydation, 5 intrusion, 6 : tassement, 7 : recouvrement CEBC. Figure d'origine en vol 1, 4.6.2 p. 4-104, fig 4-15

On notera, pour finir, en PR5.5 S3.4.3.5 p.88pdf « En cas de crue exceptionnelle, et advenant que les autres bassins de collecte soient à pleine capacité, comme mesure exceptionnelle, la fosse pourrait être utilisée temporairement pour entreposer l'eau qui pourrait ne pas répondre aux critères de qualité environnementaux. » Compte tenu du dimensionnement des bassins de collecte (PR5.5 p.116), cet événement sollicitant la fosse pour une utilisation imprévue paraît tout à fait improbable, mais il conviendrait, puisque le scénario est évoqué, de modéliser ses conséquences en termes d'écoulement souterrains.

3.7.3.4 SATURATION DES STÉRILES ET RÉSIDUS

L'analyse de sensibilité qui est présentée clairement en Qc-94 p. 219pdf, évoque une possibilité d'effet capillaire non maintenu dans les résidus PGA liée à la variation de la conductivité hydraulique saturée des stériles situés en dessous. Parmi les options présentées pour y remédier on trouve la compaction des stériles, leur tri granulométrique, la modification de leur épaisseur. Bien sûr, les expérimentations de terrain doivent guider la conception à choisir mais le risque est réel que la variabilité du stérile (voire du résidu PAG ?) mette en défaut toute adaptation valide en cours d'exploitation.

3.7.3.5 TEMPS DE LATENCE : HALDE ET FOSSE

Il peut être utile de lire attentivement la réponse à Qc-24 p. 50pdf . Les questions d'échelle (type d'expérience et durée par rapport à la réalité du terrain, variabilité des conditions climatiques) font qu'il me semble très difficile de se faire une idée sur la pertinence des réponses, qui se terminent par « Si requis, les mesures suivantes pourront être évaluées pour limiter la réaction d'oxydation... ».

Il faut attendre au moins la validation des scénarios par la construction de la halde de démonstration, même si, en Qc-25 on lit : « Enfin, selon les résultats du suivi qui sera fait en période d'exploitation et si nécessaire, afin de maximiser les propriétés géotechniques et géochimiques des résidus miniers PGA, il pourrait être envisagé de transporter et compacter ceux-ci 7 jours sur 7 (de jour). Ainsi, la compaction des résidus PGA pourrait se faire dans un délai de 24 heures une fois sortie de l'usine de désulfuration ».

Lire aussi QC 26 qui conclut, entre autres : « Concernant le retour des résidus PGA dans la fosse, de façon globale leur déposition sera limitée par leur élévation dans la fosse de manière que ces couches demeurent en tout temps sous le niveau de l'eau souterraine à long terme dans la fosse. Pour les zones de déposition dans la fosse, il sera considéré que le temps de latence pour la réaction d'oxydation des sulfures des résidus miniers doit être supérieure à la période (mois ou années) de la remontée des eaux souterraines à leur niveau selon les validations suivantes :

1. Le temps de remontée de la nappe sera revue à partir des données de terrain et de simulation numérique spécifiques au retour dans la fosse. (...)
2. Le temps de latence sera validé conséquemment aux résultats des essais sur le terrain pour réaliser le plan de déposition des résidus et stériles miniers.

(...) Il n'y aura pas de retour de résidus miniers PGA dans la fosse si les résultats des simulations numériques limitant l'oxydation des résidus miniers PGA ne sont pas validés par les essais sur le terrain tels que la cellule expérimentale et des planches d'essais. »

On voit bien que par exemple, la dernière phrase citée peut remettre en cause tout le projet, obligeant à un dépôt généralisé en halde, sans utiliser la fosse.

3.7.3.6 ENNOYAGE DE FOSSE DONT LA SECTION NORD (LAC)

Précisons tout d'abord que la fosse ne peut être remplie complètement à cause des contraintes temporelles de l'exploitation et donc de la production de roches stériles et résidus. Dans les premiers temps de l'exploitation donc, le remblaiement de la fosse n'est pas possible et la construction d'une halde en surface est nécessaire. Par la suite, la reprise d'une halde pour en remettre son contenu en fosse est possible mais lorsqu'elle contient des résidus ou stériles PAG, le remaniement peut générer une oxydation difficile à limiter ensuite. Bien sûr, à cause du foisonnement (qui fait que le volume après minage, concassage, broyage est supérieur au volume en roche, même si on tient compte, bien sûr, du concentré de graphite qui sort du site), on ne pourra de toutes les façons pas remettre tous les résidus et stériles en fosse et donc le maintien d'une halde est nécessaire.

En 5.3.12 vol 1 EIES page 5.89, il est écrit « La qualité des eaux de surface a été retenue comme composante valorisée, car le secteur où s'implante le projet a une vocation récréo-touristique, avec diverses activités axées sur l'usage des lacs et cours d'eau, comme la baignade, les sports nautiques et la pêche. »

Il serait plus prudent de ne pas laisser espérer un plan d'eau équivalent à court terme en qualité à ceux, naturels, de la région proche. En effet, la partie supérieure de la fosse, dénoyée, aura certainement un impact sur la qualité des eaux. De plus (et c'est le dernier point abordé dans le paragraphe « Co-déposition en fosse »), à partir du moment où les documents du promoteur envisagent de se servir de la fosse pour gérer un surplus d'eaux dans les bassins de collecte, il vaudrait mieux rester modeste sur le devenir de la qualité des eaux du lac final dans la fosse.

3.7.4 DES TRAITEMENTS POSSIBLES POUR LE RÉSIDU PAG ?

Mise à part une clause de sauvegarde mentionnée en la réponse à Qc-24 p. 50pdf : « Si requis après les validations de terrain, ajout d'agents alcalins ou cimentaire pour stabiliser la réaction géochimique des résidus miniers PGA et augmenter le temps de latence. », il est étonnant que nulle part soit mentionnée la possibilité de recourir à des traitements physico-chimiques (type phosphate de fer ou autre) pour stabiliser les sulfures (ou inhiber la croissance bactérienne) avant leur stockage, même si la littérature ne conclut pas définitivement sur la stabilisation par le phosphate à long terme et que cette approche est peu utilisée en pratique (voir par exemple [17] [Aubertin et al. 2015 page 6](#)).

Compte tenu des incertitudes sur les temps de latence versus durée de manipulation/durée d'exondation (voir plus haut « co-déposition en halde et en fosse »), ce type de traitement pourrait être une bonne alternative d'attente avant que des conditions hydrogéologiques favorables soient établies (ennoiment de la fosse par exemple).

Pour revenir à l'option mentionnée ci-dessus en réponse à Qc-24, il est peu probable que l'ajout d'agents alcalins retarde l'oxydation des sulfures, puisqu'en effet, plus le pH est élevé, plus la vitesse d'oxydation augmente (les hydroxydes de fer sont bien moins passivants que les phosphates). Quand à l'ajout d'une matrice cimentaire, elle remet, à mon avis, en cause le mode de stockage prévu (au moins sa géométrie et la possibilité de compactage), même si le contraire semble être affirmé en et Qc-24 p. 50pdf et Qc-94 p. 219pdf. En effet, le volume du résidu sulfuré stabilisé ne sera plus le même que dans la planification initiale. D'autre part, les réactions pyrrhotite-matrice cimentaire (par exemple dans la technique du remblai en pâte) ne semblent pas encore suffisamment caractérisées, par exemple, vis-à-vis de la mise en route possible d'un auto-échauffement.

Du point de vue géotechnique, plusieurs questions se posent :

- Tant sur le plan géomécanique que sur le plan hydrogéologique, comme signalé plus haut, il manque une étude de géologie structurale : il n'y en a de trace nulle part. Si une ou plusieurs failles ou plans de rupture anciens sont présents, cela va avoir des conséquences en stabilité de la fosse et des haldes, de même que sur la circulation d'eau
- Les surfaces qui séparent les unités lithologiques sont autant de discontinuités. Comment passe t'on d'une lithologie à l'autre dans la fosse?

Il faut aussi rappeler qu'une des hypothèses les plus probables sur la cause du désastre de mont Polley (rapport de conclusion des experts, du 31 01 2015, cité en [19]) est que la construction de la digue à résidus a été faite sur une couche de dépôts glaciaires, ce qui est le cas dans le projet.

- Stabilité et comportement de la halde :
 - se peut-il que les paramètres soient impactés par une oxydation (et un échauffement?) interne, à la limite entre résidus PAG (presque saturés) et stériles (non saturés)?
 - se peut-il que les résidus PAG puissent s'infiltrer dans les stériles lors de la compaction? (donnant alors la possibilité d'une désaturation des résidus PAG dans la partie infiltrée)
 - Tassement de la halde : beaucoup d'hypothèses (modules de Young)..... Par ailleurs l'étude de tassement de la halde ne semble pas tenir compte du passage de compaction, ce qui donne des déplacements possibles de 0,5m, ce qui est très important, voire impossible à comprendre...
 - Tassement de la fosse ? Rien n'apparaît à ce sujet dans le projet, sauf erreur de ma part.

3.9.1 CIRCULATIONS SOUTERRAINES

3.9.1.1 MODÉLISATION

La zone de décompression liée à la création de la fosse va causer une augmentation de la circulation d'eau dans le roc sain, un milieu certainement déjà fracturé (voir PR5.5 p.80pdf : « La transmissivité du roc est comprise entre 6.10^{-6} m²/s et 2.10^{-4} m²/s et son coefficient d'emménagement est de 1.10^{-3} m/s à 6.10^{-5} m/s ce qui est typique des aquifères dans le roc fracturé. »).

3.9.1.2 CIRCULATIONS SOUTERRAINES SUITE À L'EXPLOITATION, RABATTEMENT

Dans les modèles hydrogéochimiques, l'influence chimique du rabattement de la nappe suite à creusement de la fosse n'a, à ma connaissance, pas été prise en compte. En effet, les sulfures des roches potentiellement exposés à l'oxygène suite à ce dénoyage vont s'oxyder. Surtout si des drains privilégiés (fractures, failles) sont présents (ceci renvoie à la remarque sur la présence ou non de failles signalée plus haut en section « géologie » et à l'existence d'une zone de décompression suite au creusement de la fosse).

Il est d'ailleurs bien précisé, dans PR5.6 - MELCC-Demandes d'engagements et commentaires-11-2019, p. 10 S11 et PR4.2 -Avis des experts sur la recevabilité-11-2019 p.42 que « Les réponses de l'initiateur aux QC-118, 119 et 120 concernant les valeurs utilisées dans les modélisations numériques, pour les eaux de drainage provenant des résidus miniers déposés dans la halde de co-disposition et la fosse, représentent une source importante d'incertitude (hypothèses utilisées, simplifications et utilisations des facteurs d'échelle théoriques) ». et que « L'utilisation de valeurs qui respectent déjà les critères de qualité des eaux souterraines rend l'étude de modélisation visant à évaluer l'impact sur l'eau souterraine comme étant peu pertinente. L'étude de sensibilité réalisée en réponse à la QC-119 utilise également des valeurs inférieures aux critères de qualité des eaux souterraines. » et « Dans le cadre de cette mise à jour, l'initiateur doit aussi évaluer l'impact de l'oxydation des sulfures présents dans les parois de la fosse et exposés à l'air sur la qualité de l'eau dans la fosse remblayée et sa partie Nord-Est exempte de résidus. »

3.9.2 REJET EN RIVIÈRE

En QC 10 p. 26-27pdf il est écrit : « À partir des données disponibles, il a été aussi estimé que le débit du ruisseau à l'Eau Morte est inférieur à 182 L/s environ 5% du temps, soit l'équivalent de 18 jours pendant l'année. Les bassins au site minier ayant une capacité suffisante pour accumuler l'eau pendant ces quelques jours pendant l'année, l'effluent final sera arrêté lorsque le débit du ruisseau sera trop faible. Cette gestion sera facilitée par le fait que les étiages dans le ruisseau surviendront lorsqu'il y aura peu ou pas d'eaux de ruissellement à gérer au site minier. »

Que se passera-t'il en cas de gel intense et d'étiage prolongé ? Le volume des bassins de stockage sera-t'il suffisant ?

La dernière assertion du paragraphe cité ci-dessus prévoit une simultanéité des étiages au point de déversement avec les quantités d'eau du site à gérer. Il serait utile, pour la vérifier, de chiffrer le temps de transfert des eaux dans les haldes et la fosse : il n'est pas sûr qu'on aboutisse à une simultanéité.

Par ailleurs, il me semble que l'usine de traitement des eaux devra perdurer, aussi longtemps que des effluents chargés pourront être émis par le site, ce qui peut s'étendre sur des décennies, voire davantage.

3.10 Installations de démonstration

3.10.1 USINE DE TRAITEMENT DU MINÉRAI

Une usine de démonstration est en activité maintenant.

J'ai mentionné plus haut quelques problèmes concernant le fonctionnement de l'usine (flottations, séparation magnétique). Est-elle en mesure de produire le concentré et les résidus qui permettent de réaliser la cellule de co-déposition ?

L'usine devait être alimentée par un échantillon en vrac de 40 000 tonnes. D'où provient cet échantillon ? Il est bon de le redire. Comme je l'ai écrit plus haut, la connaissance de la provenance et l'historique du minerai échantillonné sont cruciaux pour bien comprendre les problèmes de production rencontrés.

3.10.2 CELLULE DE CO-DÉPOSITION

Selon PR5.5 p.113 « En 2020, en collaboration avec l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), trois cellules expérimentales seront construites sur le site du projet de démonstration de NMG pour valider et optimiser les hypothèses de l'ingénierie de faisabilité, soit une cellule pour la co-disposition et deux cellules témoin de résidus miniers désulfurés et de résidus miniers PGA »

On peut se demander où en est ce projet ? Que fait-on aujourd'hui des résidus ? Stockage temporaire sous-aquatique ?

Il est donc certain que les résultats nécessaires à la validation du concept de halde de co-déposition ne seront pas obtenus dans des délais courts... ce qui retardera la mise en œuvre commerciale du projet.

De même, selon QC 23 p. 50pdf, « Les cellules expérimentales seront intégrées à la halde de co-disposition après l'année 3 ou 4 de l'exploitation de la mine. À ce moment, il y aura de 5 à 6 années de données et le concept aura été validé ou ajusté au besoin. Selon les résultats sur le terrain, il sera ensuite décidé s'il est nécessaire ou non de suivre ces paramètres » : on voit, d'après cette rédaction, que le projet démarrerait sur un concept non entièrement validé. Comment alors tenir compte de ce qui aura déjà été fait, produit et stocké ?

3.11 Modifications au projet

Il est clair, à la suite de nombreux incidents ou accidents survenus en domaine minier qu'un bon nombre de ceux-ci proviennent de situations non prévues (ce qui paraît banal à dire !) au sens principal que ce sont souvent des modifications du projet initial qui les provoquent (surélévation de stockages de résidus, par exemple, suite à une augmentation des réserves de minerai), indépendamment de la question de la variabilité géologique.

Par exemple, à la question Qc 88 p. 206pdf, sur les extensions possibles qui nécessiteraient, entre autres, un déplacement des infrastructures, il est répondu que la zone a été très bien définie/contrainte par géophysique (liée à la conductivité du graphite). Seule la zone dite Far Ouest, à l'écart de la zone repérée et des infrastructures prévues peut être prometteuse (étude en cours)... Donc il faut prévoir, le cas échéant, la révision du projet et une expansion possible des volumes de résidus et de stériles miniers à stocker.

D'autres points, signalés en cours du texte des autres paragraphes ci-dessus, sont autant de causes de révisions probables du projet minier au cours de sa durée de vie.

3.12 Comparaisons avec d'autres exploitations

Il est étonnant que le dossier présenté par NMG ne mentionne pas du tout les expériences accumulées lors de l'exploitation d'un minerai qui ressemble beaucoup géologiquement parlant à celui du projet, celui de Lac-des-Îles (dans le Vol-2 ann. 2-1 page 61 il est écrit que Lac-des-Îles « is an archetypal example of this type of deposit »). D'autant que le directeur de la mine de graphite d'Imerys à Lac-des-Îles a, semble-t-il, rejoint NMG.

Quelle est, en particulier, la gestion des résidus sulfurés de cette mine ? Quels retours d'expérience depuis son ouverture ?

Par ailleurs, en septembre 2018, Imerys a signalé des « problèmes géologiques et de traitement » pour son exploitation d'Otjivarongo, en Namibie, démarrée en mai 2017 et initialement programmée pour une production de 20000 t/an de concentré de graphite à 85% C. Ces problèmes ont amené l'arrêt de la production [20].

Je ne sais si les problèmes évoqués sont uniquement des « problèmes géologiques et de traitement » (voir paragraphe suivant) mais on sait bien que la variabilité du minerai (teneurs et qualité) est un des problèmes majeurs auxquels doit faire face l'industrie minière. Ma question à ce sujet est la même que celle du paragraphe qui suit...

3.13 Contexte international

Les ventes de graphite à destination des marchés de l'électronique et de l'automobile devraient être soutenues par la croissance du marché des batteries lithium-ion, mais cette croissance annoncée tarde. Par ailleurs, des fluctuations du marché et surtout des baisses continues des prix du graphite naturel depuis 2012 environ (liées entre autres à une offre en graphite naturel excédentaire) ne donnent pas un éclairage très encourageant au développement minier annoncé par NMG. Ceci d'autant que la teneur du minerai de Matawinie est plutôt faible par rapport à ceux des mines du marché actuel. Il est aussi souhaitable de mentionner l'évolution très rapide de la technologie des batteries qui va amener, dans les 5-10 années à venir, une autre transformation du marché du graphite. En effet, les batteries de 2ème génération seront vraisemblablement du type « Solid State » ou d'autres technologies qui n'utiliseront pas de graphite pour les anodes. Le marché du graphite pourrait donc chuter d'avantage à travers le monde, ce qui diminuera la rentabilité de beaucoup de projets miniers.

D'où ma question : que se passera-t-il si, à cause de problèmes de marché du graphite, la mine est arrêtée en cours de production après le démarrage de Matawinie ? Le retour d'expérience attendu sur le stockage des résidus, en particulier, ne sera probablement pas suffisant pour gérer un arrêt de manière convenable pour l'environnement, sans compter les questions financières afférentes à ce genre de problème.

Le texte PR5.5, §8.0 « Mesures en cas d'arrêt temporaire des activités » donne quelques réponses, complétées par la partie §9.0 « Plan d'urgence ». Ces réponses sont conventionnelles et non détaillées, il faut bien le remarquer.

4 CONCLUSION

Les suggestions/recommandations que j'évoque au cours de ce travail sont écrites afin de compléter, si possible, les informations que doit fournir l'entrepreneur du projet. Je ne suggère aucunement que des solutions existent, tant pour le diagnostic que pour les actions à entreprendre.

En effet, l'hétérogénéité (compositionnelle et structurale) d'un gîte minéral, quel qu'il soit, n'est parfaitement connue qu'en fin d'exploitation, malgré la multiplication des sondages. En particulier, les discontinuités structurales sont souvent difficiles à mettre en évidence par des sondages. L'hétérogénéité, source de variabilité des teneurs du minerai entrant à l'usine de traitement, est aussi source de difficulté à modéliser les écoulements souterrains, du point de vue hydrodynamique et compositionnel. De même, les modélisations géotechniques de stabilité s'en trouvent considérablement complexifiées.

Face à ces défis, en l'absence de réelle possibilité de comparaison avec une mine existante (géologie et hydrogéologie, type d'exploitation, de stockage des résidus et stériles, différentes, entre autres) et en face de la volonté d'innover (qui a normalement pour but d'améliorer les scénarios), la plus grande prudence est recommandée. L'étude de scénarios variés, l'application de « coefficients de sécurité » (pas seulement à réserver aux géotechniciens !) et d'hypothèses conservatrices, principe de précaution... sont à recommander, à toutes les étapes. Je dois avouer que ces démarches ne sont pas forcément absentes dans les documents fournis. On ne peut simplement que regretter que ces analyses, souvent pertinentes et très probablement bien menées, soient dispersées dans les milliers de pages des documents mis à disposition.

Le lecteur trouvera en tout début de rapport, le résumé de mes principaux constats, préoccupations et recommandations quant aux risques de contamination des eaux que soulève ce projet.

ANNEXE 1

LES RÉACTIONS D'ALTÉRATION DES SULFURES

Pyrrhotite

Les calculs suivants sont présentés pour préciser les travaux publiés et, à mon sens, souvent inexacts dans l'expression des équations chimiques :

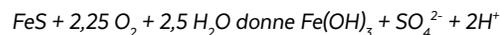
Hypothèse : $Fe_{1-x}S$ avec x entre 0 et 0,125 (à 0, la pyrrhotite devient la troïlélite, non présente en général sur terre -météorites-), donc Fe_7S_8 au maximum

L'hypothèse fréquemment évoquée pour sa non-stoechiométrie est que la pyrrhotite contient du fer trivalent, ce qui donne donc en fait la formule suivante : $Fe_{1-y}^{II}Fe_{2y/3}^{III}S$

Pour Fe_7S_8 ($x=0,125$) on a donc $Fe_5^{II}Fe_2^{III}S_8$

La réaction globale à $pH > 2,5$ (précipitation de l'hydroxyde ferrique) est la suivante suivant deux cas :

x voisin de zéro (Troïlélite)



(autre écriture : $FeS + 9/4 O_2 + 5/2 H_2O \text{ donne } Fe(OH)_3 + SO_4^{2-} + 2H^+$)

x maximal (0,125): $Fe_5^{II}Fe_2^{III}S_8$ est aussi $Fe_{5/8}^{II}Fe_{2/8}^{III}S$ ou $Fe_{0,625}^{II}Fe_{0,25}^{III}S_8$

pyrrhotite_{monocl.} + 2,15625 O_2 + 2,3125 H_2O donne 0,875 $Fe(OH)_3$ + SO_4^{2-} + 2 H^+

(pyrrhotite_{monocl.} + 69/32 O_2 + 37/16 H_2O donne 7/8 $Fe(OH)_3$ + SO_4^{2-} + 2 H^+)

La pyrrhotite peut aussi se dissoudre simplement en milieu non oxydant acide selon le pH :

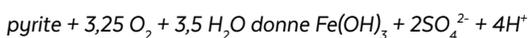
pyrrhotite_{monocl.} + 2 H^+ donne H_2S + 0,625 Fe^{2+} + 0,25 Fe^{3+}

ou, à pH plus élevé, pyrrhotite_{monocl.} + 0,25 H^+ + 0,75 H_2O donne HS^- + 0,625 Fe^{2+} + 0,25 $Fe(OH)_3$

(pyrrhotite_{monocl.} + 1/4 H^+ + 3/4 H_2O donne HS^- + 5/8 Fe^{2+} + 1/4 $Fe(OH)_3$)

Pyrite

L'oxydation de la pyrite FeS_2 :



(pyrite + 13/4 O_2 + 7/2 H_2O donne $Fe(OH)_3$ + 2 SO_4^{2-} + 4 H^+)

ANNEXE 2

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] G. Hotton, E. Bresson, B. Bussière I. Demers, P. Thomas, R. Philippe (2009). Assessment of CCBE Performance with Climate Change: Case Study of the Lorraine Mine Site. Proceedings Tailings and Mine Waste 2018, Keystone, Colorado, USA. September 30 - October 2, 2018
- [2] R. V. Nicholson, J.M. Sharer (1994). Laboratory Studies of Pyrrhotite Oxidation Kinetics
- Chapter in ACS Symposium Series « Environmental geochemistry of sulphides oxidation » DOI: 10.1021/bk-1994-0550.ch002
- [3] J. A. Rumball, M. R. Thorber, L. R. Davidson (1992). Controlling spontaneous combustion in pyritic black shale, Mt Whaleback iron ore mine, Western Australia. Proc. Int. Conf. Minerals, Metals and the Environment, IMM, Manchester, UK. Elsevier.
- [4] S. Cagnina (2014). Compréhension des mécanismes d'incompatibilité chimique du nitrate d'ammonium par modélisation moléculaire. Thèse de Doctorat en Chimie théorique et/ou physique. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI
- [5] <https://www.optris.fr/surveillance-d-une-fosse-a-dechets>
- [6] <https://dechets-infos.com/des-drones-pour-limiter-les-risques-d-incendie-4916657.html>
- [7] Communication orale, entreprise Solexperts. www.solexperts.com
- [8] https://fr.wikipedia.org/wiki/Terril#Combustion_interne_et_cons%C3%A9quences_environnementales
- [9] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pyrrhotite>
- [10] Normes-granulats-CT-G10.30-41.pdf Chapitre2 - Les constituants des bétons et des mortiers
- [11] M. Lévesque-Michaud (2016). Développement d'une méthode de prédiction cinétique du drainage neutre contaminé avec agent complexant: application au projet minier Blackrock. Mémoire de maîtrise EPM, Montréal, Canada
- [12] <https://pdfs.semanticscholar.org/151c/fdbe8a4a96cf931d215029168b33d85b583d.pdf>, pages 10 et 13
- [13] Product Safety Assessment DOW™
- [14] US-EPA 2017
- [15] <https://www.911metallurgist.com/pyrometallurgy/pyrrhotite-oxidation/>
- [16] Alaska Miners Association (2015). Dry Stack Tailing in Cold Climates. <https://www.srk.com/en/publication/na-dry-stack-tailings-cold-regions-opportunities-and-constraints>
- [17] M. Aubertin, T. Pabst, B. Bussière, M. James, M. Mbonimpa, M. Benzaazoua, A. Maqsood (2015). Revue technique des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA. Symposium sur l'environnement et les mines. Rouyn-Noranda.
- [18] A. Kalonji (2014). Etude du comportement hydrogéologique de couvertures avec effet de barrière capillaire faites entièrement de matériaux miniers. Mémoire de maîtrise EPM-UQAT, Montréal, Canada
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/Mount_Polley_mine_disaster
- [20] <https://roskill.com/news/graphite-imerys-closes-namibian-mine-amid-falling-flake-graphite-prices/>