

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

ÉCOLE DE GÉNIE

**DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODOLOGIE DE PRÉDICTION
ENVIRONNEMENTALE APPLIQUÉE À L'EXPLORATION MINIÈRE**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

ALBAN DUVERNOIS

MARS 2022



BIBLIOTHÈQUE

CÉGEP DE L'ABITIBI-TÉMISCAMINGUE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier ma directrice Isabelle Demers ainsi que mes co-directrices, Li Zhen Cheng et Carmen Mihaela Neculita, pour l'opportunité de prendre part à ce projet, leurs précieux conseils ainsi que leur aide apportée tout au long de ces deux années. Je souhaite également remercier toutes les personnes de l'IRME/URSTM qui m'ont aidé de près ou de loin pour ce projet, technicien(ne)s agent(e)s de recherche, professeur(e)s et employé(e)s de l'administration de l'UQAT.

Je tiens également à remercier les deux partenaires industriels de ce projet : Agnico Eagle en la personne de David Fortin et David Pitre ; et Ressources minières Radisson en la personne de Sylvain Doire ainsi que les équipes de Golder avec Alexis Baupré et Valérie Bertrand pour leurs disponibilité et réactivité.

Je souhaite également faire une mention spéciale à ma conjointe Valérie avec qui j'ai partagé ces deux dernières années et qui m'a supporté, même dans les périodes plus difficiles. Merci à mes ami(e)s avec qui j'ai pu échanger lors de nombreuses soirées et quelques verres. Ces moments de pause avec vous m'ont permis de reprendre de l'énergie tout au long de ce projet.

Enfin, je voudrais remercier ma famille, qui même à distance a réussi à m'offrir un soutien indéfectible, alors merci Maman, merci Papa, merci Charlène et merci Laurent. J'ai hâte de pouvoir vous accueillir ici très vite!

Je souhaiterais exprimer une pensée pour ma grand-mère, avec qui j'aurais aimé passer plus de temps et à qui je pense souvent.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	xi
RÉSUMÉ	xii
ABSTRACT	xiv
GLOSSAIRE	xvi
INTRODUCTION	1
Mise en contexte	1
Législation en vigueur	3
En amont d'un projet minier	3
Préparation à la réhabilitation et suivi environnemental	5
Un nouveau règlement : le REAFIE.....	6
Problématique	7
Objectifs	9
Structure du document	9
CHAPITRE 1: REVUE DE LITTÉRATURE	10
1.1. Les problématiques environnementales	10
1.1.1 Le Drainage Minier Acide (DMA).....	10
1.1.2 Action des neutralisants.....	12
1.1.3 Drainage Neutre Contaminé (DNC).....	13
1.2. Les étapes d'exploration minière	14
1.2.1 Le potentiel minéral	16

1.2.2 Campagnes de forages.....	16
1.2.3 Valorisation du projet.....	19
1.3. Approches de suivi environnemental précoces existantes	20
1.3.1 L'approche Géométallurgie-Minéralogie-Texture (GMT).....	20
1.3.2 L'échantillonnage.....	21
1.3.3 Description de l'ARDI	23
1.3.4 La coloration	25
1.4. Géologie des sites à l'étude	29
1.4.1 Contexte géologique.....	29
1.4.2 LaRonde Zone 5 de Agnico Eagle Mines Ltd	29
1.4.3 Projet O'Brien de Ressources Minières Radisson	33
CHAPITRE 2: MÉTHODOLOGIE	37
2.1. Échantillonnage.....	37
2.2. La Fluorescence X (FRX)	39
2.2.1 Principes théoriques	39
2.2.2 Application au projet.....	45
2.2.3 Traitement des données.....	47
2.3. L'imagerie hyperspectrale	48
2.3.1 Principes théoriques	48
2.3.2 Application au projet.....	52
2.3.3 Traitement des données.....	53
2.4. La macroscopie optique.....	56
2.4.1 Principes.....	56
2.4.2 Application au projet.....	56
2.5. La coloration des carbonates	57
2.5.1 Protocole	57
2.5.2 Préparation des solutions.....	59
2.5.3 Interprétation	59
2.6. La Diffraction des Rayons X (DRX).....	60

2.7. Récapitulatif	62
<i>CHAPITRE 3: RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES.....</i>	64
3.1. Présentation du projet	64
3.1.1 Description	64
3.1.2 Objectifs	65
3.1.3 Présentation des outils	65
3.2. Le LIBS	67
3.3. Identifications des fournisseurs	69
3.4. Définition des défis géométallurgiques.....	70
3.5. Synthèse.....	75
3.6. Poursuite du projet	77
<i>CHAPITRE 4: EVALUATION OF RAPID NONDESTRUCTIVE TOOLS FOR PRELIMINARY ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT AT THE EXPLORATION STAGE OF A MINING PROJECT.....</i>	78
4.1. Préambule :.....	78
4.2. Résumé :.....	78
4.3. Abstract.....	79
4.4. Introduction.....	80
4.4.1 Environmental risks.....	80
4.5. Materials and methods	83
4.5.1 Site A and site B presentation	83
4.5.2 Sample preparation.....	83
4.5.3 Analytical methods.....	84
4.6. Results	87
4.6.1 Site A.....	87
4.6.2 Site B.....	97

4.6.2.4 Site B carbonates staining	102
4.6.2.5 Site B conclusion.....	103
4.7. Discussion.....	104
4.8. Conclusion.....	106
4.9. Acknowledgements.....	107
4.10. References	90
<i>CHAPITRE 5: DISCUSSION</i>	<i>110</i>
<i>CHAPITRE 6: CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....</i>	<i>112</i>
<i>RÉFÉRENCES</i>	<i>116</i>
<i>ANNEXES.....</i>	<i>123</i>

LISTE DES FIGURES

FIGURE 0-1: LES 6 ÉTAPES DU PROCESSUS DU DÉVELOPPEMENT MINÉRAL (AMQ, 2020).....	1
FIGURE 0-2 DOMAINES D'APPLICATION DU RÈGLEMENT SUR L'ENCADREMENT D'ACTIVITÉS EN FONCTION DE LEUR IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT (REAFIE) (MELCC, 2020).....	7
FIGURE 1-1 : EXEMPLE DE SOLUBILITÉ DE CERTAINS MÉTAUX EN FONCTION DES VALEURS DE PH (CRAVOTTA, 2008).....	14
FIGURE 1-2 : DESCRIPTION DES ÉTAPES DE RESSOURCES ET RÉSERVES EN FONCTION DE LA CONFIANCE GÉOLOGIQUE D'UN PROJET (MODIFIÉ D'APRÈS ICM, 2014).....	15
FIGURE 1-3 : PHOTOGRAPHIE DES ÉCHANTILLONS DE LZ5 DANS LES BOÎTES DE CAROTTES (1.5M).....	17
FIGURE 1-4 : EXEMPLE DE MAILLAGE DE FORAGE SELON LES ÉTAPES DU PROJET D'EXPLORATION.....	19
FIGURE 1-5: PROCESSUS DE CARACTÉRISATION GMT (PARBHAKAR-FOX ET AL., 2011).....	21
FIGURE 1-6: COURBE THÉORIQUE DU NOMBRE D'ÉCHANTILLONS EN FONCTION DE LA TAILLE DU GISEMENT (STEFFEN ET AL., 1989).....	22
FIGURE 1-7 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES PARAMÈTRES D'ÉVALUATION DE L'ARDI (D'APRÈS PARBHAKAR-FOX, 2012).....	24
FIGURE 1-8 PROCÉDURE DE COLORATION DES CARBONATES (MODIFIÉE SELON WARNE, 1962).....	27
FIGURE 1-9: LOCALISATION DES DEUX SITES À L'ÉTUDE (GOOGLE EARTH, 2021).....	30
FIGURE 1-10: GÉOLOGIE DU CAMP MINIER DOYON-BOUSQUET-LARONDE (D'APRÈS MERCIER-LANGEVIN ET AL., 2017).....	31
FIGURE 1-11: STRATIGRAPHIE SIMPLIFIÉE DES PROPRIÉTÉS WESTWOOD, ELLISON ET BOUSQUET MONTRANT LES ZONES MINÉRALISÉES DU PROJET LZ5 (D'APRÈS BOILY-AUCLAIR ET AL., 2020)	32
FIGURE 1-12: CARTE STRATIGRAPHIQUE DE LA CEINTURE DE ROCHES VERTES DE L'ABITIBI (WILLIAMSON, 2019).....	35
FIGURE 1-13: SYNTHÈSE STRATIGRAPHIQUE DU CAMP MINIER DE CADILLAC MODIFIÉ D'APRÈS LAFRANCE ET AL. (2003A, 2003B) (KENNETH WILLIAMSON (3DGEO-SOLUTION), 2019).....	36
FIGURE 2-1 : IDENTIFICATION ET RANGEMENTS DES CAROTTES DE FORAGE.....	38
FIGURE 2-2 :LONGUEURS D'ONDES DES RAYONS X (BROUWER, 2003).....	39
FIGURE 2-3 : INTÉRACTION DES RAYONS-X AVEC LA MATIÈRE (BROUWER, 2003).....	40
FIGURE 2-4 : IMAGE SCHÉMATIQUE DE LA COMPOSTION D'UN APPAREIL PORTATIF DE FRX (MODIFIÉ D'APRÈS (ADAMS ET AL., 2020).....	41

FIGURE 2-5 : EFFETS DE RAYLEIGH (A) ET DE COMPTON (B) ATTÉNUANT L'EFFICACITÉ DE LA FLUORESCENCE X (BROUWER, 2003).....	43
FIGURE 2-6 : VUE D'ENSEMBLE DE L'APPAREIL FRX NITON XL3T 900SHE. (VILLENEUVE, 2015)	45
FIGURE 2-7 : EXEMPLES DE POINTS D'ANALYSES POUR LA FRX SUR UN ÉCHANTILLON DE LA SÉRIE LARONDE ZONE 5	47
FIGURE 2-8: COMPARATIF DES DIFFÉRENTS MODES D'IMAGERIE (MIDLETON SPECTRAL VISION, 2021)	48
FIGURE 2-9 : GAMME DE LONGUEURS D'ONDE RELATIVE AU CHAMP DE L'HYPERSPECTRAL (EDMUNDOPTICS, 2021).....	49
FIGURE 2-10: APPAREIL ROCK (2/3 SENSOR) DE LA COMPAGNIE TERRACORE (TERRACORE, 2021)	50
FIGURE 2-11 : COMPOSITION D'UN APPAREIL PORTATIF TERRASPEC HALO ASD (ASD INC., 2017).....	52
FIGURE 2-12: CAPTURE D'ÉCRAN D'UN RÉSULTAT D'ANALYSE TYPE (ASD INC., 2017).....	54
FIGURE 2-13: VISUEL DU MICROSCOPE AXIO ZOOM V16 (ZEISS, 2011)	57
FIGURE 2-14 : PROPOSITION D'ANALYSE DES CARBONATES PAR COLORATION (PARBHAKAR-FOX ET AL., 2017).....	58
FIGURE 2-15: DIFFRACTION DES RAYONS X SELON LA LOI DE BRAGG (TRUCHE 2010)	61
FIGURE 2-16: : EXEMPLE DE DIFFRACTOGRAMME TRAITÉ (DONNÉES EN BLEU ET MODÈLE EN ROUGE)..	62
FIGURE 2-17: DIAGRAMME SYNTHÉTIQUE DE L'APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DU PROJET (DONNÉES FOURNIES PAR L'INDUSTRIE À GAUCHE ET DONNÉES RÉCOLTÉES AU COURS DU PROJET À DROITE)	63
FIGURE 3-1 : DÉFINITION DU SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE (SCHOOLMOUV, 2020)	66
FIGURE 3-2: PRINCIPE DU LIBS (QUANTUM RX, 2021).....	67
FIGURE 3-3 : PRINCIPAUX FOURNISSEURS CONTACTÉS LORS DE LA PHASE DEUX DU PROJET	69
FIGURE 3-4 : LOGIGRAMME REPRÉSENTANT LES DIFFÉRENTS DÉFIS IDENTIFIÉS LORS DU PROJET MITACS	71
FIGURE 3-5 SYNTHÈSE DE L'EFFICACITÉ DES OUTILS ÉTUDIÉS SELON CHACUN DES VOILETS	76
FIGURE 4-1 : COMPARISON OF OXIDE CONCENTRATIONS BETWEEN ICP AND XRF MEASUREMENTS OF DIFFERENT LITHOLOGIES FOR SITE A.....	89
FIGURE 4-1 : COMPARISON OF OXIDE CONCENTRATIONS BETWEEN ICP AND XRF MEASUREMENTS OF DIFFERENT LITHOLOGIES FOR SITE A.....	90
FIGURE 4-2 : COMPARISON OF CONCENTRATIONS OF SELECTED ELEMENTS BETWEEN ICP AND XRF MEASUREMENTS FOR SITE A.....	92
FIGURE 4-3 : PYRAMIDAL PLOT FOR MINERAL CONTENT COMPARISON FOR SITE A	95
FIGURE 4-4: SITE A CARBONATES IDENTIFICATION THROUGH STAINING.....	96
FIGURE 4-5 :SITE B XRF OXIDE MEASUREMENTS.....	98
FIGURE 4-6 : SITE B XRF ELEMENTAL MEASUREMENTS	99

FIGURE 4-7 : SITE B SPECTROMETER MINERAL ESTIMATIONS	102
FIGURE 4-8: SITE B CARBONATES IDENTIFICATION THREW STAINING (N.S.: NOT STAINED; S: STAINED)	103
FIGURE 8-1 : EXEMPLES DE L'ÉVALUATION DU PARAMÈTRE B DE L'ARDI SELON LE DEGRÉ D'ALTÉRATION DES SULFURES DE FER. D'APRÈS LA FIGURE 2.7 (PARBHAKAR-FOX, 2012)	125
FIGURE 8-2 : EXEMPLES DU PARAMÈTRE C DE L'ARDI CONCERNANT L'ANALYSE DE LA MORPHOLOGIE ET LA TEXTURE DES SULFURES. D'APRÈS LA FIGURE 2.8 (PARBHAKAR-FOX, 2012).....	126
FIGURE 8-3 : EXEMPLES DU PARAMÈTRE D DE L'ARDI ÉVALUANT LA MINÉRALOGIE ENTOURANT LES GRAINS DE SULFURES. D'APRÈS LA FIGURE 2.9 (PARBHAKAR-FOX, 2012).....	127
FIGURE 8-4 : EXEMPLE DU PARAMÈTRE E DE L'ARDI ÉVALUANT LES ASSOCIATIONS MINÉRALES DES GRAINS DE SULFURES INDIVIDUELS. D'APRÈS LA FIGURE 2.10 (PARBHAKAR-FOX, 2012).....	128

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1-1 : RÉACTIVITÉS RELATIVES DES MINÉRAUX NEUTRALISANTS (MODIFIÉ DE KWONG (1993))	13
TABLEAU 1-2 : IDENTIFICATION DES COULEURS SPÉCIFIQUES DES CARBONATES APRÈS COLORATION (MODIFIÉ D'APRÈS HITZMAN, 1999).....	28
TABLEAU 2-1 : EXTRAIT DU TABLEAU PÉRIODIQUE AVEC LES ÉNERGIES DE RAYONS X (TABLEAU COMPLET EN ANNEXE 8-5 ; BRUKER, 2020)	40
TABLEAU 2-2 : TABLE RÉCAPITULATIVE DES ÉLÉMENTS ANALYSÉS (<i>TEST ALL GEO</i>).....	47
TABLEAU 2-3 : IDENTIFICATION MINÉRALOGIQUE SELON LES DOMAINES HYPERSPECTRAUX (SPECIM, 2017).....	51
TABLEAU 2-4: COMPARAISON DES MINÉRAUX BRUTS (ORANGE) ET TRAITÉS PAR LOGICIEL (VERT) IDENTIFIÉS PAR LE TERRASPEC.....	55
TABLEAU 2-5: IDENTIFICATION DES CARBONATES EN FONCTION DES RÉACTIFS UTILISÉS (CSD, 2015). 60	
TABLEAU 3-1 : IDENTIFICATION DES DOMAINES DE LONGUEURS D'ONDE.	66
TABLEAU 3-2: LONGUEURS D'ONDES (NM) DE CERTAINS ÉLÉMENTS MAJEURS À GAUCHE ET MÉTALLIQUES À DROITE OBTENUS AVEC LA TECHNOLOGIE LIBS (HARMON ET AL 2019).	68
TABLEAU 4-1 : XRF ACQUISITION PARAMETERS	84
TABLEAU 4-2 : IDENTIFICATION OF STAINED CARBONATES (MODIFIED FROM PARBHAKAR-FOX ET AL., 2017).....	86
TABLEAU 4-3 : MATCHING GROUPS BETWEEN MINERAL SPECTROMETER AND XRD RESULTS	87
TABLEAU 4-4: MINERALS IDENTIFIED DURING THE LOGGING PROCESS CLASSIFIED BY LITHOLOGIES	93
TABLEAU 4-5 : MINERALS IDENTIFIED BY VISUAL IDENTIFICATION AND BY SPECTROMETER AFTER TREATMENT CLASSIFIED BY LITHOLOGY.	101
TABLEAU 8-1 :PARAMÈTRE A DE L'ARDI (MÉSO ET MICROSCALE) (D'APRÈS PARBHAKAR-FOX,2012)	124

RÉSUMÉ

L'évaluation environnementale se réalise de manière systématique lorsqu'un projet minier est à une étape avancée de son développement. Cette évaluation est réalisée à l'aide de nombreux essais de laboratoire (tests statiques et cinétiques) qui peuvent être long et coûteux et demandent un grand nombre d'échantillons pour être considérés représentatifs. Dans une démarche de caractérisation géoenvironnementale optimale, il est important de pouvoir réduire le nombre d'échantillons nécessaire sans pour autant limiter la qualité de l'information. Le développement de nouveaux outils d'acquisition de données dans un objectif de caractérisation géométallurgique et géoenvironnemental s'accélère depuis les dernières années et de nouveaux axes de recherche sur la prédiction du drainage minier acide émergent dans les centres de recherche. Ce projet s'aligne dans cet axe et propose l'établissement d'une méthodologie utilisant des outils d'analyse rapides et non destructifs pour effectuer un examen préliminaire du risque environnemental lors de l'étape de l'exploration minière. Après une étude des différents outils, de leur potentiel, leurs limitations et leur applicabilité à ce projet, trois outils ont été sélectionnés pour faire partie de la méthodologie à l'essai : la fluorescence X, la spectrométrie minérale et la coloration des carbonates. En complément de ces analyses, un microscope binoculaire automatisé a été utilisé pour évaluer les points d'intérêts des échantillons sélectionnés. Afin d'appliquer cette méthodologie, deux sites sont à l'étude, 1) le site A, LaRonde zone 5, étant une mine déjà bien développée avec un jeu de données disponible conséquent, est analysé dans une optique de mise à l'épreuve de la méthodologie en la comparant avec des données géochimiques et minéralogiques obtenues en amont; 2) le site B, le projet O'Brien, est un projet encore à l'étape d'exploration avec un accès limité aux données géochimiques. Ce dernier permet d'appliquer la méthodologie et ainsi réaliser une évaluation environnementale préliminaire. Cette première évaluation permet d'établir une classification du risque environnemental en fonction des lithologies analysées et ainsi réduire le nombre d'échantillons nécessaires pour une évaluation du risque environnemental complète en se concentrant sur les lithologies jugées à risque significatif.

Les résultats des analyses avec les méthodes proposées pour le site A à l'étude ont démontré une bonne correspondance avec les résultats d'analyses détaillées déjà disponibles. Ainsi, l'application de la fluorescence X, la spectrométrie minérale et la coloration des carbonates a identifié deux lithologies avec un risque environnemental pour le site B, soit les unités de basalte et d'andésite. Il est donc recommandé de poursuivre les investigations environnementales avec un emphase plus particulier sur ces lithologies.

Finalement, l'utilisation de cette méthodologie est à titre indicative et se doit d'être accompagnée d'essais plus poussés afin de pouvoir conclure sur le véritable

potentiel de génération d'acide. Il peut également être couplé à d'autres outils d'analyse afin d'améliorer le portrait géoenvironnemental du site à l'étude.

Mots clés : Évaluation environnementale; carottes de forage; drainage minier acide; fluorescence X; spectrométrie minérale; coloration des carbonates

ABSTRACT

The environmental assessment is carried out systematically when a mining project is at an advanced stage of its development. This evaluation is performed using numerous laboratory tests (static and kinetic tests) which can be long and expensive and requires a large number of samples to be considered representative. In an optimal geoenvironmental characterization process, it is important to be able to reduce the number of samples required without reducing the quality of the information. The development of new data acquisition tools for geometallurgical and geoenvironmental characterization purposes has accelerated in recent years and new lines of research on the prediction of acid mine drainage are emerging in research centers. This project follows this axis and proposes the establishment of a methodology using rapid and non-destructive analysis tools to perform a preliminary examination of the environmental risk during the mining exploration stage. After a study of the potential, the limitations and the applicability of different tools currently available for this project, three of these were selected to be part of this methodology: X-ray fluorescence; mineral spectrometry and carbonate staining. In addition to these analyses, an automated binocular microscope was used to assess the points of interest of the selected samples. In order to apply this methodology, two sites were studied, 1) Site A, LaRonde zone 5, an already well-developed mine with a large set of data available, is analyzed with the scope of testing the methods by comparing it with geochemical and mineralogical data obtained upstream; 2) Site B, the O'Brien project, is in an advanced exploration stage with limited access to geochemical data. On the latter the current methodology was applied and allowed to carry out a preliminary environmental assessment. This first assessment makes it possible to establish an environmental risk classification according to the lithologies analyzed and thus reduce the number of samples necessary for a complete environmental risk assessment by focusing on lithologies considered to be of significant risk.

The results of the analyzes with the tools proposed for the site A showed good correspondence with the results of detailed analyzes already available. Thus, the application of X-ray fluorescence, mineral spectrometry and carbonate staining identified two lithologies with an environmental risk for the site B, respectively the basalt and andesite units. It is therefore advised to continue the environmental investigations with an emphasis on these lithologies.

Finally, the use of this methodology is indicative and must be coupled with further testing to be able to conclude on the true potential of acid generation. It can also be combined with other analysis tools to improve the geoenvironmental picture of the site under study.

Keywords: Environmental assessment; core analysis; contaminated mine drainage; XRF, mineral spectrometry, carbonate staining

GLOSSAIRE

AEM : Agnico Eagle Mines	GA : Générateur d'acide
AiSIRIS : Artificial intelligence	Gl : Galène
Spectral InfraRed Interpretation System	GMT : Géométallurgie-Minéralogie-Texture
Al : Aluminium	GPS : Global Positioning System (système de positionnement global)
AMD : Acid Mine Drainage	Hf : Hafnium
ANC : Acid Neutralising Capacity (capacité neutralisante d'acide)	IRME : Institut de recherche en mines et Environnement
ARD : Acid Rock Drainage	K : Potassium
ARDI : Acid Rock Drainage Index	LIBS : Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (Spectrométrie d'émission atomique de plasma induit par laser)
ARS : Alizarin red-S	LQE : Loi sur la Qualité de l'environnement
As : Arsenic	LWIR : Long Wave InfraRed (infrarouge à ondes longues)
Asp : Arésnopyrite	LZ5 : LaRonde Zone 5
Au : Or	MELCC : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques
Cal : Calcite	MERN : Ministère des Énergies et des Ressources Naturelles
Cl : Chlore	MISA : Mines, Innovations, Solutions, Applications
CMD : Contaminated Mine Drainage	Mg : Magnésium
CSD : Centre de Service et de Développement de la compagnie AEM	Mn : Manganèse
CSIRO : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	MWIR : Mid Wave InfraRed (infrarouge à ondes moyennes)
Cu : Cuivre	Na : Sodium
DBL : Camp minier Doyon-Bousquet-Laronde	NAF : Non Acid forming (non générateur d'acide)
DGGQ : Direction générale de Géologie Québec	NGA : Non générateur d'acide
DMA : Drainage minier Acide	
DNC : Drainage Neutre contaminé	
DRX : Diffraction des rayons X	
EAF : <i>Extremly Acid Forming</i> / Fortement générateur d'acide	
FRX : Fluorescence des Rayons X	

Ni : Nickel	RQD : Rock Quality Designation (Désignation de la qualité de la roche)
O : Oxygène	S : Soufre
P : Phosphore	SDD : Silicon Drift Detector
PAF : Potentially Acid forming (Potentiellement générateur d'acide)	SENV : Système de suivi environnemental
Pb : Plomb	Si : Silice
PEA : Preliminary Economic Assessment (Évaluation économique préliminaire)	SIGÉOM : Système d'information géominière du Québec
PF : Potassium Ferricyanide (Ferricyanure de potassium)	SNRC : Système National de Référence Cartographique
PFS : Pre-Feasibility Study (Étude de pré faisabilité)	SWIR : Short wave infrared (infrarouge à ondes courtes)
PGA : Potentiellement Générateur d'acide	Ti : Titane
PN : Potentiel Neutralisant	Ta : Tantale
Py : Pyrite	UQAT : Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
QA : Quality Assessment (assurance qualité)	URSTM : Unité de recherche et de service en technologie minérale
QC : Quality Control (contrôle qualité)	Vc : Volcanic matrix
QFP : Quartz-Feldspar Porphyry	VNIR : Visible Near InfraRed (visible proche infrarouge)
Qtz : Quartz	Fe-ox : Hydroxydes de fer
REAFIE : Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement	XRF : X-Ray Fluorescence (fluorescence des rayons X)
RMR : Ressources Minières Radisson	Zn : Zinc

INTRODUCTION

Mise en contexte

Un cycle de vie de mine présente six phases distinctes : 1) la prospection; 2) l'exploration; 3) la mise en valeur du projet; 4) l'exploitation et l'extraction du minéral; 5) la fermeture et la restauration du site; et 6) le suivi environnemental (AMQ, 2020). Ces phases sont représentées dans la Figure 0-1.

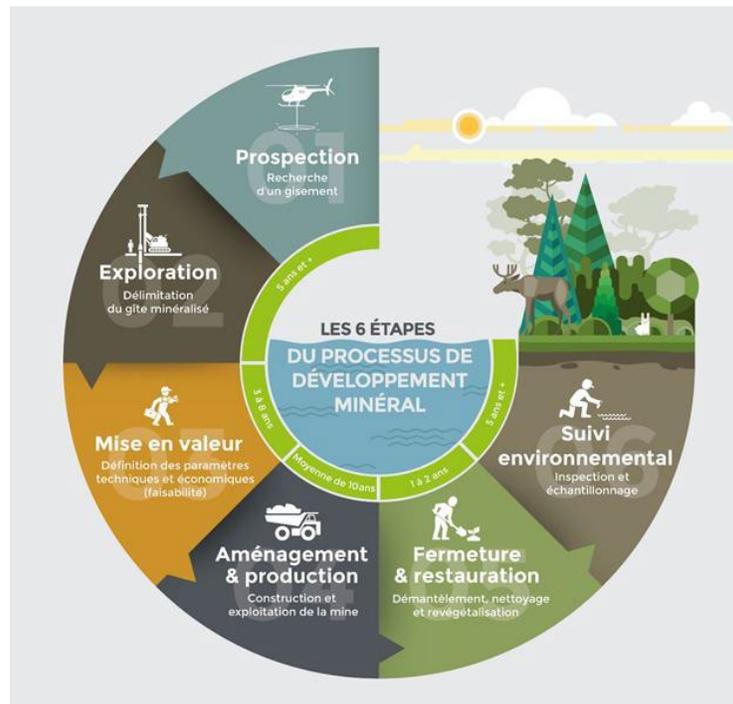


Figure 0-1: Les 6 étapes du processus du développement minéral (AMQ, 2020)

Les opérations minières ont un impact environnemental non négligeable et sont souvent perçues négativement par la population. En effet, l'industrie minière est associée à différents problèmes environnementaux en particulier à partir de la phase 4 du cycle minier (Figure 0-1). L'instabilité géochimique des rejets miniers, par

exemple, peut produire du drainage minier acide, du drainage neutre contaminé ou d'autres types de contamination issues des eaux de procédés (cyanures et dérivés, azote ammoniacal thiosels et autres contaminants) (Bussière & Guittonny, 2021). Il en va de même de l'instabilité géotechnique, pouvant conduire à des événements catastrophiques tels que les ruptures de barrages, des poussières émises ou encore du déversement d'eaux contaminées (provenant de diverses sources de contamination [As, Zn, Cu, Pb, etc.]). De fait, les minières génèrent des rejets liquides et solides représentant de grands volumes produits annuellement et qui doivent être entreposés adéquatement.

Toutes les aires d'entreposage doivent aujourd'hui être réhabilitées par les compagnies minières. Ces dernières sont tenues de prévoir en tout temps un budget destiné à la réhabilitation (à 100 %) de leurs parcs à résidus, et ce avant de pouvoir commencer leur exploitation. Ces mesures n'étant obligatoires que depuis 2013 avec la révision de la loi sur les mines (Loi sur les mines, 2021), le Québec compte plusieurs centaines de sites abandonnés. Il est estimé que le gouvernement du Québec devra dépenser au minimum 1200 millions de dollars pour leur réhabilitation (MERN, 2020b).

Cela met en évidence l'enjeu économique lié à la réduction de l'impact environnemental des mines. À cet effet, plusieurs études ont montré la pertinence des principes de gestion intégrée des rejets miniers (Benzaazoua et al., 2008, Broadhurst et al., 2018) et de conception pour la fermeture (*Designing for closure*) (développé depuis la fin des années 1970) (Marsland & Wylie, 1998).

Des travaux de recherche intensifs sont en cours, au Canada et ailleurs dans le monde, afin de mieux comprendre et résoudre les problèmes identifiés précédemment, comme la compréhension des interactions entre chaque étape du cycle minier et l'optimisation de la gestion des données obtenues lors des différentes phases (Lishchuk et al., 2020).

Aujourd'hui, la technologie est au cœur de l'innovation dans le monde de minier et son développement est de plus en plus orienté vers les problèmes environnementaux de l'exploitation minière. Elle a permis d'améliorer les méthodes d'évaluation des sources de pollution et a motivé les entreprises à revoir et mettre à jour les techniques d'exploitation (A. Beauséjour, D.G. MISA, communication personnelle, 2020). Ce faisant, les entreprises cherchent à augmenter l'efficacité de leur production et à minimiser les risques environnementaux tout en économisant sur les frais relatifs à la remise en état des sites lors de la phase de fermeture des mines.

Cet aspect intéresse de plus en plus les investisseurs, qui demandent à connaître le risque environnemental afin de juger de la viabilité du projet. De plus, la réglementation québécoise demande aujourd'hui des études d'impacts environnementaux de plus en plus pointues et exigeantes avant de donner les certificats d'autorisation pour opérer une mine.

De plus, l'acceptabilité sociale d'un projet minier est aujourd'hui un facteur clé dans la réussite d'un projet minier. Il est important de fournir des efforts auprès des communautés environnantes dans le cadre de la protection et la préservation de la faune et de la flore. Les compagnies se doivent, lors des discussions avec la population, de présenter les risques environnementaux ainsi que les mesures préventives qui vont être prises pour les prévenir.

Législation en vigueur

En amont d'un projet minier

Dans le cadre d'un projet minier, une compagnie doit suivre les directives des articles 20 à 23 de la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE) (chapitre Q-2) (modifiée en 2018) donnant accès à une autorisation d'exploitation du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) (Loi sur la qualité de l'environnement, 2021). Afin de respecter cette législation, une étude

d'impact environnementale est réalisée au sein de l'étude de préféabilité lors de la phase de développement du projet. Selon le MELCC, « effectuer une évaluation environnementale correspond au processus qui intègre des considérations environnementales et prend en compte des caractéristiques du milieu humain dans la planification des projets, permettant ainsi qu'ils soient réalisés tout en assurant la protection et la conservation des milieux de vie. Ce processus permet de colliger, de traiter, d'analyser et d'interpréter les impacts afin d'évaluer l'acceptabilité environnementale des projets et de préparer les décisions et leur mise en œuvre. » (MELCC, 2018)

En complément de cette étude, la Directive 019 sert de support aux spécialistes en environnement tout au long de la vie de la mine (de l'exploitation à la fermeture). La première version date de mai 1989 et énonçait les exigences environnementales auxquelles devaient se soumettre les projets miniers. En avril 2005, cette directive fut modifiée afin de mieux encadrer les nouveaux projets et également préciser la gestion sécuritaire des résidus miniers. La version actuelle de la Directive 019 date de 2012 et prend dorénavant en compte le système de suivi environnemental (SENV) du MELCC ainsi que de nouvelles mises à jour (MDDEP, 2012). Elle comporte deux objectifs majeurs qui sont:

- 1) Présenter les balises environnementales retenues et les exigences de base requises pour les différents types d'activités minières, de façon à prévenir la détérioration de l'environnement et 2) Fournir aux intervenants du secteur minier les renseignements nécessaires à l'élaboration de l'étude d'impact ou de répercussions environnementales préalable à une demande de certificat d'autorisation pour un nouveau projet ou à une demande de certificat d'autorisation pour la modification d'un projet existant.

Il est à noter que cette directive n'est pas un texte réglementaire, elle permet d'orienter la compagnie dans ses décisions afin de respecter les normes environnementales en vigueur comme la LQE.

L'un des aspects principaux de la Directive 019 est l'utilisation des Objectifs Environnementaux de Rejet (OER) qui consistent à évaluer l'impact des opérations sur l'effluent final et au besoin, exiger des travaux d'assainissement, modifier l'effluent final ou encore modifier et optimiser les pratiques d'exploitation. Lors des travaux d'exploration, l'utilisation de ces OER n'est pas obligatoirement requise, mais pour le bon déroulement de la phase de développement il est intéressant d'anticiper ces objectifs de rejets dès l'exploration pour mieux diminuer l'impact sur l'effluent final (Gélineau et al., 2009).

D'autres lois et règlements principalement au niveau fédéral sont applicables comme le Règlement sur les effluents des mines de métaux et des mines de diamant (REMM, 2002, dernière mise à jour, 2021) ou encore des lois sur la sécurité des barrages, ou sur l'utilisation des matières dangereuses par exemple. Ces réglementations sont nécessaires au développement du projet minier et font partie de la phase de mise en valeur du projet (Figure 0-1).

Préparation à la réhabilitation et suivi environnemental

Aujourd'hui toute compagnie minière se doit de préparer son plan de réhabilitation lors de l'étude de faisabilité de son projet, ce qui implique l'utilisation de données environnementales partielles obtenues menant à cette prise de décision. Elle se doit également d'avoir les fonds suffisants pour réhabiliter son site en tout temps si elle doit cesser son activité d'extraction en avance. Pour se faire, l'industrie entretient des liens étroits avec les universités afin de pouvoir développer des projets de recherches dans le domaine de l'environnement minier et être à la pointe de l'innovation. De plus, des mises à jour du plan de réhabilitation sont organisées

régulièrement au cours de la phase d'exploitation. Cela permet d'intégrer de nouvelles informations sur le dépôt ou sur les méthodes d'entreposage par exemple.

Un nouveau règlement : le REAFIE

Depuis le 31 décembre 2020, le MELCC a mis en place le Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement (REAFIE) et qui va permettre d'encadrer les activités d'exploration minière en se basant sur la LQE. Ce document fait partie du plan de modernisation du régime d'autorisation environnementale actuellement développé par ce Ministère.

Ce règlement a pour objectif de mettre un cadre d'autorisation environnemental clair, prévisible et optimisé pour les acteurs du secteur minier tout en s'assurant du respect des exigences environnementales (MELCC, 2020).

- Il va permettre de catégoriser les niveaux de risque environnemental, et ainsi permettre d'aiguiller les acteurs vers les différents processus d'évaluation environnementale adaptés à leurs projets (Figure 0-2).
- Les activités présentant un risque environnemental élevé sont soumises à la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement.
- Les activités présentant un risque environnemental modéré sont encadrées par des autorisations ministérielles.
- Les activités présentant un risque environnemental faible sont admissibles à une déclaration de conformité de la part de l'initiateur de projet.
- Les activités présentant un risque environnemental négligeable sont exemptées d'une autorisation

Afin de pouvoir appliquer ce règlement le Ministère a développé un guide de référence à destination des utilisateurs soumis à cette nouvelle législation (MELCC, 2021)

Niveau de risque environnemental	Mécanisme d'encadrement
<p>Élevé Autorisation gouvernementale Les projets à risque élevé peuvent être soumis à une audience publique tenue par le Bureau d'audience publique sur l'environnement (BAPE)</p>	<p>Règlement relatif à l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement de certains projets (REEIE) (en vigueur depuis le 23 mars 2018)</p>
<p>Modéré Autorisation ministérielle</p>	<p>REAFIE</p>
<p>Faible Déclaration de conformité</p>	<p>REAFIE</p>
<p>Négligeable Exemption</p>	<p>REAFIE</p>

Figure 0-2 Domaines d'application du règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement (REAFIE) (MELCC, 2020)

Problématique

L'exploitation des minerais génèrent beaucoup de résidus pouvant avoir un impact négatif sur la qualité du sol et des effluents de surface. Ces contaminations en plus d'être un héritage du passé sont un enjeu pour les mines en production et les projets miniers actuels et devront être mieux gérées. Elles peuvent provenir de diverses sources comme l'activité minière en tant que telle, l'activité industrielle sur site, l'extraction et la transformation du minerai, l'enfouissement des déchets ou encore la génération de contaminants pouvant migrer par les eaux de ruissellement et les eaux souterraines (Lottermoser, 2007, 2010).

Les décisions par rapport à l'extraction, le traitement, la gestion des rejets et la restauration doivent être prises avant le début des opérations, avec les informations disponibles. La qualité des données influence significativement les choix qui seront faits. Les aspects environnementaux sont souvent négligés ou sous-estimés aux

premières étapes du cycle minier. Mieux considérer les aspects environnementaux permettrait de réduire les risques associés aux projets miniers.

De plus en plus, de travaux de recherche universitaire en partenariats avec des industriels miniers sont développés afin de répondre aux normes environnementales grandissantes du gouvernement et de la société. Ainsi des pôles d'expertise en environnement minier, comme la restauration minière, voient le jour à travers le monde dans les provinces minières matures (Canada, Australie ou encore Europe du Nord).

Malgré la variété des thématiques traitées en termes d'environnement minier, la notion de prédiction du risque n'est que peu abordée. Il s'agit d'une notion récente développée depuis les années 2010, notamment en Europe avec les travaux de Dold et Lottermoser sur les indicateurs environnementaux dans le monde minier (Dold, 2008; B. G. Lottermoser, 2017), et en Australie avec les travaux sur de nouvelles approches environnementales de Parbhakar-Fox dans les dernières années (Parbhakar-Fox, 2012). Pourtant, la démarche d'anticipation et de prédiction du risque peut orienter les décisions de gestion des résidus et des contaminants permettant de ne plus seulement résoudre le problème, mais de potentiellement le réduire voire l'éviter (Dold, 2015).

La question environnementale dans un contexte d'exploration minière est un défi particulier, car le nombre d'échantillons est peu élevé (carottes de forages), le budget est alloué en priorité à la définition des ressources et la durée des essais environnementaux est longue avant d'avoir des résultats significatifs. En valorisant les échantillons produits dans les premières phases d'un cycle de vie minier comme l'exploration et en utilisant des outils d'analyses rapides, peu coûteux et non destructifs, une pré-évaluation du risque environnemental pourrait être réalisée (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015).

Objectifs

L'objectif du projet de recherche de cette maîtrise vise l'établissement d'une méthodologie d'identification des facteurs de risques environnementaux au sein de l'étape d'exploration minière. Les objectifs spécifiques sont : 1) l'identification des facteurs qui potentiellement mènent à la génération de Drainage Minier Acide (DMA), de Drainage Neutre Contaminé (DNC), et de contamination des eaux de procédés, au sein du processus minier. 2) la réalisation d'une série d'analyses peu coûteuse sur les carottes de forages provenant de deux sites miniers distincts, afin de décrire les risques environnementaux de façon concrète.

Structure du document

Ce mémoire de maîtrise est divisé en 6 chapitres.

En premier lieu, une introduction met en contexte le projet et le domaine d'étude ainsi que la problématique et les objectifs du projet. Le premier chapitre présente une revue de littérature des concepts abordés dans cette étude. Un bref résumé sur le processus d'exploration minière; les sources principales de pollution de l'eau de surface issue de l'exploitation minière; et les méthodes conventionnelles de la gestion des eaux usées.

Le second chapitre met en scène les outils de loggage automatisés disponibles et leur potentiel d'utilité dans la prédiction des risques environnementaux. Ce chapitre présente le rapport du projet de stage en entreprise (stage MITACS) qui a été réalisé durant ce projet de recherche. Le chapitre trois décrit la méthodologie adoptée afin de mener à bien ce projet, ainsi que les outils utilisés dans le cadre des analyses. Ces résultats ont permis de guider l'approche utilisée pour le projet de maîtrise.

Le chapitre quatre présente les résultats sous la forme d'un article scientifique; le chapitre cinq propose une discussion sur la globalité de ce projet et le chapitre six propose une conclusion et les recommandations de poursuite du projet.

CHAPITRE 1: REVUE DE LITTÉRATURE

Lors d'une approche géoenvironnementale d'un projet, il est important de comprendre les mécanismes gouvernant les principales problématiques liées à l'environnement, mais également les solutions avec notamment la réactivité des carbonates limitant le drainage minier acide. La documentation de ce genre d'informations se déroule de manière générale lors des étapes avancées d'un projet de développement minier. En comprenant les jalons régissant l'exploration minière, il devient possible de réfléchir à la pertinence d'avancer les études environnementales préliminaires afin d'optimiser la prise de décision du côté des équipes en environnement et ainsi limiter les coûts et délais avant le démarrage des opérations car les processus peuvent durer entre 2 à 5 ans selon le type de projet pour obtenir les permis. Plusieurs outils ont été développés dans les dernières années visant l'anticipation et la prédiction du risque environnemental. Ces approches viennent en amont des essais classiques de type statiques et cinétiques mais permettent de réduire le nombre de ces tests nécessaires pour établir un modèle géoenvironnemental. Enfin, afin de pouvoir adapter au mieux la méthodologie d'identification des risques environnementaux, il est important de bien identifier le contexte géologique des sites à l'études.

1.1. Les problématiques environnementales

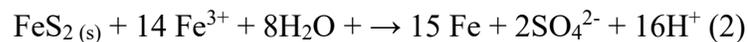
1.1.1 Le Drainage Minier Acide (DMA)

Le drainage minier acide (DMA) est une grande problématique parmi les plus limitantes dans le contexte environnemental d'un projet minier. C'est pourquoi il est essentiel de bien caractériser le DMA et d'anticiper sa formation afin de gérer au mieux son impact sur l'environnement par des moyens de prévention. Les deux minéraux majoritairement acteurs du DMA sont la pyrite et la pyrrhotite dans le contexte géologique de l'Abitibi (Bussière & Guittonny, 2021). La pyrite s'oxyde en

présence d'eau et d'oxygène (Équation 1) provoquant une acidification du milieu où elle se trouve (Aubertin et al., 2002).



Le DMA se caractérise par une baisse du pH associée à des concentrations élevées des sulfates et des métaux dissous. La génération du DMA peut se détailler en trois phases distinctes. Lors de la première étape (oxydation directe) la pyrite va s'oxyder. En présence d'oxygène et de l'eau, le soufre génère de l'acide sulfurique et libère ainsi des ions Fe^{2+} , qui s'oxydent ensuite en ions Fe^{3+} . Le pH va alors diminuer progressivement passant d'un milieu neutre à un milieu acide. Tant que le pH demeure supérieur à 3-3,5, le Fe^{3+} précipite sous la forme de hydroxyde ferrique $[\text{Fe}(\text{OH})_3]_{(s)}$, augmentant ainsi l'acidité générée dans la solution. La phase deux correspond à l'épuisement des minéraux neutralisants, permettant au pH de continuer de diminuer. La phase trois (oxydation indirecte, à pH inférieur à 3-3,5) marque le début de la génération de DMA où le Fe^{3+} (qui ne précipite plus et s'accumule en solution) va oxyder directement la pyrite et générer ainsi 16 moles de H^+ (Équation 2)

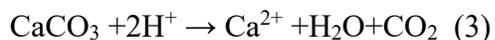


Cette réaction, qui va s'autoentretenir tant que l'un des constituants (pyrite, Fe^{3+} , eau, oxygène) ne s'épuise pas (B. G. Lottermoser, 2010), peut alors durer plusieurs centaines voire des milliers d'années. La pyrrhotite, quant à elle, a le même effet, mais avec un taux d'oxydation de 20 à 100 fois plus rapide que la pyrite (Nicholson, 1994). Dans les gisements en Abitibi, d'autres minéraux que la pyrite et la pyrrhotite peuvent être associés, comme l'arsénopyrite, la chalcopyrite, la galène ou encore la sphalérite. Ces derniers sont en faible quantité, mais fortement concentrés en métaux. Ils ont un potentiel de génération d'acide à pH neutre pour l'arsénopyrite et la chalcopyrite et à pH faible (sous l'action du Fe^{3+}) pour la galène et la sphalérite

(Bouzahzah et al., 2014). Il devient alors important de connaître la minéralogie des sulfures, leur quantité ainsi que leurs textures, afin de connaître le potentiel de génération d'acide et de contamination de l'eau.

1.1.2 Action des neutralisants

En contrepartie des minéraux acidifiants, des minéraux acidivores peuvent être présents dans les matériaux miniers. Ils vont avoir un effet neutralisant sur le DMA et sont connus comme minéraux neutralisants (Sherlock et al., 1995). Généralement, ces minéraux font partie de la famille des carbonates, des oxydes et des hydroxydes, des silicates et des phosphates. Lors de leur dissolution, ils vont consommer des ions H^+ présents en solution afin de produire et de libérer entre autres des ions hydroxydes (OH^-) qui vont augmenter l'alcalinité de l'eau (Blowes, 1997). L'exemple de la réaction de dissolution générique de la calcite dans un milieu concentré en acide est présenté ici (Équation 3):



Plus le milieu va être enrichi en ions H^+ , plus la solubilité et la réactivité de la calcite vont être élevées. Tous les minéraux neutralisants n'ont pas la même capacité à contrôler le DMA; les plus efficaces sont les carbonates (calcite et dolomite) et les silicates (Chopard, 2017; Kwong, 1993). Le Tableau 1-1 est une présentation des réactivités relatives de différents minéraux. Il est important à noter qu'il y a une très grande variation dans la famille des carbonates. Les valeurs de réactivité relatives sont mesurées en considérant que la calcite réagit totalement.

Tableau 1-1 : Réactivités relatives des minéraux neutralisants (modifié de Kwong (1993))

Classe	Minéraux	Réactivité relative (pH = 5)
Très réactifs	Calcite, aragonite, dolomite, magnésite, brucite	1,00
Dissolution rapide	Plagioclases calciques (anorthite, bytownite), nepheline, forsterite, olivine, grenat, jadeite, leucite, spodumene, diopside, wollastonite	0,60
Dissolution moyenne	Sorosilicates (épidote, zoïsite), pyroxènes (enstatite, hypersthène, augite, hédénbergite), amphiboles (hornblende, glaucophane, trémolite, actinolite, anthophyllite), phyllosilicates (serpentine, chrysotile, talc, chlorite, biotite)	0,40
Dissolution lente	Plagioclases sodiques (albite, oligoclase, labradorite), argiles (vermiculite, montmorillonite, kaolinite)	0,02
Dissolution très lente	Feldspath-K, muscovite	0,01
Inerte	Quartz, rutile, zircon	0,004

D'autres carbonates tels que la sidérite ne sont pas considérés comme des minéraux neutralisants, car ils contiennent du fer qui, une fois que le carbonate va être dissous et va se retrouver en solution sous forme Fe^{3+} et potentiellement aider à la génération du DMA (Bussière et Guittonny, 2021). D'autres facteurs peuvent impacter la contamination du sol et des effluents comme la production de minéraux secondaires à la suite de la dissolution des carbonates ou encore l'oxydation du fer en Fe^{3+} et ainsi devenir l'oxydant des sulfures. La présence de bactéries va également pouvoir agir comme catalyseur de la réaction d'oxydation (Lindsay et al., 2015).

1.1.3 Drainage Neutre Contaminé (DNC)

En plus de la génération d'acide, les sulfures peuvent libérer des métaux en solution (As, Cu, Zn, Pb) et ainsi provoquer du DNC. Ce type de drainage peut se

produire à des pH neutres, car ces éléments métalliques demeurent en solution à des pH aussi élevés que 10. La solubilité des métaux dépend de l'activité Eh, du pH et des autres ions en solution (Figure 1-1; Cravotta, 2008).

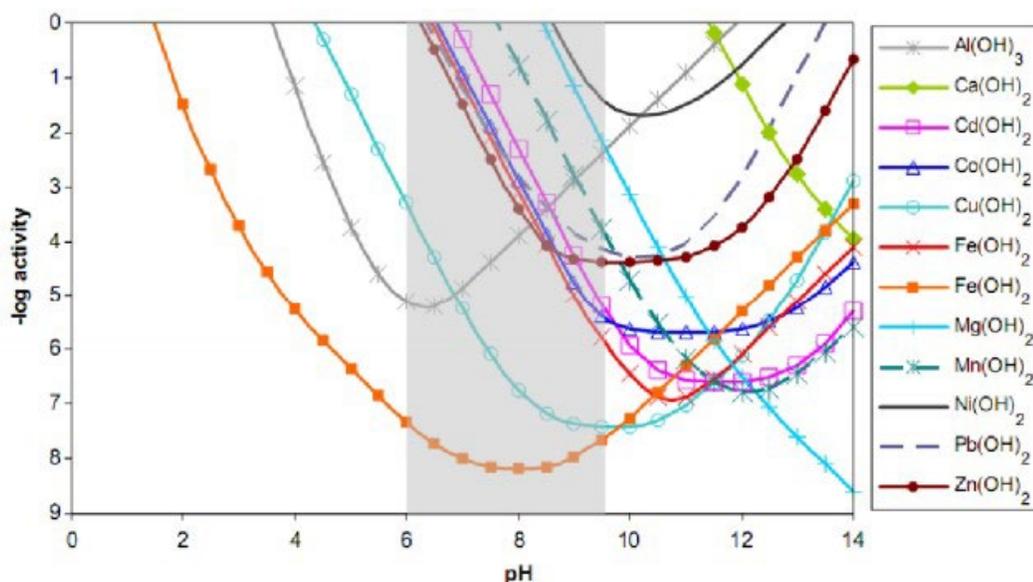


Figure 1-1 : Exemple de solubilité de certains métaux en fonction des valeurs de pH (Cravotta, 2008)

1.2. Les étapes d'exploration minière

Dans les 6 étapes du cycle de vie des mines présentées précédemment (Figure 0-1), le volet exploration minière va être développé dans ce chapitre. Cette étape est cruciale dans le développement d'un projet minier, car elle va permettre d'identifier les ressources et la valeur initiale du projet. Cette étape peut durer près d'une dizaine d'années avant de pouvoir aboutir à une mine (AMQ, 2020; MERN, 2020a). Durant toute cette période, le projet peut être suspendu net pour de nombreuses raisons, mais notamment pour des raisons économiques. Plus de 90% des projets d'exploration minière sont arrêtés ou abandonnés, car ils sont jugés trop risqués ou peu rentables. Il est donc important de bien documenter les risques environnementaux afin de les inclure dans la prise de décision.

Dans un premier temps, les termes minéralisations ou indices vont être employés dans l'exploration de base et plus le projet avance plus les termes gîte; gisement puis mine vont être employés. D'un point de vue géologique, avant d'entreprendre la mise en production, un modèle géologique de confiance doit être établi avec d'abord un inventaire minéral, des ressources indiquées et mesurées et enfin des réserves (Figure 1-2).

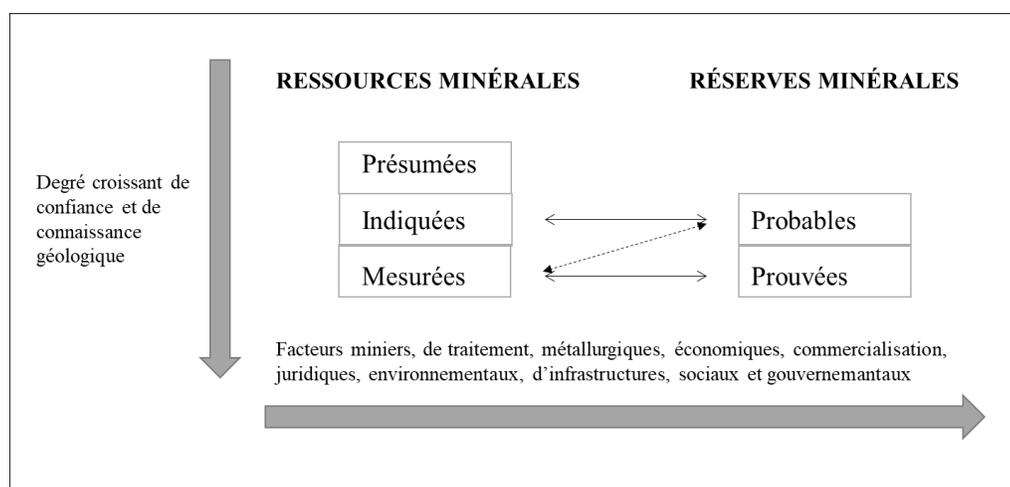


Figure 1-2 : Description des étapes de ressources et réserves en fonction de la confiance géologique d'un projet (modifié d'après ICM, 2014)

1.2.1 Le potentiel minéral

Au Québec, l'exploration se fait, de manière générale, à l'aide des travaux du Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN) qui a pour but « d'assurer la gestion et de soutenir la mise en valeur des ressources et du territoire du Québec, dans une perspective de développement durable. » (MERN, 2016). Chaque année, la Direction générale de Géologie Québec (DGGQ) effectue des campagnes de levés géologiques, géophysiques et géochimiques afin d'évaluer le potentiel minéral dans certaines régions du Québec et par la suite, rédige des rapports synthétiques régionaux disponibles sur la plateforme du SIGÉOM (<http://sigeom.mines.gouv.qc.ca>). Les travaux du MERN permettent de réduire les risques liés à l'exploration minière. Les compagnies d'explorations vont ensuite effectuer des travaux plus ciblés pour donner suite aux travaux du MERN.

L'objectif des sociétés minières juniors est de prendre l'information disponible afin de valoriser les secteurs à haut potentiel. Elles vont alors se placer sur un claim qui correspond au seul titre minier d'exploration qui peut être délivré au Québec (MERN, 2005), ce qui lui permet d'avoir les droits exclusifs de prospection sur une période de deux ans, renouvelables. Ces compagnies vont entreprendre un travail préliminaire afin d'évaluer le sous-sol en organisant des prélèvements d'échantillons, de la géophysique de surface, des analyses géochimiques et éventuellement des campagnes de forages. Leur objectif est d'améliorer la définition des indices et gîtes, pour les amener vers les étapes de mise en valeur et de production ou vendre le projet à d'autres compagnies capables d'investir dans le projet.

1.2.2 Campagnes de forages

Une campagne de forage consiste à évaluer en profondeur le potentiel du gisement. Une ou plusieurs foreuses peuvent être mises en place sur le site et sont opérées par une compagnie de forage, sous la direction de l'équipe géologique en

charge du projet qui va guider la campagne (localisation des forages, profondeur, direction, plongement).

De façon générale, le foreur va alors utiliser une foreuse au diamant afin de pouvoir récupérer les carottes de forages qui seront représentatives du sous-sol. Une fois récupérées et nettoyées, elles vont être placées dans des boîtes de forages qui serviront au transport, mais également comme support pour la caractérisation. Les tailles de boîtes font généralement 1,5m de long et 3 carottes de large (Figure 1-3). Il est à noter que la taille des carottes et des boîtes peut varier en fonction des projets.



Figure 1-3 : Photographie des échantillons de LZ5 dans les boîtes de carottes (1.5m)

À noter qu'ici il s'agit uniquement de demi-carottes sciées

Une fois les carottes récupérées, elles sont envoyées dans l'entrepôt. Le premier diagnostic est opéré par les techniciens qui vont réarranger les carottes afin de les réaligner et noter les différentes profondeurs relatives sur les boîtes de carottes. Ils vont également mesurer, entre autres, le RQD (Rock Quality Designation) afin de connaître la qualité de la roche en profondeur. Ce rapport se mesure par somme de la longueur des échantillons de forage supérieurs à 10 cm divisés par la longueur totale du forage. Les boîtes sont ensuite mises à la disposition des géologues qui vont décrire les carottes.

Le géologue va alors estimer visuellement toutes les informations géologiques à sa disposition (minéralogie (sulfures, carbonates, minéraux d'intérêts etc.), textures, structures, altération) (Marjoribanks, 2010), puis il va rentrer ces informations dans la base de données. Il peut également utiliser des instruments portatifs comme un appareil de susceptibilité magnétique ou un appareil FRX portatif afin de l'aider dans ses descriptions (Côté-Mantha, communication personnelle, 2021). Il va ensuite déterminer les analyses généralement chimiques à réaliser et les différents échantillonnages à réaliser. De manière générale, les analyses métalliques se font sur une certaine longueur de carotte dépendamment de la variation minéralogique du gisement afin d'avoir une représentation globale de la teneur en métaux dans les zones d'intérêts. D'autres analyses comme des analyses lithogéochimiques permettent de connaître la chimie totale ou partielle de la roche et de décrire en détail les lithotypes et leurs traceurs géochimiques, et ainsi dresser les premières catégories standards au loggage du dépôt par les géologues. Il s'agit d'établir un langage commun pour le dépôt dans le but d'identifier le protolithe ou de définir l'altération en place. Une fois les indications du géologue réalisées, les localisations et types d'analyses identifiés, la carotte est sciée en deux. La première moitié est mise en sachet pour l'envoi en laboratoire d'analyse, la seconde moitié est archivée dans la boîte de carottes à l'extérieur du site, au cas où le projet avance et qu'il faille retourner observer la carotte et prendre des mesures subséquentes. Une fois que la confiance dans le modèle géologique et les ressources minérales mesurées (Figure 1-2), la transition vers l'étape de mise en valeur peut se faire.

1.2.3 Valorisation du projet (étape 3 du cycle de vie minier)

Ces travaux servent à établir le modèle géologique du gisement et estimer les ressources présumées puis déterminer les ressources indiquées et mener au statut de réserves minérales dans un objectif d'améliorer le financement du projet. En parallèle de l'évaluation géologique, les processus législatifs sont entamés comme la législation environnementale, les plans de restauration et les baux miniers. Toutes ces étapes font partie de l'évaluation économique préliminaire (PEA : Preliminary Economic Assessment) (Christmann et al., 2016). Plus le projet avance, plus la maille de forage se densifie et permet de calculer des ressources mesurées (Figure 1-4). La dernière étape consiste en l'établissement des réserves minérales lors des études de faisabilité (PFS : *Pre Feasibility Study* et FS : *Feasibility Study*) qui vont permettre de lancer le processus de demandes de permis pour la mise en production. Cette étude va procéder à des essais afin d'améliorer la définition du gisement et d'augmenter la confiance dans les essais minéralurgiques complémentaires et d'autres essais métallurgiques afin d'optimiser les processus de tri et de traitement du minerai. Les études de préfaisabilité et de faisabilité sont également là pour évaluer l'aspect environnemental du projet en estimant l'impact environnemental ainsi que son coût sur le projet minier. C'est en général à ce moment que les essais environnementaux

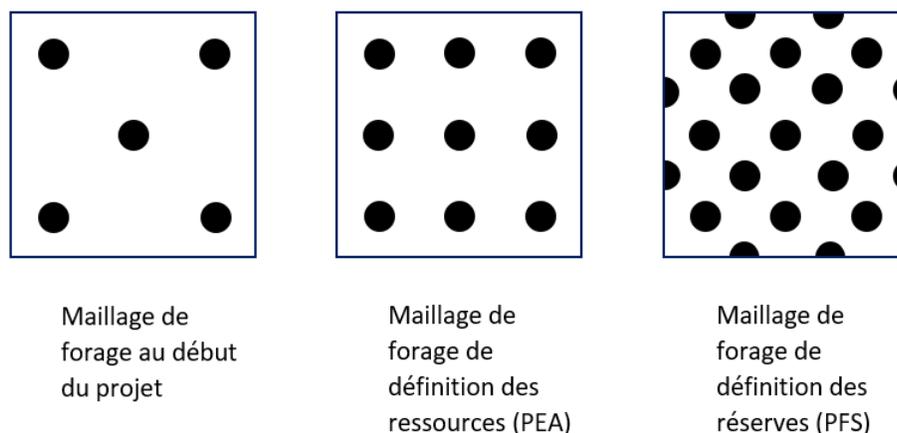


Figure 1-4 : Exemple de maillage de forage selon les étapes du projet d'exploration

de types statiques et cinétiques sont effectués. Cette étape est la dernière avant de pouvoir passer à l'étape d'exploitation (Figure 0-1) et de passer du terme de gisement à celui de mine en opération.

Une fois cette étape terminée, en parallèle à la mise en production, la définition de nouvelles ressources se met en place afin d'améliorer la connaissance géologique du site avec des suivis sous terre ou encore de nouveaux forages. Il est à noter que de l'exploration est toujours possible sur de nouvelles zones à proximité ayant un fort potentiel minéral et économique sur la propriété.

1.3. Approches de suivi environnemental précoces existantes

1.3.1 L'approche Géométallurgie-Minéralogie-Texture (GMT)

Dans cette partie les travaux de Parbhakar-Fox (Parbhakar-Fox, 2012, 2017; Parbhakar-Fox et al., 2018; Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015, 2011) seront mis en valeur concernant l'outil développé qu'est l'ARDI (Acid Rock Drainage Index), qui a pour but de classer le risque de DMA selon des paramètres texturaux bien définis. Cette démarche de caractérisation fait partie d'une première étape d'une étude plus globale de prédiction du risque, l'approche Géométallurgie-Minéralogie-Texture de (GMT). En s'appuyant sur la création de groupe mésotexturaux, l'objectif principal de cet outil est de diminuer le nombre d'échantillons à analyser plus le processus de caractérisation est avancé (Figure 1-5). Dans le cadre de ce projet, l'emphase ne sera mise que sur la première étape de cette démarche et notamment sur l'utilisation l'ARDI.

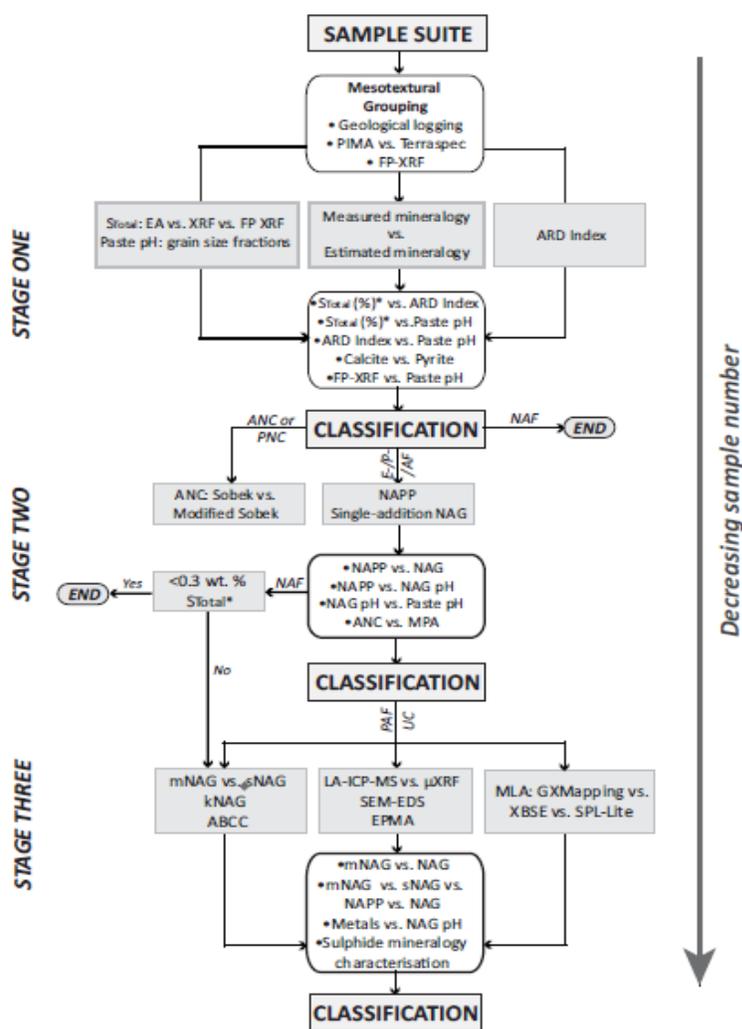


Figure 1-5: Processus de caractérisation GMT (Parbhakar-Fox et al., 2011)

1.3.2 L'échantillonnage

La première étape de l'ARDI est de créer des groupes mésotexturaux rassemblant les échantillons par lithologie, minéralogie, texture et éléments par domaines. Selon l'analyse du géologue, au minimum un échantillon représentatif de chaque groupe lithologique doit être sélectionné afin de suivre le processus GMT. Le nombre d'échantillons minimal afin d'avoir une représentation globale du risque n'est

pas renseigné dans la littérature. Cependant une courbe théorique du nombre d'échantillons nécessaire en fonction de la taille du gisement nécessaire a été développée par (Steffen et al., 1989) (Figure 1-6). Il s'agit d'un ordre de grandeur et non d'un nombre minimal requis. Cela reste à la discrétion des géologues dépendamment de la complexité du gisement, la taille des domaines et de la variabilité des premiers résultats obtenus.

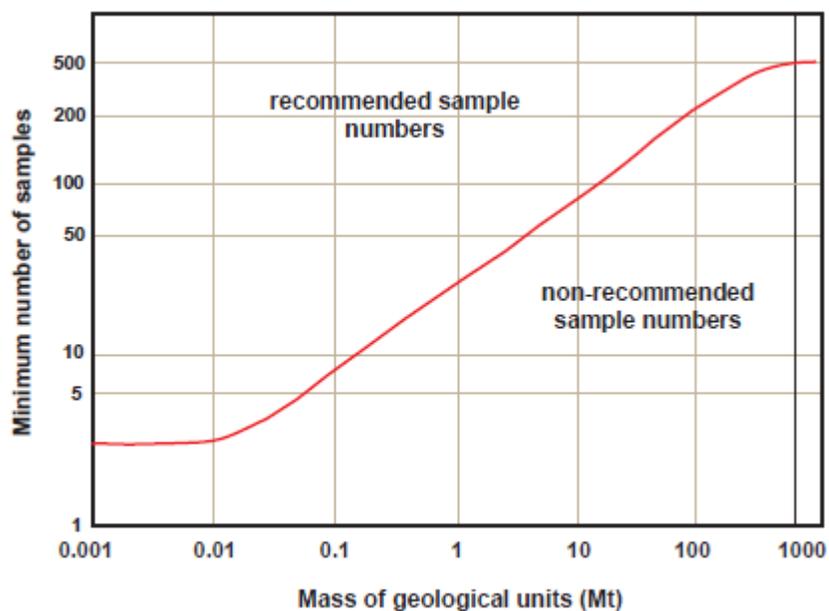


Figure 1-6: Courbe théorique du nombre d'échantillons en fonction de la taille du gisement (Steffen et al., 1989)

1.3.3 Description de l'ARDI

L'ARDI est un indice de calcul du potentiel de formation d'acide des sulfures dans les résidus miniers. Il s'appuie sur 5 paramètres clés (A, B, C, D, E; Figure 1-7) observés à deux échelles (mésoscopique : zone de 3*3 cm et microscopique : analyse de lame mince) (Parbhakar-Fox, 2012).

L'estimation des trois premiers paramètres A-B-C se concentre sur les sulfures présents dans l'échantillon. Ces paramètres sont évalués sur une échelle de 0 à 10 (0 = NGA; 10 = GA) et prennent en compte les sulfures contenant du fer (pyrite, chalcopryrite, arsénopyrite et pyrrhotite). Les sulfures comme la galène ou la sphalérite ne sont pas pris en compte dans ces paramètres puisqu'ils ont un impact moindre dans la génération d'acide. Il est important de noter que la texture d'un sulfure massif est automatiquement considérée comme extrêmement générateur d'acide puisque le contenu en sulfures (paramètre A) est de 100% et que la détermination individuelle des grains macroscopiquement est impossible de par leur aspect massif, et difficile microscopiquement (Parbhakar-Fox, 2012). Les deux derniers paramètres D et E évaluent la présence de potentiels neutralisants (PN) ainsi que leur relation texturale avec les sulfures. Leur échelle se mesure de -5 à 10 (-5 = PN; 0 = NGA; 10 = GA) (Figure 1-7). Chacun des paramètres A à E sont décrits en Annexe 8-1.

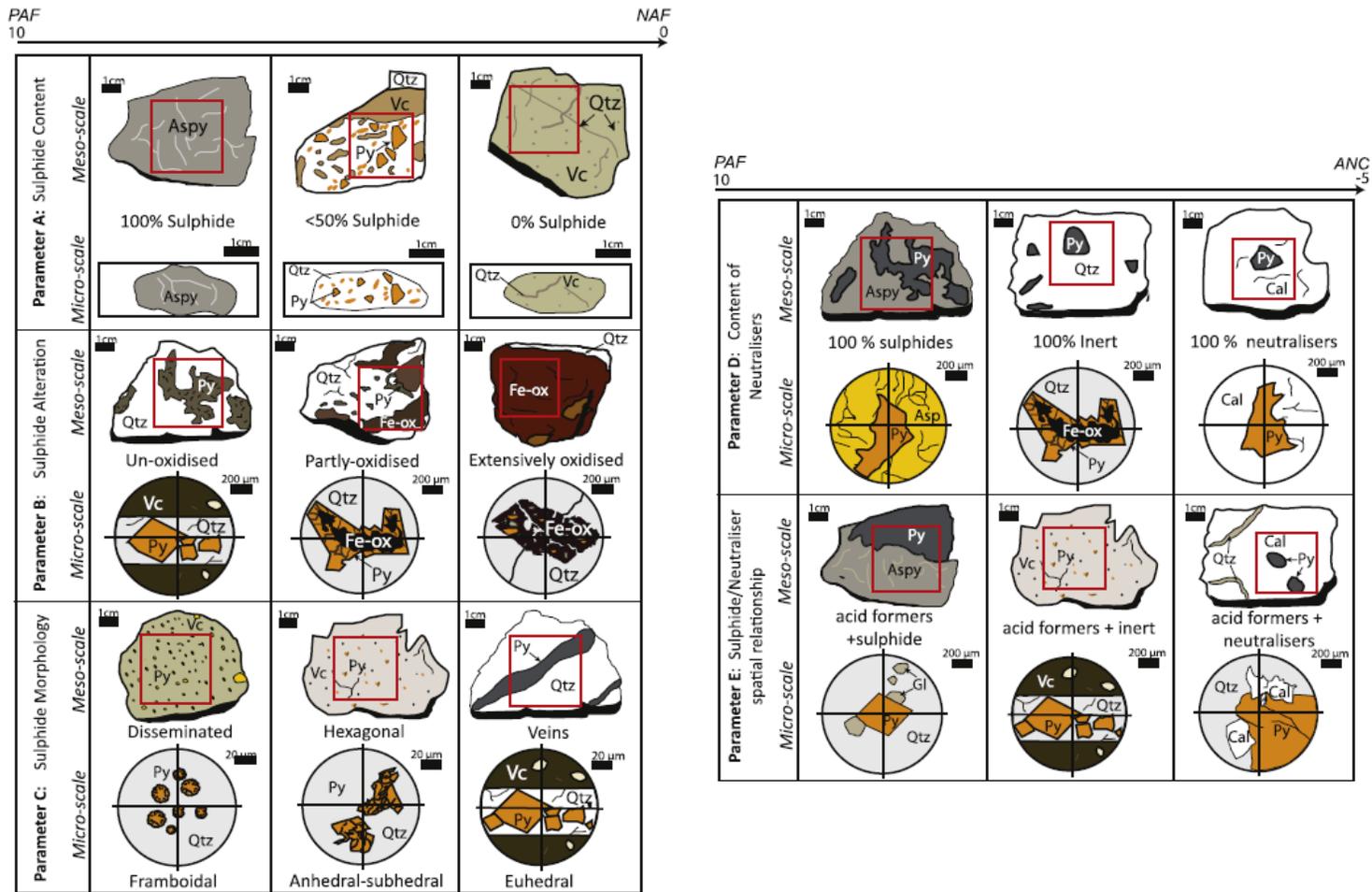


Figure 1-7 : Représentation schématique des paramètres d'évaluation de l'ARDI (d'après Parbhakar-Fox, 2012)

Ce diagnostic est une étape préliminaire et doit, pour les échantillons déterminés comme à risque, être confirmé par une approche minéralogique et géochimique subséquente afin de quantifier le potentiel de génération d'acide de la roche.

Lien de l'approche ARDI avec cette étude

L'utilisation de l'ARDI est une approche dans un contexte de projet de développement minier qui permet de quantifier efficacement le DMA. Cependant, cette analyse nécessite une première connaissance du gisement afin de pouvoir effectuer une sélection d'échantillon représentatif de chacun des domaines mésotexturaux. De plus, le temps nécessaire à allouer pour l'analyse de chaque paramètre (analyse macroscopique et microscopique) est non négligeable.

Ce projet d'étude a pour but de trouver des outils permettant d'optimiser l'acquisition de l'information environnementale en parallèles des autres études environnementales afin de renforcer la confiance sur le gisement, tout en limitant l'impact en coûts et en ressources de ces outils sur un projet minier en phase d'exploration.

1.3.4 La coloration

La coloration est un outil utilisé par les géologues depuis longtemps dans le but de déterminer les minéraux constituant d'une roche pour pouvoir la classer. Friedman (1959) fut le premier à proposer une méthodologie de détermination des carbonates permettant de discriminer la calcite, l'aragonite, la dolomite, la magnésite, la calcite magnésienne, le gypse et l'anhydrite. Plusieurs colorants ont été testés afin de déterminer leur efficacité sur les carbonates ainsi que leur qualité de coloration. La procédure consiste à traiter l'échantillon dans un premier bain d'acide hydrochlorique pendant plusieurs minutes selon la texture et la taille des grains de l'échantillon traité. Puis, après un rinçage abondant de l'échantillon afin de retirer l'excédent d'acide, l'échantillon est trempé dans un second bain contenant une solution colorante

préalablement déterminée en fonction des résultats voulus. Après traitement, la surface colorée peut être recouverte d'un baume de térébenthine (Friedman, 1959) afin d'éviter que la coloration ne s'estompe trop rapidement. Une fois cet échantillon prêt, une analyse quantitative minéralogique était réalisée selon la technique du comptage de points (Chayes, 1949). Cependant aujourd'hui, il est possible de réaliser une analyse numérique plus précise en important une photo de l'échantillon dans un logiciel de traitement d'image comme ImageJ. Ce procédé est réalisable, quel que soit l'échantillon utilisé, même si une surface uniforme et polie semble donner des résultats plus efficaces, car la quantité de colorant est répartie uniformément sur l'échantillon. Seul le type de colorant utilisé va varier selon le type de minéral voulant être révélé. Pour cela Friedman (1959) a mis en place une première charte de détermination utilisant le colorant alizarine Red S ($C_{14}H_7NaO_7S$) et la solution de Feigl ($MnSO_4 \cdot 7H_2O$)

En complément, ces travaux ont été repris, et un schéma étendu de cette méthode a été développé (Figure 1-8) permettant la détermination d'autres carbonates ainsi que certains sulfates (Warne, 1962)

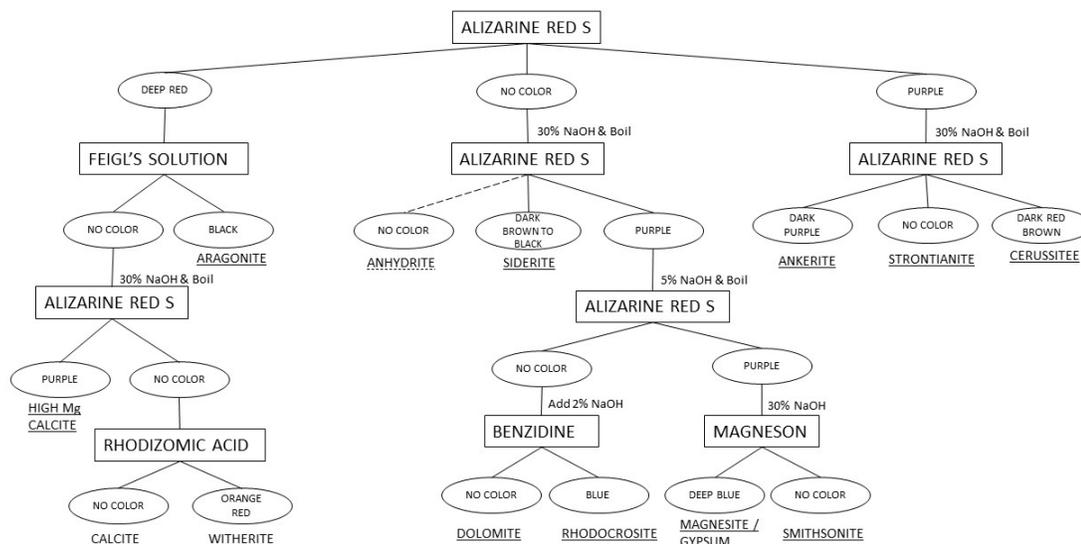


Figure 1-8 Procédure de coloration des carbonates (modifiée selon Warne, 1962)

Cette technique ne nécessite pas d'instrumentation de laboratoire spécifique et peut être réalisée simplement sur le terrain. De plus l'analyse est réalisable en une dizaine de minutes ce qui fait d'elle une méthode de détermination rapide et peu coûteuse. De ce fait, la coloration sur les carottes de forages devient courante et est un test de routine occasionnel aidant le géologue à discriminer les carbonates. Ainsi, des tables d'identifications ont été générées avec le temps et permettent en fonction du type de réactif ou mélange utilisé de connaître la minéralogie spécifique des carbonates (Tableau 1-2) (Hitzman, 1999).

Tableau 1-2 : Identification des couleurs spécifiques des carbonates après coloration (modifié d'après Hitzman, 1999)

Carbonates	Alizarin Red S	Ferricyanure de Potassium	Réactifs combinés
Calcite (CaCO_3)	Rose à rouge	Non coloré	Rose à Rouge
Aragonite (CaCO_3)	Rose à rouge	Non coloré	Rose à Rouge
Calcite ferrifère (Ca,FeCO_3)	Rose à rose pâle	Pale à bleu foncé	Violet à bleu royal
Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)	Non coloré	Non coloré	Non coloré
Dolomite ferrifère /Ankérite ($\text{Ca(Fe,Mg)}(\text{CO}_3)_2$)	Non coloré	Pale à bleu turquoise	Pale à bleu turquoise
Sidérite (FeCO_3)	Non coloré	Non coloré	Non coloré
Rhodochrosite (MnCO_3)	Non coloré	Brun très pâle	Brun très pâle
Magnésite (MgCO_3)	Non coloré	Non coloré	Non coloré
Witherite (BaCO_3)	Rouge	Non coloré	Rouge
Cerussite (PbCO_3)	Mauve	Non coloré	Mauve

Le MERN utilise depuis les années 2000 (Goutier et al., 2000) une méthode de coloration des feldspaths dans le but de discriminer les feldspaths potassiques des plagioclases et ainsi classifier plus précisément les roches dans le diagramme de Streckeisen. Dans certains cas, il pourrait être intéressant de connaître la quantité et la nature des feldspaths, mais leur potentiel neutralisant reste limité (Parbhakar-Fox, 2012) et les réactifs utilisés dans cette méthode sont à manipuler avec précaution. Cette technique ne sera donc pas discutée dans ce rapport.

Une mise à jour et une compilation des travaux sur la coloration a été effectuée dans le cadre du livre Environmental Indicators in Metal Mining (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2011). La coloration a été réalisée sur des carottes de forages dans un but d'identifier la minéralogie des carbonates et des feldspaths comme alternative à d'autres techniques plus traditionnelles (ex. microscopie, rayons X). La méthodologie adaptée au projet est issue de l'article proposé par (Parbhakar-Fox et al., 2017). Il est

détaillé dans le chapitre 2 abordant la méthodologie employée dans le cadre de cette maîtrise.

1.4. Géologie des sites à l'étude

1.4.1 Contexte géologique

Dans le cadre de cette étude, deux sites sont étudiés, la mine LaRonde zone 5 (LZ5) opérée par Agnico Eagle et le gisement O'Brien développé par Ressources minières Radisson. Ces deux sites sont localisés en Abitibi-Témiscamingue entre Rouyn-Noranda et Val-d'Or (Figure 1-9). Ces deux sites sont situés dans la Sous-province de l'Abitibi à l'extrémité est du Groupe du Blake River. La géologie générale du secteur est composée d'une zone volcanique comprenant des sulfures massif volcanogènes ainsi que des unités volcanosédimentaires (Lafrance et al., 2003) encaissée entre des séquences sédimentaire (le Groupe de Pontiac et de Cadillac au sud et Groupe de Kewagama au nord). La partie sud du Blake-River est délimitée par la faille orientée est-ouest nommée faille de Cadillac-Larder Lake (FCLL). La plupart des mines et gisements de cette région sont spatialement associés de cette faille régionale majeure.

1.4.2 Mine LaRonde Zone 5

Historique

Le projet LZ5 est un projet développé par Agnico Eagle Mines Limited. Il est situé dans le camp minier historique de Doyon-Bousquet-LaRonde (DBL) (Mercier-Langevin et al., 2017), plus spécifiquement sur l'ancien site de la mine Bousquet.

Le site est en production depuis 2018 suite à sa mise en valeur dans les années précédentes. En effet la zone était déjà connue lors de la production de l'ancienne mine de Bousquet, mais seulement une teneur de 2 g/t d'or avait été évaluée, ce qui n'était pas à l'époque économiquement rentable (Pitre, 2020).

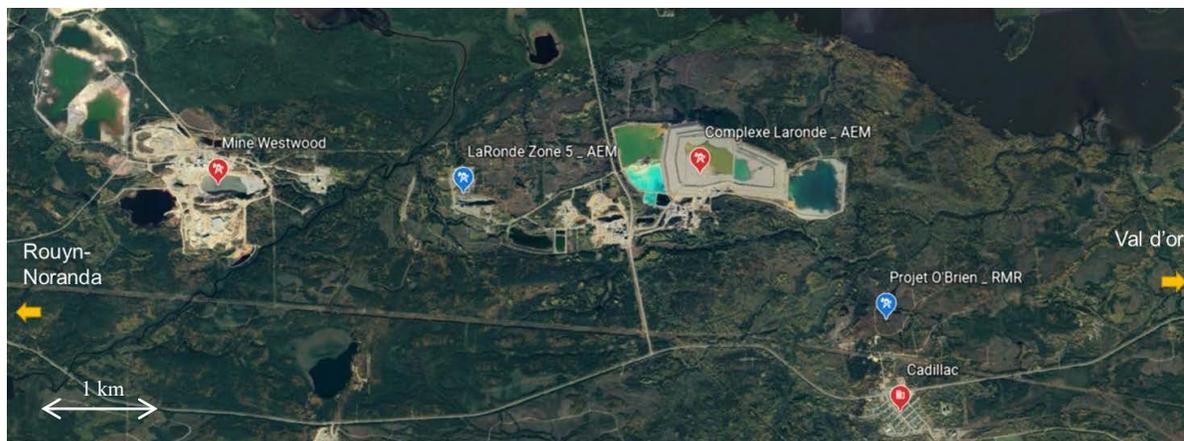


Figure 1-9: Localisation des deux sites à l'étude (Google Earth, 2021)

AEM : Agnico Eagle Mines

RMR : Ressources Minières Radisson

Géologie du site

À l'intérieur de la formation volcanique et volcanoclastique de Bousquet contenant la majorité des gisements du camp DBL (Lafrance et al., 2003) (Figure 1-10).

La Formation de Bousquet est majoritairement composée de roches intermédiaires à felsiques (andésites-dacites-rhyodacites-rhyolites) issues d'un complexe de dômes et coulées sous-marins. Une unité de roches volcanoclastiques recouvre l'ensemble (Mercier-Langevin et al., 2007). De nombreux travaux (Dubé et al., 2007; Mercier-Langevin et al., 2007; Yergeau et al., 2015; Mercier-Langevin et al., 2017; Boily-Auclair et al., 2020) ont été réalisés afin de comprendre la géologie du camp DBL, principalement dans les dernières années au niveau de l'ancienne mine

Doyon, car aucun modèle géologique n'était développé dans ce secteur. Dans le cadre d'une maîtrise, la stratigraphie de la propriété Bousquet, localisée sur le site de LZ5, est réadaptée pour donner suite aux travaux de Lafrance et al. (2003) et de Yergeau et al. (2015) (Boily-Auclair et al., 2020) (Figure 1-11).

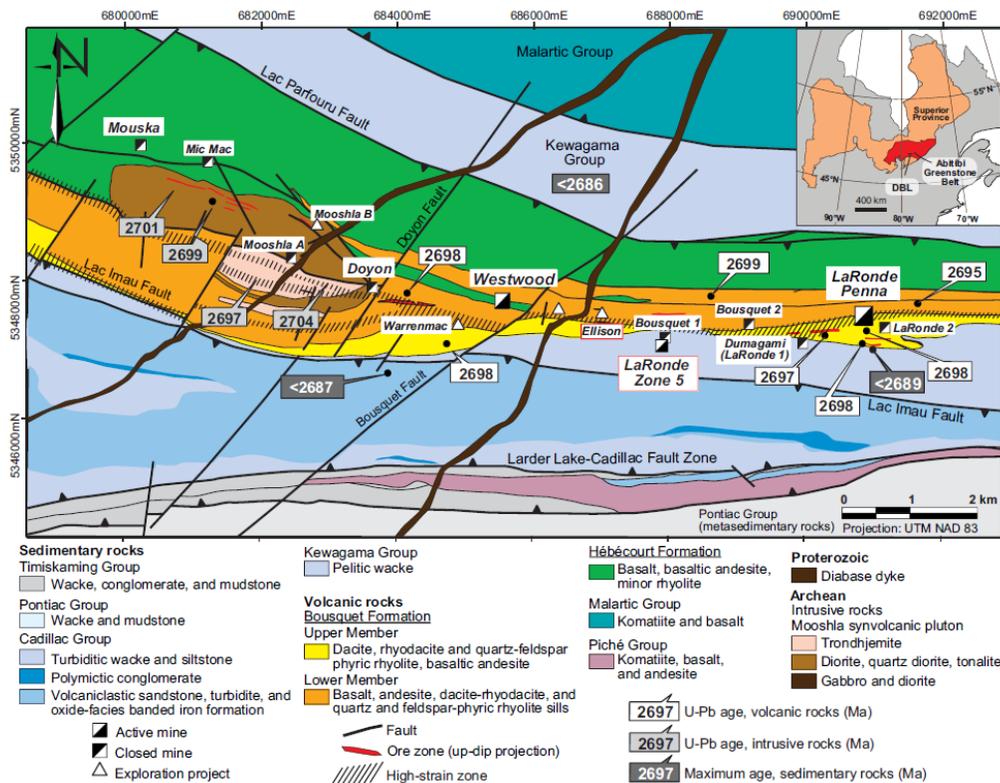


Figure 1-10: Géologie du camp minier Doyon-Bousquet-Laronde (d'après Mercier-Langevin et al., 2017)

Minéralisation

La minéralisation de la zone 5 se situe dans la base du membre supérieur de la Formation de Bousquet, c'est-à-dire dans à l'intérieur d'une succession de roches volcaniques et volcanoclastiques mafiques à felsiques. Le cœur de la minéralisation est présent sur environ 600m est-ouest et peut atteindre une trentaine de mètres d'épaisseur (Annexe 8-2). Elle se compose majoritairement de veinules

millimétriques à centimétriques de pyrite ainsi que de pyrite granoblastique disséminée dans des fragments de la roche. L'or se trouve principalement dans ces pyrites. La pyrrhotite, chalcopyrite et sphalérite sont également retrouvées en très faible quantité (Boily-Auclair et al., 2020)

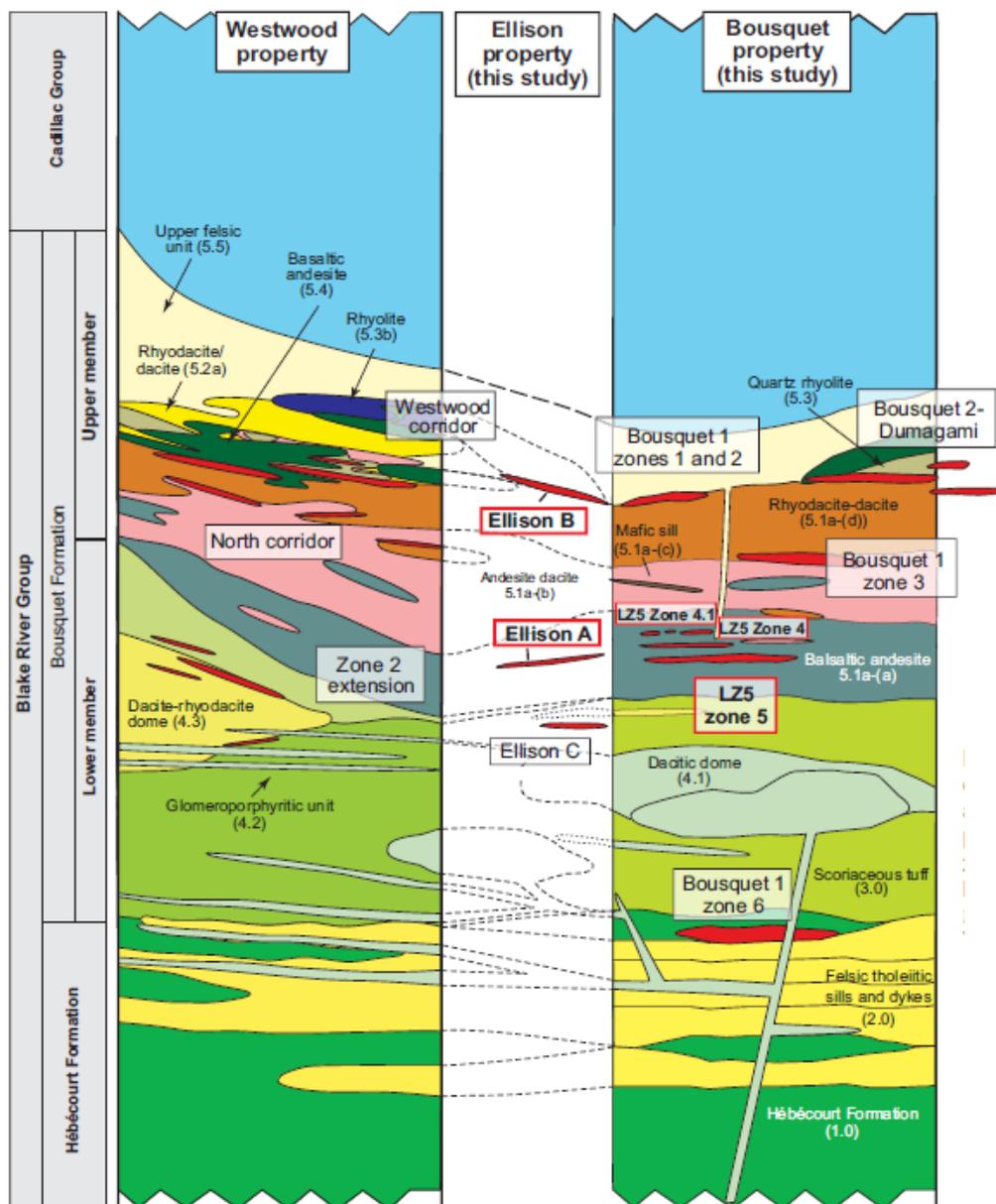


Figure 1-11: Stratigraphie simplifiée des propriétés Westwood, Ellison et Bousquet montrant les zones minéralisées du projet LZ5 (D'après Boily-Auclair et al., 2020)

1.4.3 Projet O'Brien de Ressources Minières Radisson

Toutes les informations qui sont énoncées dans cette partie proviennent du site internet de la compagnie (<https://www.radissonmining.com/fr/propriete/projet-obrien/>); des discussions avec les équipes de Ressources minières Radisson et de la norme NI43-101 émise en 2019 par 3D géosolution (Kenneth Williamson (3DGeosolution), 2019)

La compagnie

Ressources Minières Radisson est une compagnie d'exploration basée à Rouyn-Noranda au Québec. Elle possède actuellement deux propriétés : Douay au sud-ouest de Matagami et Projet O'Brien entre Rouyn-Noranda et Val-d'Or. Cette dernière est le principal actif de la compagnie et fait partie de la sélection des deux sites choisis pour cette étude.

Historique

Le projet actuel est localisé sur deux anciens sites miniers que sont la mine O'Brien et la mine Kewagama. Les premiers travaux concernant le site de la mine O'Brien ont commencé en 1924 et la production d'or a débuté en 1929 pour se terminer en 1956. La propriété fut alors achetée en 1969 par A.N Ferris, et la compagnie Darius Gold mine Inc, fut créée en 1972 afin de réévaluer la propriété. Entre 1974 et 1981, la propriété a pu extraire environ 10000 onces d'or. Entre 1981 et 1986, la propriété fut acquise par Sulpetro Minerals, puis Novamin Resources et enfin Breakwater Resources. En 1994, Radisson a signé un accord avec Breakwater concernant la propriété d'O'Brien et a pu ainsi commencer un nouveau travail d'évaluation du potentiel minéral de la propriété. En 1998, Radisson achète 100% des droits de la propriété O'Brien.

La propriété Kewagama a vu les premiers travaux d'exploration minière débiter en 1928 par Cartier Malartic Gold Mines puis continué par Canadian Gold Operators en 1931 et jusqu'en 1933 sans donner lieu à l'établissement d'une mine. En 1936, la compagnie Kewagama Gold fut créée suite à l'acquisition de Canadian Gold Operators par Venures Ltd. Peu d'opérations ont eu lieu avant l'année 1978 et la création d'infrastructures minières temporaires. Breakwater Resources rentre dans la partie en 1981 et continue les opérations d'explorations sur la propriété. En 1999, Radisson devient le propriétaire de la propriété Kewagana.

Depuis les années 2000, Radisson opère sur les deux propriétés afin d'évaluer le potentiel aurifère. Des campagnes de forages ainsi que des levés aéromagnétiques sont alors réalisés sur les deux propriétés de Radisson entre 2000 et 2011. En 2015, la compagnie InnovExplo est mandatée afin de fournir une estimation des ressources minérales, menant à une étude de préfaisabilité en 2016. Le rapport technique et estimation des ressources minérales pour le projet O'Brien (NI 43-101) rédigé en 2019 vient compléter les travaux sur ces deux propriétés. Actuellement, les travaux sur le projet O'Brien visent à valider le modèle géologique et économique et également réaliser l'étude métallurgique de la future usine sur le site O'Brien.

Géologie du site

Le gisement O'Brien se localise dans le camp minier de Cadillac qui se situe le long de la Zone FCLL (Figure 1-12).

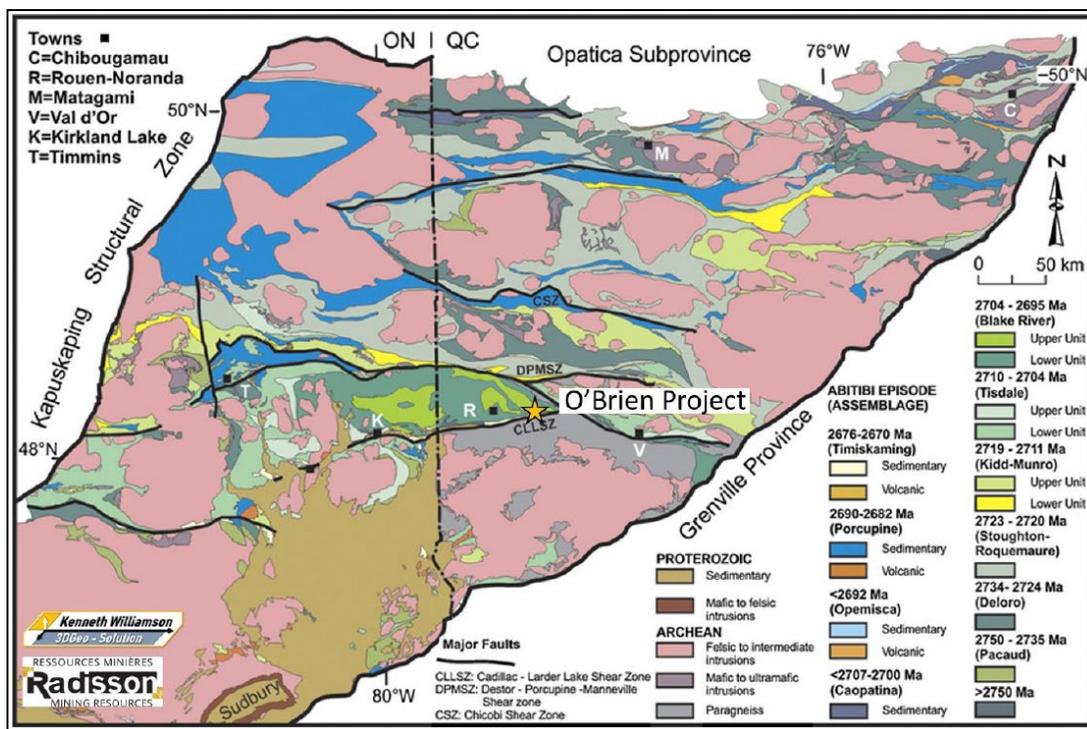


Figure 1-12: Carte stratigraphique de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi (Williamson, 2019)

Trois unités lithologiques sont situées sur la propriété de O'Brien (Figure 1-13). Au nord, le Groupe de Cadillac est composé de roches méta sédimentaires et forme l'éponte inférieure de la FCLL ainsi que des zones de minéralisation. Les types de roches sont majoritairement des argilites, des greywackes, quelques conglomérats et des formations de fer. Le Groupe de Piché est quant à lui composé d'une alternance de couches fines de roches volcaniques mafiques et de conglomérats, recoupés par des dykes QFP (Quartz-Feldspar Porphyry). La dernière unité lithologique est le Groupe de Pontiac constitué de greywackes et d'argilites en majorité, relativement bien stratifiée.

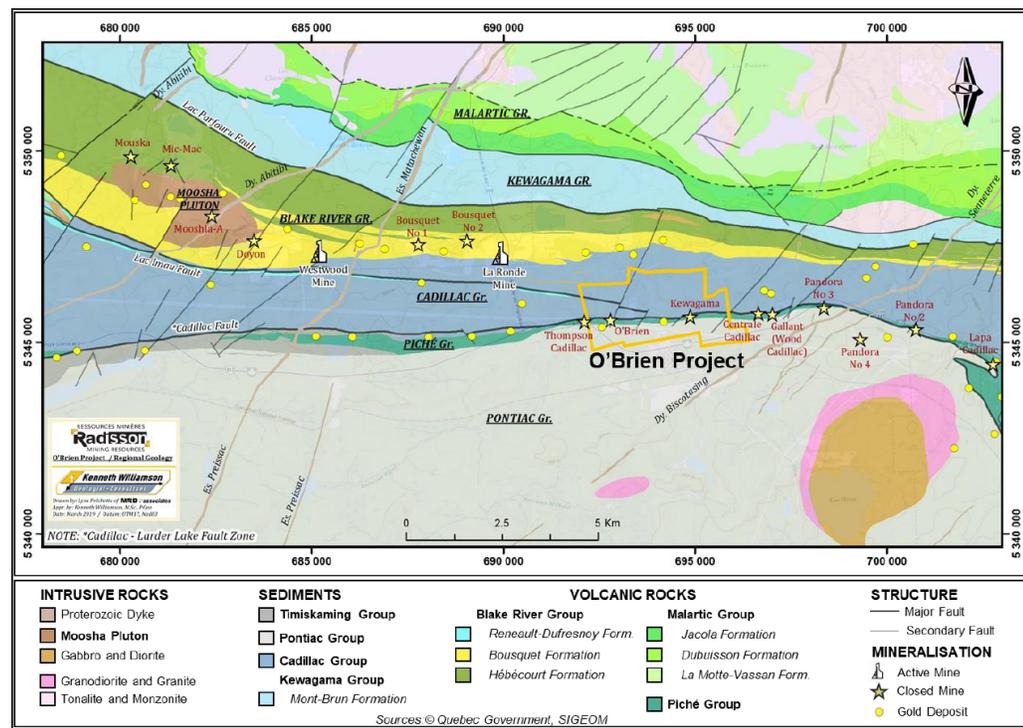


Figure 1-13: synthèse stratigraphique du camp minier de Cadillac modifié d'après Lafrance et al. (2003a, 2003b) (Kenneth Williamson (3DGeo-solution), 2019)

Minéralisation

Le projet O'Brien vise l'exploitation de plusieurs zones aurifères. L'ancienne mine O'Brien exploitait des veines de quartz aurifères au sein du conglomérat de la Mine d'O'Brien. Quatre veines principales représentaient 95% du minerai. La zone 36 Est regroupe des veines de différentes épaisseurs au travers de plusieurs lithologies des groupes de Piché et de Pontiac. L'or apparaît de manière hétérogène sous forme de grains libres. La troisième zone concerne la zone Kewagama où l'or est situé dans les roches du Groupe de Piché sous la forme de veines de quartz au sein des dykes de QFP. Ces veines ressemblent aux veines minées à la mine O'Brien. Enfin les altérations proximales de ces veines peuvent varier de quelques centimètres jusqu'à un mètre. Ces zones d'altération de biotites, silicifiées et de sulfuration peuvent contenir des valeurs en or avec potentiellement de l'arséno-pyrite.

CHAPITRE 2: MÉTHODOLOGIE

Dans cette partie, la méthodologie du projet sera développée de manière explicite. Dans un premier temps l'échantillonnage sera présenté puis les différents outils seront détaillés. Ce dernier point sera divisé en deux sous-parties :1) dans un premier temps, le point de vue théorique de la technologie est abordé, il a été étudié lors de la réalisation d'un stage MITACS, et 2) puis la méthodologie utilisée pour la réalisation des essais de laboratoire de ces outils est présentée par la suite. Il est important de noter que la revue réalisée dans le cadre du stage MITACS est une revue détaillée de la technologie présentant les avantages et les limites des outils les plus utilisés. Les moyens de ce mémoire étant limités, il n'a pas été possible de tester tous les outils étudiés. Cependant, des alternatives ont été développées afin de mener ce projet à terme.

2.1. Échantillonnage

Pour les deux sites à l'étude, les mêmes approches ont été utilisées afin d'obtenir des données similaires. Les équipes des départements de la géologie de chaque compagnie ont été contactées afin de pouvoir leur expliquer le projet, les objectifs et les besoins associés, ainsi que leurs rôles. La première étape consiste à obtenir les données de trous de forage (log, analyses géochimiques de roches totales, modélisation 3D) ayant été jugées d'intérêt pour le projet. Des discussions avec l'équipe de géologie sont organisées afin de sélectionner le ou les trous de forage les plus représentatifs. Une fois cette sélection réalisée, les données concernées sont préparées afin de pouvoir faire un échantillonnage représentatif. Ainsi pour le trou S11-44 issu du projet LZ5, un échantillon pour chaque lithologie a été prélevé dès lorsqu' une analyse lithogéochimique est réalisée. Cet échantillon est situé 20 cm au-dessus de la zone d'analyse afin de pouvoir obtenir de nouveaux résultats, tout en ayant des résultats comparables dus à leur proximité. Dans le cas de LZ5,

41 échantillons de 20 à 30 cm ont été fournis par Agnico Eagle pour le projet (Annexe 8-3). Concernant les échantillons du Projet O'Brien, plusieurs trous de forages ont été privilégiés afin de pouvoir avoir une représentativité des différentes lithologies (Annexe 8-4). La sélection finale comporte 17 échantillons pour le projet O'Brien. Chaque échantillon est ensuite disposé et identifié dans une boîte de carotte afin de simuler le processus des campagnes de forage. (Figure 2-1), Dès lors, les échantillons sont prêts pour les différents tests qui seront réalisés afin d'obtenir le portrait géoenvironnemental du trou de forage. Pour améliorer cette étude, le travail devrait être fait sur des carottes entières (non sciées) car il s'agit du matériel évalué lors des campagnes d'exploration. Or, pour ce projet il a été dans l'impossibilité d'y avoir accès sans interférer avec les opérations en cours sur les différents sites.



Figure 2-1 : Identification et rangements des carottes de forage

2.2. La Fluorescence X (FRX)

2.2.1 Principes théoriques

La spectrométrie par fluorescence X permet d'obtenir de l'information semi quantitative élémentaire. L'objectif est de bombarder l'échantillon (ici, une carotte de forage) de photons issus d'un rayonnement X (0.01 nm – 10 nm) (Figure 2-2).

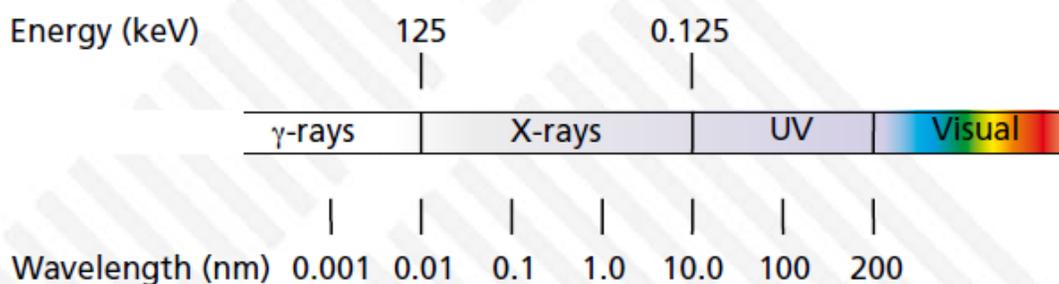


Figure 2-2 :Longueurs d'ondes des rayons X (Brouwer, 2003)

Chaque atome possède avant excitation, un nombre unique d'électrons dispersés selon des orbites nommées K, L, M, N (Modèle de Bohr). Lorsque l'atome est excité, il devient instable, et alors les électrons des couches plus externes transigent vers les couches les plus internes ou il y a un vide (Brouwer, 2003) . Ce « saut » produit alors une énergie unique qualifiable (nommée fluorescence X; Figure 2-3) et quantifiable par les détecteurs du spectromètre SDD (Silicon Drift Detector). Chaque transition est évaluée selon la notation de Siegbahn qui définit la valeur des énergies libérées lors du mouvement des électrons excités entre les différentes couches de l'atome (Tableau 2-1)

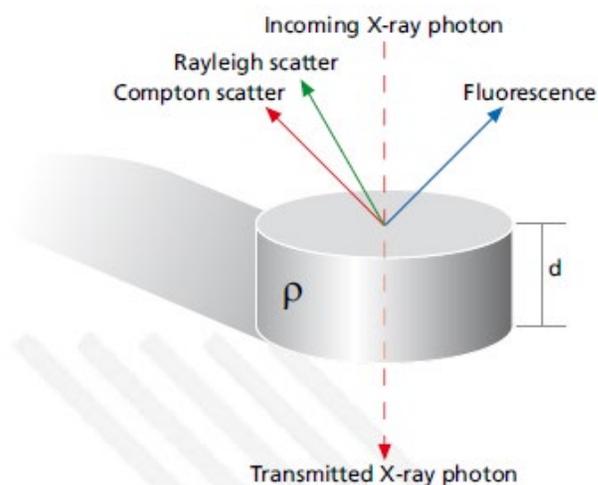


Figure 2-3 : Intéraction des rayons-X avec la matière (Brouwer, 2003)

Tableau 2-1 : Extrait du tableau périodique avec les énergies de rayons X (Tableau complet en Annexe 8-5 ; Bruker, 2020)

Z	Element	$K\alpha_1$	$K\beta_1$	$L\alpha_1$	$L\beta_1$	Z	Element	$K\alpha_1$	$K\beta_1$	$L\alpha_1$	$L\beta_1$
3	Li Lithium					34	Se Selenium	11.224	12.497	1.379	1.419
4	Be Beryllium	0.108				35	Br Bromine	11.924	13.292	1.481	1.526
5	B Boron	0.183				36	Kr Krypton	12.648	14.112	1.585	1.636
6	C Carbon	0.277				37	Rb Rubidium	13.396	14.961	1.692	1.751
7	N Nitrogen	0.392				38	Sr Strontium	14.165	15.835	1.806	1.871
8	O Oxygen	0.525				39	Y Yttrium	14.958	16.739	1.924	1.998
9	F Fluorine	0.677				40	Zr Zirconium	15.775	17.668	2.044	2.126
10	Ne Neon	0.849				41	Nb Niobium	16.615	18.625	2.169	2.260
11	Na Sodium	1.040				42	Mo Molybdenum	17.480	19.606	2.292	2.394
12	Mg Magnesium	1.254	1.302			43	Tc Technetium	18.367	20.626	2.423	2.535
13	Al Aluminium	1.486	1.557			44	Ru Ruthenium	19.279	21.656	2.558	2.683
14	Si Silicon	1.740	1.837			45	Rh Rhodium	20.216	22.724	2.697	2.834
15	P Phosphorus	2.010	2.139			46	Pd Palladium	21.177	23.818	2.838	2.990
16	S Sulfur	2.309	2.465			47	Ag Silver	22.163	24.941	2.983	3.150
17	Cl Chlorine	2.622	2.812			48	Cd Cadmium	23.173	26.093	3.133	3.315
18	Ar Argon	2.958	3.190			49	In Indium	24.210	27.275	3.286	3.487
19	K Potassium	3.314	3.590			50	Sn Tin	25.271	28.485	3.444	3.663
20	Ca Calcium	3.692	4.013	0.341	0.345	51	Sb Antimony	26.359	29.725	3.604	3.842
21	Sc Scandium	4.093	4.464	0.395	0.400	52	Te Tellurium	27.473	30.993	3.768	4.029
22	Ti Titanium	4.512	4.933	0.452	0.458	53	I Iodine	28.612	32.294	3.938	4.221
23	V Vanadium	4.953	5.428	0.510	0.518	54	Xe Xenon	29.775	33.620	4.110	4.418
24	Cr Chromium	5.415	5.947	0.572	0.582	55	Cs Cesium	30.973	34.982	4.285	4.619
25	Mn Manganese	5.900	6.492	0.637	0.648	56	Ba Barium	32.194	36.378	4.466	4.828
26	Fe Iron	6.405	7.059	0.705	0.718	57	La Lanthanum	33.442	37.797	4.647	5.038

Composition d'un spectromètre

Les composants principaux d'un spectromètre par fluorescence X portable, comme celui utilisé dans ce projet, sont le détecteur, le tube à rayons X et le processeur.

Le tube à rayon X va émettre le rayonnement afin d'exciter l'échantillon, le détecteur va capter la fluorescence émise suite à l'excitation et va envoyer l'information au processeur qui va traiter l'information reçue. Le modèle utilisé dans ce projet, dispose également d'une caméra permettant d'apposer avec précision l'appareil sur la zone d'analyse et prend également une photo au début de l'acquisition. (Figure 2-4)

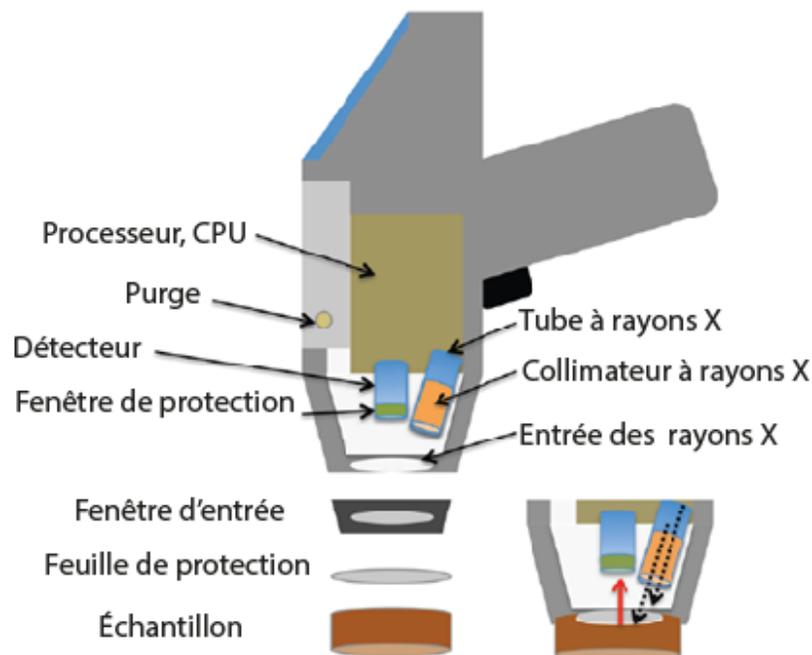


Figure 2-4 : Image schématique de la composition d'un appareil portable de FRX (modifié d'après (Adams et al., 2020))

L'appareil FRX portatif utilisé propose 4 méthodes d'analyses permettant d'optimiser automatiquement les types d'éléments analysés. Le *TestAll Geo* offre la plus grande gamme d'éléments majeurs et mineurs; le *Sols* va permettre d'analyser les contaminants dans les sols naturels (métaux lourds en faible quantité); *Minerais Cu/Zn* va être efficace sur les matériaux miniers afin de caractériser les métaux de transition ; et *Minerais Ta/Hf* va être efficace sur les matériaux miniers afin de caractériser les métaux lourds.

Une fois déterminée, plusieurs filtres peuvent être appliqués (Principal; Bas; Haut; Légers) afin de concentrer l'analyse sur certains éléments. L'acquisition des données pour chacun des filtres dure 15 secondes, si les quatre filtres sont sélectionnés l'analyse dure une minute, cependant il est possible de répéter trois fois l'acquisition de chacun des filtres en restant appuyé sur la gâchette. Cette opération a pour objectif de raffiner les résultats et ainsi augmenter la précision des résultats en diminuant l'erreur.

Les limitations

La spectrométrie par fluorescence X est très sensible et divers biais peuvent altérer les résultats. Les principales limitations sont présentées ci-dessous avec leurs impacts sur les résultats.

Deux principes physiques peuvent altérer la précision des résultats et sont liés directement avec le principe de la fluorescence, en effet deux effets de matrice appelés effet de Compton et effet de Rayleigh (Figure 2-5) qui sont en lien avec l'interaction entre les photons et les électrons pouvant provoquer une atténuation de l'énergie émise, récupérée par le détecteur. Dans le cadre de l'analyse d'éléments légers (où $Z < 18$), l'air compris entre le détecteur et l'échantillon peut atténuer la fluorescence et donc altérer l'analyse.

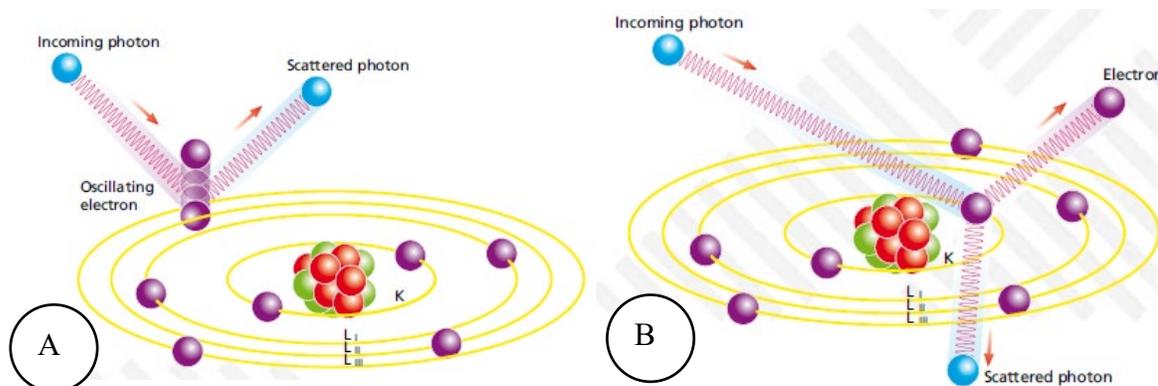


Figure 2-5 : Effets de Rayleigh (A) et de Compton (B) atténuant l'efficacité de la fluorescence X (Brouwer, 2003)

Afin d'éviter cette atténuation, plusieurs solutions peuvent être envisagées. La première est l'utilisation de l'hélium en remplacement de l'air entre le détecteur et l'échantillon, une valve est généralement installée à l'arrière de l'appareil afin de pouvoir la brancher à une bonbonne d'hélium. La seconde solution est de faire le vide (partiel ou total) entre le détecteur et l'échantillon. Cette dernière solution est cependant difficile à mettre en place, car la mise sous vide demande du temps et peut nécessiter des installations spécifiques. Des limites techniques au niveau de l'appareil empêchent actuellement d'obtenir de meilleurs résultats lors de l'utilisation de la fluorescence X. Actuellement les détecteurs les plus communs sont les Silicon-Drift Detector (SDD). Ils ont progressivement remplacé les détecteurs PIN. Avec ce type de détecteur: les éléments légers tels que le soufre (S), calcium (Ca), magnésium (Mg), potassium (K), aluminium (Al), phosphore (P), silice (Si), ou chlore (Cl) sont identifiables. Le nombre de comptages de rayons X par secondes est environ 10 fois supérieur et les limites de détections (LOD) des éléments sont plus basses (Shields, 2020). Un autre problème intervient lors de l'analyse des éléments légers ($Z < 11$), car les spectres vont se superposer les uns sur les autres, empêchant leur bonne

quantification. Ces chevauchements sont principalement dus aux limites techniques des détecteurs actuels. (Adams, 2020). Les fenêtres de détection habituellement faites en beryllium se font remplacer par des fenêtres de graphène (Huebner et al., 2015; Adams et al., 2020)). Le graphène est maintenant plus abondant que le béryllium, il résiste mieux au choc et permet de transmettre les rayons X de manière plus efficace pour plusieurs éléments majeurs (Na, Mg...) (Adams et al.,2020). L'analyse FRX est une analyse chimique volumique et de manière générale il est impossible de mesurer les concentrations élémentaires à 100%. Cependant, il n'est pas bon de vouloir arranger les données afin d'obtenir la somme totale. Ce problème est nommé le problème de fermeture et il est récurrent pour ce genre d'analyse, il dépend du fait que tous les éléments ne peuvent pas être mesurés (sensibilité de l'instrument) ou les valences et charges des éléments ne peuvent pas être mesurées (Cameron Adams, communication personnelle,2020). Enfin l'un des enjeux majeurs afin de limiter les erreurs lors de l'acquisition des données de FRX est la calibration de l'appareil. Il est important de s'assurer que l'appareil est calibré correctement en effectuant régulièrement des tests de routine (QAQC) avec un échantillon similaire au type de roche que l'on analyse dont on possède les résultats d'analyses chimiques.

Enfin, les limitations liées à la représentativité spatiale des points d'analyses. Il est important d'identifier des zones homogènes de l'échantillon mais également identifier si la zone d'analyse doit être jugée comme représentative de l'échantillon ou du domaine lithologique étudié.

Il est important de connaître les limites liées à l'utilisation de la FRX afin de bien comprendre les résultats obtenus lors de l'acquisition. Il s'agit d'un outil efficace pour les études préliminaires afin de prendre des décisions éclairées lors des périodes d'échantillonnages lors de l'avancée des projets. La FRX est à utiliser préférentiellement avec d'autres outils de caractérisation comme de l'imagerie spectrale.

2.2.2 Application au projet

Dans le cadre de ce projet de recherche, le FRX portatif Niton XL3t 900SHE est utilisé (Figure 2-6), cet outil est développé par Thermo Fischer Scientific et est la propriété de l'URSTM, ici à l'UQAT.



Figure 2-6 : Vue d'ensemble de l'appareil FRX Niton XL3t 900SHE. (Villeneuve, 2015)

Démarche d'acquisition

La méthodologie de base est celle développée par l'URSTM dans le cadre de l'utilisation du FRX portable (Villeneuve, 2015). Il est important de noter que cet outil est habituellement utilisé sur des poudres et non sur un échantillon de carotte de forage. Dans un premier temps il est important de réaliser les contrôles de sécurité (au démarrage) ainsi que les calibrages sur l'appareil (en fonction du type de mesures voulant être effectuées). Il faut ensuite choisir le mode d'analyse préférentiel afin de régler la sensibilité des capteurs de certains éléments. Dans le cadre du projet deux modes ont été étudiés : le mode *TestAll Geo* qui permet de déterminer automatiquement les éléments majeurs et mineurs. Ce mode permet donc d'avoir une

bonne représentativité du spectre des éléments afin de caractériser la roche. Le second mode est le mode *Minerais Cu/Zn* qui est calibré sur les métaux de transition.

Tel que mentionné dans la section des limitations, l'air présent entre le détecteur et l'échantillon atténue la détection des éléments légers. Pour améliorer l'analyse, celle-ci fut réalisée avec un vide à l'hélium, permettant d'augmenter la sensibilité des capteurs au niveau des éléments légers ($Z \leq 18$). L'objectif de faire ce vide à l'hélium pour ce projet est de mieux mesurer la quantité d'éléments légers ainsi que du soufre dans les échantillons.

Une fois les réglages terminés et les informations du point de mesure saisies, l'acquisition peut commencer. Il suffit de poser la fenêtre de capture sur la zone sélectionnée (environ 1 cm^2) et tenir la gâchette enfoncée pendant 1 minute (durée de l'acquisition). Il suffit de répéter ces informations pour chaque point de mesure et ensuite exporter les résultats sur l'ordinateur pour traiter les données. Après chaque mesure, il est possible de prévisualiser les données afin de déterminer si les résultats sont cohérents ou non. Afin d'avoir une information plus raffinée, il est possible de faire une acquisition de 3 minutes, ce qui a pour effet de répéter l'analyse des 4 filtres. Cette solution n'a pas été retenue, car les premiers essais comparatifs n'ont pas montré de grandes différences significatives entre les deux temps d'acquisition.

Dans le cadre du projet, deux mesures génériques ont été systématiquement réalisées sur des zones jugées représentatives de l'échantillon (Figure 2-7). Pour chaque échantillon, les analyses FRX 1 et 2 sont les analyses globales déterminées de manière visuelle dans les zones homogènes de l'échantillon, puis les analyses suivantes se concentrent sur des zones plus spécifiques de l'échantillon selon l'altération, la minéralogie et la texture observée.



Figure 2-7 : Exemples de points d'analyses pour la FRX sur un échantillon de la série LaRonde Zone 5

2.2.3 Traitement des données

Les données sont exportées de l'appareil vers le logiciel de traitement des données FRX Niton NDT 5 afin de récupérer les valeurs correspondantes à chaque analyse. Les données sont alors exportables sous Excel sous un tableau regroupant les informations rentrées pour chaque analyse ainsi que les résultats pour chaque élément analysé (Tableau 2-2).

Tableau 2-2 : Table récapitulative des éléments analysés (*Test All Geo*)

Éléments analysés par FRX			
Nd (nodium)	Pr (praséodyme)	Ce (cérium)	La (lanthane)
Sn (étain)	Cd (cadmium)	Ag (argent)	Mo (molybdène)
Th (thorium)	Zr (zircon)	Y (yttrium)	Sr (strontium)
Bi (bismuth)	Au (or)	Se (selenium)	As (arsenic)
Zn (zinc)	Cu (cuivre)	Ni (nickel)	Co (cobalt)
Al (aluminium)	P (phosphore)	Si (silice)	Cl (chlore)
Sb (antimoine)	Rb (rubidium)	W (tungstène)	Mn (manganèse)
Ba (barium)	Nb (nobium)	U (uranium)	Pb (plomb)
Fe (fer)	S (soufre)	Mg (magnésium)	

Ces données vont alors être comparées aux données chimiques disponibles (comme les données issues des analyses ICP précédemment réalisées par les compagnies minières). De plus, les éléments principaux (Ca; K; Al; P; Si; Mg; Fe; Mn; Ti) sont convertis en oxydes selon le tableau de référence provenant d'ALSGlobal (Annexe 8-6)

2.3. L'imagerie hyperspectrale

2.3.1 Principes théoriques

L'imagerie hyperspectrale se base sur le rayonnement infrarouge de la lumière (750 nm à 5000 nm environ). L'acquisition des spectres de réflectances selon des intervalles courts (moins de 10nm) permet à l'imagerie hyperspectrale de se différencier des imageries multispectrales (Figure 2-8) qui ne cumulent qu'une dizaine de bandes pour créer l'image (Midleton spectral vision).

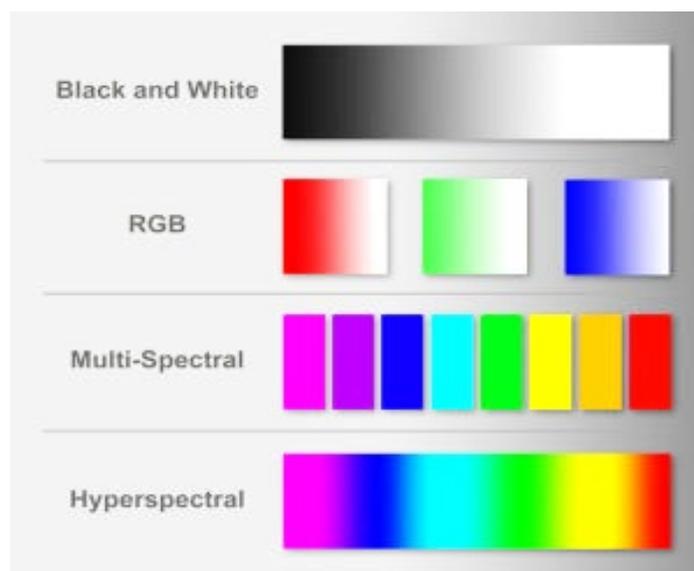


Figure 2-8: Comparatif des différents modes d'imagerie (Midleton spectral vision, 2021)

Cette technique a d'abord été introduite dans les sondages aéroportés afin d'identifier les zones d'intérêts lors de l'étape de prospection, mais elle est, aujourd'hui, de plus en plus développée à une plus petite échelle, celle de l'identification minéralogique de carottes de forages (Cracknell et al., 2018).

Les outils reliés à l'hyperspectrale utilisés de manière commerciale opèrent entre 750 nm et 2500 nm (Figure 2-9), c'est-à-dire dans le domaine du VNIR-SWIR (Visible Near InfraRed - Short Wave InfraRed). Des détecteurs plus performants permettent actuellement d'étudier également le LWIR (Long Wave Infrared) entre 8000 et 12000 nm.

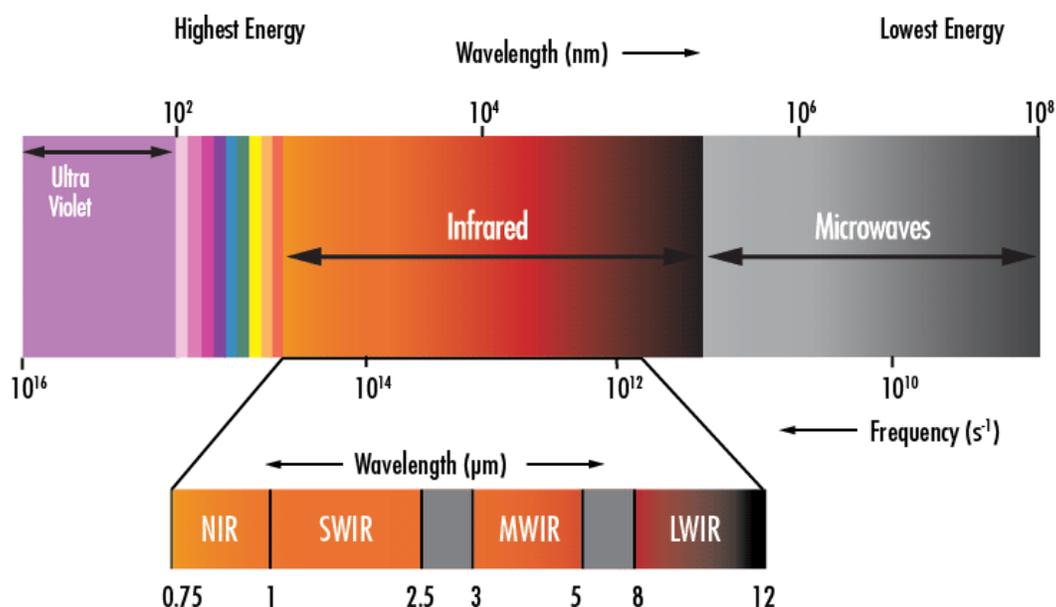


Figure 2-9 : Gamme de longueurs d'onde relative au champ de l'hyperspectral (Edmundoptics, 2021)

La figure 2-10 présente un appareil de la compagnie Terracore qui est équipé des caméras VNIR SWIR LWIR ainsi que d'une caméra RVB (Rouge-Vert-Bleu). Le champ MWIR (*Mid Wave InfraRed*) est situé entre 3000 et 5000 nm (Figure 2-9). Cet interval spectral est encore peu documenté et les applications dans le domaine minier peu connues, mais plusieurs compagnies (Terracore, Corescan) et centre de recherches (CSIRO) développent ce pôle qui pourrait être prometteur pour certains aspects dans le domaine minier (F. S. Desta & Buxton, 2019; F. Desta et al., 2020).



Figure 2-10: Appareil ROCK (2/3 sensor) de la compagnie Terracore (Terracore, 2021)

Comme le présente le tableau 2-3 ci-dessous, tous les minéraux n'ont pas la même réponse selon la longueur d'onde analysée. De manière générale, les phyllosilicates, les sulfates et les hydroxydes montrent de bonnes réponses dans le SWIR (*Short Wave InfraRed*); tandis que les carbonates tectosilicate et phosphates vont avoir une bonne réponse dans le domaine du LWIR (*Long Wave Infrared*). Les minéraux les plus facilement identifiables dans le domaine de l'hyperspectrale vont être les minéraux hydratés, présentant des liaisons -OH; c'est pourquoi les sulfures ne sont malheureusement pas identifiés par cette technique. Cependant plusieurs recherches sur l'identification des sulfures ont été effectuées, mais n'ont pas, pour le

moment, présenté de résultats probants (Bolin & Moon, 2003; Merrill et al., 2016; Cracknell et al., 2018).

Tableau 2-3 : Identification minéralogique selon les domaines hyperspectraux (Specim, 2017)

	Silicate structure	Mineral Group	Example	VNIR	SWIR	TIR / LWIR Response	
Silicates	Inosilicates	Amphibole	Actinolite	Non-Diagnostic	Good	Moderate	
		Pyroxene	Diopside	Good	Moderate	Good	
	Cyclosilicates	Tourmaline	Elbaite	Non-Diagnostic	Good	Moderate	
	Nesosilicates	Garnet	Grossular	Moderate	Non-Diagnostic	Good	
		Olivine	Forsterite	Good	Non-Diagnostic	Good	
	Sorosilicates	Epidote	Epidote	Non-Diagnostic	Good	Moderate	
	Phyllosilicates	Mica	Muscovite	Non-Diagnostic	Good	Moderate	
		Clay Minerals	Chlorite	Clinchlore	Non-Diagnostic	Good	Moderate
			Illite	Illite	Non-Diagnostic	Good	Moderate
			Kaolinite	Kaolinite	Non-Diagnostic	Good	Moderate
	Tectosilicates	Feldspar	Orthoclase	Non-Diagnostic	Non-Diagnostic	Good	
			Albite	Non-Diagnostic	Non-Diagnostic	Good	
		Silica	Quartz	Non-Diagnostic	Inferred	Good	
Non-Silicates	Carbonates	Calcite	Calcite	Non-Diagnostic	Moderate	Good	
		Dolomite	Dolomite	Non-Diagnostic	Moderate	Good	
	Hydroxides		Gibbsite	Non-Diagnostic	Good	Moderate	
	Sulphates	Alunite	Alunite	Moderate	Good	Moderate	
			Gypsum	Non-Diagnostic	Good	Good	
	Borates		Borax	Non-Diagnostic	Moderate	TBD	
	Halides	Chlorides	Halite	Non-Diagnostic	TBD	TBD	
	Phosphates	Apatite	Apatite	Moderate	Non-Diagnostic	Good	
	Hydrocarbons		Bitumen	TBD	Moderate	TBD	
	Oxides	Hematite	Hematite	Good	Non-Diagnostic	Non-Diagnostic	
		Spinel	Chromite	Non-Diagnostic	Non-Diagnostic	Non-Diagnostic	
Sulphides		Pyrite	Inferred	Non-Diagnostic	Non-Diagnostic		

L'intérêt de l'imagerie hyperspectrale est alors porté sur la distinction des minéraux ayant un impact sur le potentiel de neutralisation pour la génération du DMA (domaine géoenvironnemental), mais également la distinction de certains minéraux pouvant être problématiques lors des phases de traitement du minerai (domaine géométallurgique). Ce dernier aspect regroupe des défis de fragmentation, de pompage et filtrage des résidus, de séparation, de flottation, de cyanuration ou encore de passivation de l'or (mémo interne, Agnico Eagle, 2021).

2.3.2 Application au projet

Dans le cadre de ce projet, les scanners de carottes de forages comme celui présenté dans la figure 2-10, n'ont pas pu être utilisés, ces appareils sont coûteux (à l'achat et/ou à la location) et nécessitent un volume d'échantillons très largement supérieur à celui disponible pour ce projet. C'est pourquoi un autre outil opérant dans le même type de longueur d'onde a été préconisé pour ce projet : le Terraspec® qui est un spectromètre portable opérant dans le champ du visible, proche infrarouge et de l'infrarouge à ondes courtes (VIS-NIR-SWIR). Il permet d'obtenir rapidement de l'information sur la minéralogie de manière non destructive. Dans le cadre du projet, l'appareil utilisé est le Terraspec® Halo ASD (Figure 2-11), qui fut loué via la compagnie REFLEXIMDEX Limited.

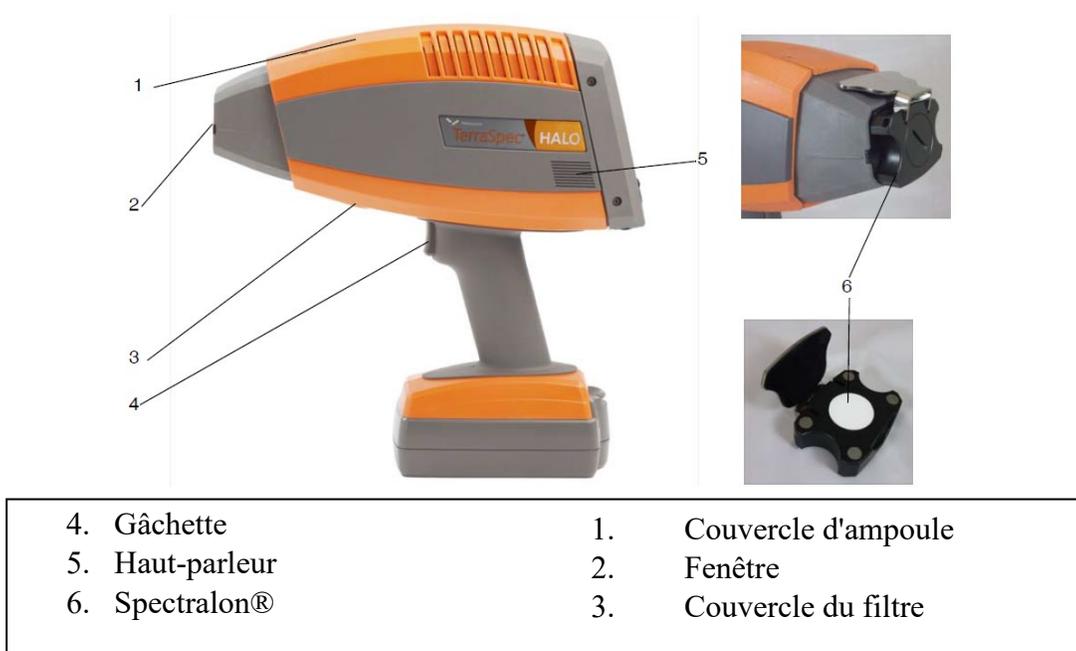


Figure 2-11 : Composition d'un appareil portable Terraspec Halo ASD (ASD Inc., 2017)

Démarche d'acquisition

Une courte formation est nécessaire afin d'assurer la bonne utilisation de l'appareil et permettant de comprendre son fonctionnement. Avant de mettre l'appareil sous tension, il est important de placer sur l'obturateur un spectralon® afin de pouvoir mieux calibrer l'appareil. Le spectralon® est un polymère ayant la plus grande réflexion dans les champs des ultraviolets, du visible et de l'infrarouge. Une fois l'appareil allumé, le menu principal apparaît et permet de rentrer des informations sur la position de l'échantillon (GPS intégré), les informations relatives aux prises d'analyses à venir. Une fois les options déterminées, une première analyse est réalisée avec le spectralon® en place en tant que « blanc » d'analyse. Une seconde analyse va être réalisée avec le spectralon® et une couche de Mylar (type de polyéthylène) laissant également passer les infrarouges. Une fois ces premières analyses tests réalisées, il est possible de commencer notre acquisition. Chaque analyse dure 15 secondes et permet de mesurer la composition minéralogique de chaque point d'analyse (1cm²). Il est important de noter qu'un autocalibrage se réalise toutes les 2 minutes pendant la première demi-heure d'acquisition puis toutes les 5 minutes pour le reste de l'utilisation de l'appareil. Pour faciliter la sélection d'analyse, les mêmes points d'analyses que pour le FRX ont été choisis. Au minimum deux points ont été mesurés par échantillon. Lorsque l'appareil doit être mis hors tension, il est conseillé de refaire une mesure avec le Spectralon® afin de s'assurer de la qualité des données.

2.3.3 Traitement des données

Juste après acquisition

Une fois l'acquisition terminée, un premier diagnostic des minéraux présents est obtenu sur l'écran de l'appareil ainsi qu'une appréciation du niveau de confiance en ce résultat (1 à 3 étoiles) (Figure 2-12). Si le minéral est associé à 3 étoiles, le niveau de confiance est très élevé, il est donc fort probable que cet échantillon contienne ce

minéral. Au contraire si le minéral est associé à une étoile, le niveau de confiance est faible. Les niveaux de scalaires sont également disponibles et représentent certaines propriétés cristallines et de composition. Pour cette étude, les scalaires n'ont pas été utilisés.

Les résultats bruts de la minéralogie obtenue peuvent être utilisés, mais il est important de prendre ces résultats avec parcimonie.

Minerals		Scalars	
Goethite	**	Al-OH: 2209.5	
Iron Saponite	**	ISM: 1.238	
Phengite	**	Mg-OH: 2311.4	
Aragonite	*	Fe-OH: INV	
		Fe3t: INV	
		Fe3i: 1.871	
		Al-Fe-Mg: 2311.4	

Figure 2-12: Capture d'écran d'un résultat d'analyse type (ASD Inc., 2017)

Après traitement par aiSIRIS

Le Terraspec® Halo a été loué par l'intermédiaire de la compagnie Imdex Limited. Cette location vient avec une offre de service de traitement de données par le logiciel aiSIRIS (ai Spectral InfraRed Interpretation System). AiSIRIS est un logiciel développé par la société Ausspec, il permet de visualiser les données spectrales obtenues, de synchroniser les données vers le système d'interprétation, de stocker les données et enfin d'obtenir et de visualiser les données. De plus, lors de l'importation des données dans le logiciel, un contrôle qualité (QA/QC) est automatiquement

réalisé afin de vérifier si les données acquises sont représentatives ou s'il faut reprendre l'analyse.

Une fois les données interprétées par le logiciel, les résultats extraits sont une qualification des spectres et des minéraux analysés et une semi-quantification de ces derniers. Dans le cadre de ce projet, seuls les calculs de minéralogie vont être pris en compte. Il est important de noter que les minéraux bruts (avant traitement) et les minéraux traités par aiSIRIS ne sont pas les mêmes. (Tableau 2-4) En effet, l'algorithme de l'appareil Terraspec® Halo et celui du logiciel sont différents. Il est important de prendre en considération les deux types de résultats, mais les résultats traités sont considérés comme plus précis.

Tableau 2-4: Comparaison des minéraux bruts (orange) et traités par logiciel (vert) identifiés par le Terraspec

Minéraux Terraspec			Minéraux AisIRIS
FeMgChlorite	Phengite	Épidote	Carbonate
Clinozoisite	VNIR - No match	Gypsum	Micas blanc
Muscovite	Magnesite	SWIR - No match	Chlorite
Margarite	Dolomite	Calcite	Gypsum
Ankerite	Phlogopite	Smithsonite	Biotite
FeChlorite	Paragonite	Brucite	Tourmaline
Ferrihydrite	Biotite	Strontianite	Amphibole
K-illite	Tourmaline	Gibbsite	Kaolinite
KaoliniteWX	Mg-illite	Wavellite	

2.4. *La macroscopie optique*

2.4.1 Principes

L'optique est un outil très utilisé dans le domaine de la géologie notamment sur des lames minces afin d'obtenir l'information sur la minéralogie et la texture des minéraux économiques et de gangue. Cependant, obtenir ces informations demande beaucoup de préparation et de temps d'observation, ce qui implique un coût élevé pour le projet. Une des solutions est de pouvoir observer et prendre les données sur les carottes de forages via des appareils d'analyse d'image. Ces analyses vont pouvoir venir en complément du travail des géologues et également automatiser les processus et ultimement régulariser les interprétations.

2.4.2 Application au projet

Dans le cadre de ce projet, les carottes sont observées avec un microscope binoculaire Axio Zoom V16 (Figure 2-13). Chaque échantillon est observé manuellement, puis chaque point d'analyse précédemment réalisé avec les autres outils d'analyse est pris en photo avec le même niveau de zoom (x8). Le travail effectué sur ces carottes est de l'ordre de la caractérisation de la minéralogie et de la texture avec également un travail de semi-quantification notamment des sulfures et des carbonates. Cette information est mise en comparaison directe avec les descriptions géologiques fournies par les équipes de géologie de chaque site et celles réalisées spécifiquement pour ce projet.

L'utilisation de cet outil a pour avantage d'uniformiser l'information ainsi que de la digitaliser permettant ainsi aux géologues de potentiellement décrire les carottes à distance. Cependant, cet outil demande un investissement en temps significatif afin de le maîtriser et de l'utiliser à son plein potentiel.

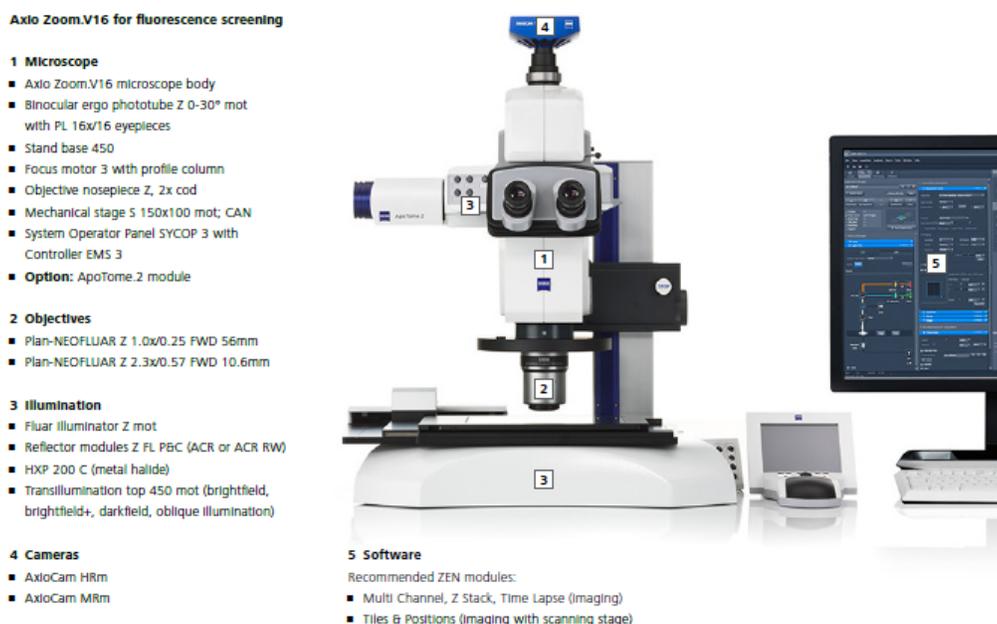


Figure 2-13: Visuel du microscope Axio Zoom V16 (Zeiss, 2011)

2.5. La coloration des carbonates

2.5.1 Protocole

En complément de l'analyse optique, un travail de coloration des carbonates est réalisé afin de pouvoir mieux les caractériser et les quantifier. Le procédé a été adapté en fonction des normes en vigueur à l'UQAT pour l'utilisation des produits chimiques (HCl; Alizarine Red-S; ferrocyanure de potassium; Titan Yellow; NaOH; ...) et selon la procédure développée par Parbhakar-Fox (2017) (Figure 2-14). Des deux techniques proposées en figure 2-14, seule la coloration avec l'Alizarin Red-S et le Ferricyanure de Potassium a été testée dans le cadre de ce projet. L'identification des feldspaths, comme suggérés par Parbhakar-Fox et al. (2017), ne sera pas développée, car les produits utilisés (Acide fluorhydrique) pour ce type d'analyse sont toxiques et difficiles à gérer, de plus l'action des feldspaths dans la neutralisation de l'acide est beaucoup moindre que celle des carbonates.

Comme le traitement attaque la surface de l'échantillon, il a été appliqué uniquement lorsque toutes les autres analyses non destructrices (citées précédemment) ont été réalisées et qu'il ne reste que cette étape.

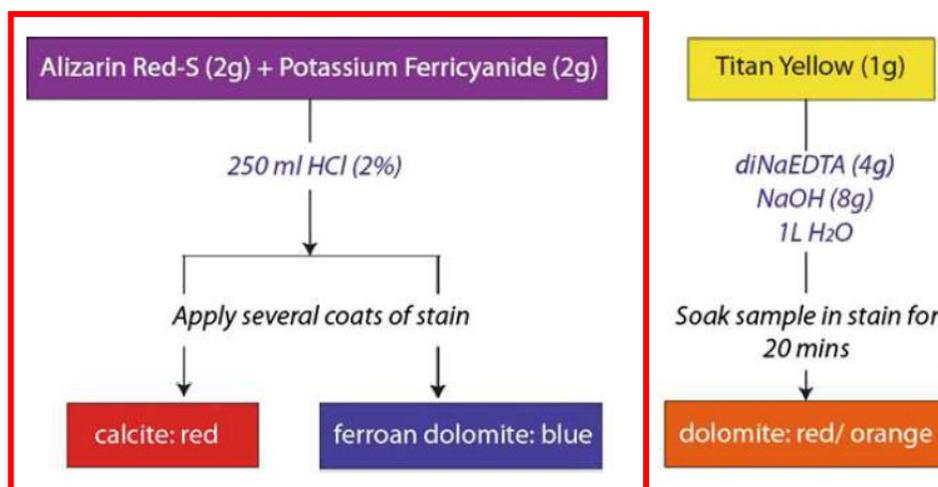


Figure 2-14 : Proposition d'analyse des carbonates par coloration (Parbhakar-Fox et al., 2017)

La technique utilisée est encadrée en rouge

2.5.2 Préparation des solutions

La procédure de préparation des solutions suivie pour ce projet de coloration a été développée par le département métallurgie du Centre de Service et de Développement (CSD) de la compagnie de Agnico Eagle Mines Ltd. Cette procédure est dispensée en Annexe 8-7. Du côté de l'UQAT, les solutions ont été préparées dans les laboratoires de chimie de l'URSTM. Les solutions ont été conservées dans des bouteilles opaques, étiquetées et entreposées dans une armoire.

Pour l'application, les deux solutions d'alizarine red-S (ARS) et de Ferricyanure de potassium (PF) sont mélangées (50-50) en petite quantité dans un bécher et la surface des échantillons est brossée avec un pinceau. Il faut ensuite laisser la solution agir et attendre que la surface soit sèche (entre 5 à 10 minutes). Une seconde couche de réactif peut être apposée afin d'améliorer la coloration.

2.5.3 Interprétation

L'interprétation visuelle ou encore par l'intermédiaire des photographies peut se faire directement avec des tables comme celle proposée par le CSD d'Agnico Eagle Mines Ltd (Tableau 2-5)

Tableau 2-5: Identification des carbonates en fonction des réactifs utilisés (CSD, 2015)

CARBONATES		COLORATION		
		ARS	PF	ARS+PF
Hexagonal	Calcite (CaCO_3)	Rose Orange -	NON	Rose - Orange
	Aragonite (CaCO_3)	Rose Orange -	Bleu	Mauve, bleu - pourpre
	Calcite ferrifère (Ca,FeCO_3)	NON	NON	NON
	Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)	Mauve pâle	Bleu turquoise	Turquoise vert
	Dolomite ferrifère ($\text{Ca(Fe,Mg)}(\text{CO}_3)_2$)	NON	NON	NON
	Sidérite (FeCO_3)	NON	NON	NON
	Rhodochrosite (MnCO_3)	NON	Brun pâle	Brun pâle
Orthorhombic	Magnésite (MgCO_3)	Rose Orange -	NON	Rose - Orange
	Witherite (BaCO_3)	Rouge	NON	Rouge
	Cerussite (PbCO_3)	Mauve	NON	Mauve

2.6. La Diffraction des Rayons X (DRX)

La Diffraction des Rayons X (DRX) a pour objectif de déterminer la composition minéralogique des échantillons. Le rayonnement X (entre 0.1 et 10 nm) est appliqué sur l'échantillon préalablement pulvérisé et homogénéisé. La Loi de Bragg (Figure 2-15) est au cœur du principe de la DRX : le bombardement des rayons X va pénétrer le cristal, une partie de son énergie va être absorbée et exciter les atomes, émettant ainsi de la radiation qui sera capté par le détecteur (Truche, 2010)

$$\text{Loi de Bragg : } n\lambda = 2d\sin(\theta)$$

où n nombre entier correspondant à l'ordre de diffraction // d distance réticulaire

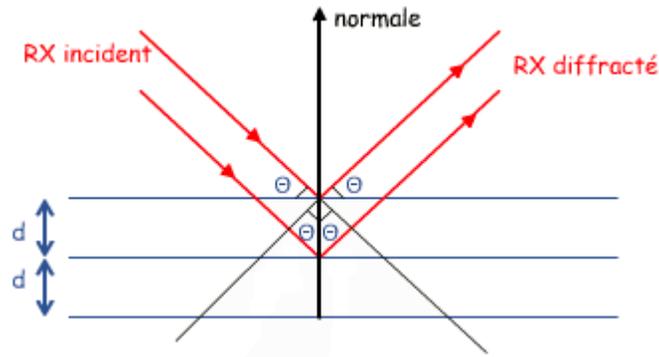


Figure 2-15: Diffraction des rayons X selon la Loi de Bragg (Truche 2010)

λ longueur d'onde du rayonnement // θ angle de diffraction

L'identification des différents minéraux se fait par comparaison des diffractogrammes obtenus lors de l'analyse et ceux connus de la littérature (Figure 2-16). Dans un premier temps, il faut identifier les phases présentes puis il est possible de modéliser les quantités avec la méthode Rietveld et ainsi obtenir une semi-quantification des minéraux présent dans l'échantillon. Les résultats sont traités par un minéralogiste qui va vérifier et faire concorder les résultats afin d'obtenir l'information la plus véridique possible. Les résultats sont compilés dans un tableau présentant chacun des minéraux et leur semi-quantification associée. Malheureusement, il est possible que certaines phases ne soient pas ou mal identifiées, il est donc important de prendre ces résultats avec parcimonie.

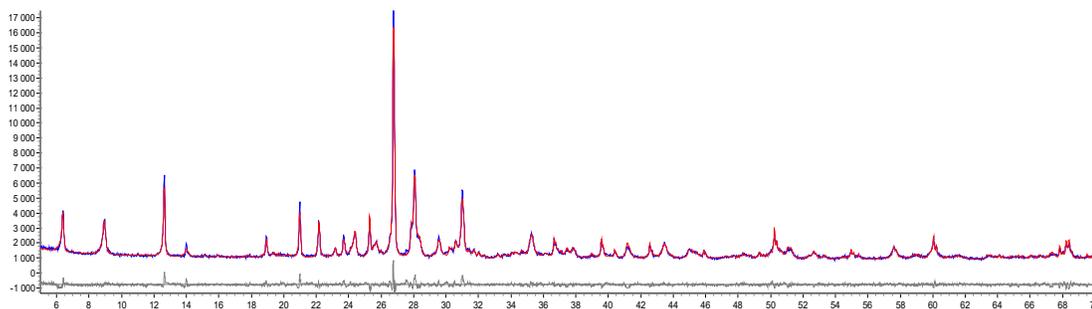


Figure 2-16: : Exemple de diffractogramme traité (données en bleu et modèle en rouge)

L'objectif derrière l'utilisation du DRX dans ce projet n'est pas de l'intégrer dans l'approche environnementale prédictive car il s'agit d'un outil déjà fort connu et utilisé lors de développement de projets miniers avec ses propres limitations (pas d'informations sur les minéraux mineurs (< 1-2%); pas d'informations sur les textures; processus long et destructif). Les résultats obtenus avec cet outil vont être comparés aux résultats obtenus par le Malvern ou encore l'imagerie macroscopique afin de vérifier leur pertinence ainsi que leur précision.

2.7. Récapitulatif

De manière à bien comprendre la différence et les similitudes entre les données fournies par les partenaires et les données recueillies lors de leur collecte avec les différents outils, la Figure 2-17 présente la démarche méthodologique appliquée spécifiquement pour le projet. Ainsi les informations à gauche sont les données provenant des sites partenaires et les données à droite correspondent à celles recueillies lors du projet. Le code couleur orange, jaune et vert correspond respectivement aux données géologiques, chimiques et aux nouveaux types d'information obtenus.

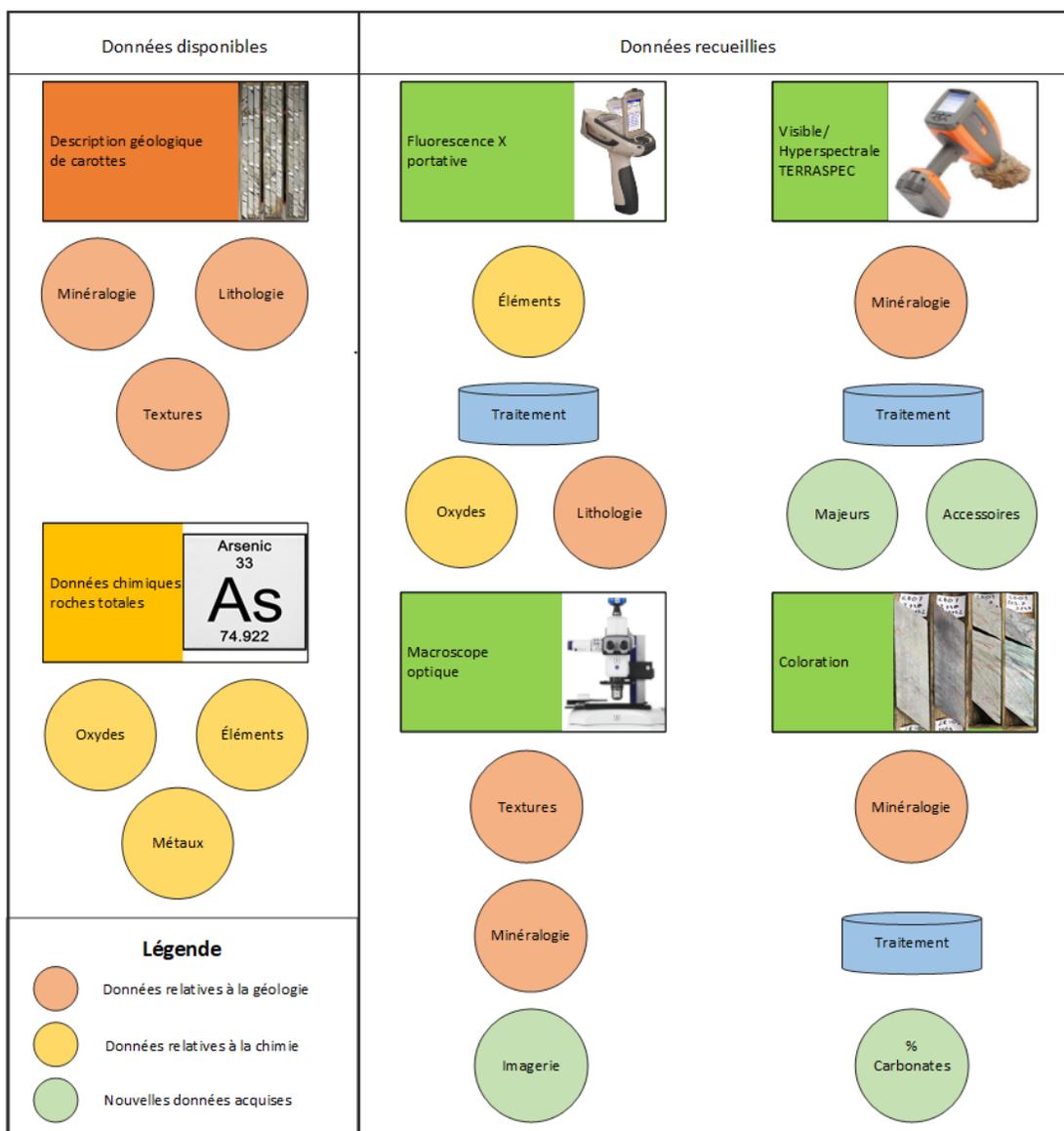


Figure 2-17: Diagramme synthétique de l'approche méthodologique du projet (données fournies par l'industrie à gauche et données récoltées au cours du projet à droite)

CHAPITRE 3: RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

Ce chapitre rapporte les travaux réalisés dans le cadre du projet MITACS « *lithominéralogie automatisée de carottes de forage et de poudres de minerais pour des applications géométallurgique et géoenvironnementale* ». Il est porté par deux professeurs de l'Institut de Recherche en Mines et Environnement (IRME) ainsi que trois organismes partenaires. La partie de ce projet présentée correspond au premier stage (Sous-projet 1) réalisé par l'auteur d'une durée de 3 mois (Mai-Juillet 2020). Ce stage a permis d'explorer et de documenter les différents outils de caractérisation (présentés en partie dans le chapitre précédent) ainsi que les différents défis géométallurgiques liés au cycle minier.

3.1. Présentation du projet

3.1.1 Description

Un projet minier regroupe de nombreux aspects avant le démarrage de l'exploitation, et doit faire face à de nombreux défis géologiques, environnementaux, géographiques ou d'acceptabilité sociale. Plus la connaissance du projet est grande, moins le risque associé est grand. Il est donc important de mettre en place des approches innovatrices dans les domaines géométallurgiques et géoenvironnementaux. Plus ces caractérisations sont réalisées en amont, plus les coûts seront diminués et les choix à réaliser seront réfléchis et adéquats aux problématiques identifiées.

Actuellement, les outils standards engendrent des coûts et des délais élevés afin de pouvoir caractériser le gisement de manière efficace. Ce projet a pour but d'étudier divers outils de caractérisation (microscopie optique, imagerie hyperspectrale, analyse LIBS, analyse FRX, analyse XRT et analyse DRX) permettant de générer des données pertinentes pour faire progresser un projet minier, notamment d'un point de vue métallurgique et environnemental.

3.1.2 Objectifs

Ce projet MITACS, en collaboration avec MISA, Mines Agnico Eagle et Clemex, a pour objectif de développer une méthodologie d'acquisitions d'information minéralogique, lithologique et environnementale en utilisant des outils d'analyses automatisés sur des échantillons de carottes de forages et des poudres de procédés minéralurgiques et métallurgiques. Cet objectif est divisé en trois sous-projets.

Le premier sous-projet a pour objectif d'évaluer les divers outils et technologies existantes de loggage automatisée et estimer leur apport potentiel dans une approche géoenvironnementale d'une modélisation de gisement. Ceci correspond donc à la revue de littérature pertinente pour le projet de maîtrise. Le second sous-projet consiste à réaliser une analyse au microscope optique automatisé en complément des outils de loggage prédéfinis. La collecte de données pourra alors être bonifiée, notamment au niveau de la caractérisation minéralogique. Également le second projet a pour objectif de développer l'imagerie hyperspectrale automatisée via un appareil de microscopie optique. Le troisième sous-projet vise à compiler les différentes données recueillies lors des deux étapes précédentes afin d'identifier et d'évaluer les facteurs métallurgiques et environnementaux d'importance.

3.1.3 Présentation des outils

En amont de ce projet, plusieurs technologies ont été identifiées et ce projet a pour objectif de déterminer leur applicabilité aux enjeux géoenvironnementaux et géométallurgiques d'un projet minier de demain. Ces technologies se basent sur l'analyse des spectres électromagnétiques (Figure 3-1) selon certaines longueurs d'onde (Tableau 3-1).

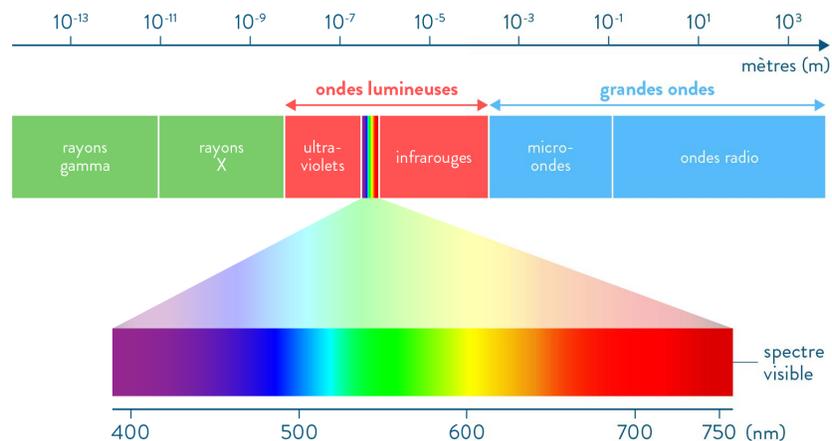


Figure 3-1 : Définition du spectre électromagnétique
(SchoolMouv, 2020)

Tableau 3-1 : Identification des domaines de longueurs d'onde.

Domaine	Longueurs d'onde
Le champ du visible	400 à 750 nm
Imagerie hyperspectrale (NIR; SWIR; LWIR)	750 à 5000 nm
Infrarouge thermique (TIR)	8000 à 12000 nm
LIBS	200 à 800 nm
Rayons X	0.01 à 10 nm
Radiations gamma	Inférieur à 0.01 nm
Activation neutronique (PGNAA)	Inférieur à 0.01 nm

Malheureusement toutes ces technologies ne sont, soit, pas assez matures pour une application au domaine minier, soit, ne correspondent pas assez aux enjeux du projet de recherche. Dans cette optique l'imagerie hyperspectrale, la fluorescence X et le LIBS ont été sélectionnés pour une veille plus approfondie. Il est à noter que l'imagerie du visible et proche infrarouge à l'échelle de la microscopie a également été étudiée, mais est développé en parallèle par un autre stagiaire.

Deux des technologies ont été déjà présentées dans le chapitre 2 : Méthodologie; L'imagerie hyperspectrale et la fluorescence X. Ces deux technologies ne seront pas plus

détaillées dans cette partie. Le LIBS quant à lui ne fait pas partie de la procédure développée pour le projet de recherche, cependant il a été sélectionné dans le cadre du stage MITACS.

3.2. Le LIBS

Principe

La spectrométrie sur plasma induit par laser (ou Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) est une technologie faiblement destructive qui consiste à détruire une surface micronique de l'échantillon grâce à un rayonnement focalisé à haute intensité afin de générer un plasma à haute température sur une zone très locale (allant jusqu'à 50 microns) qui pourra, ensuite, être analysé par un détecteur (Figure 3-2). La mesure ne dure que quelques nanosecondes, le temps que le plasma refroidisse et que les éléments se recombinent, c'est alors que les longueurs d'onde spécifiques du plasma sont mesurées par le spectromètre. Le détecteur va alors analyser chaque pixel selon leur longueur d'onde et leur intensité, générant ainsi un spectre spécifique à chaque point

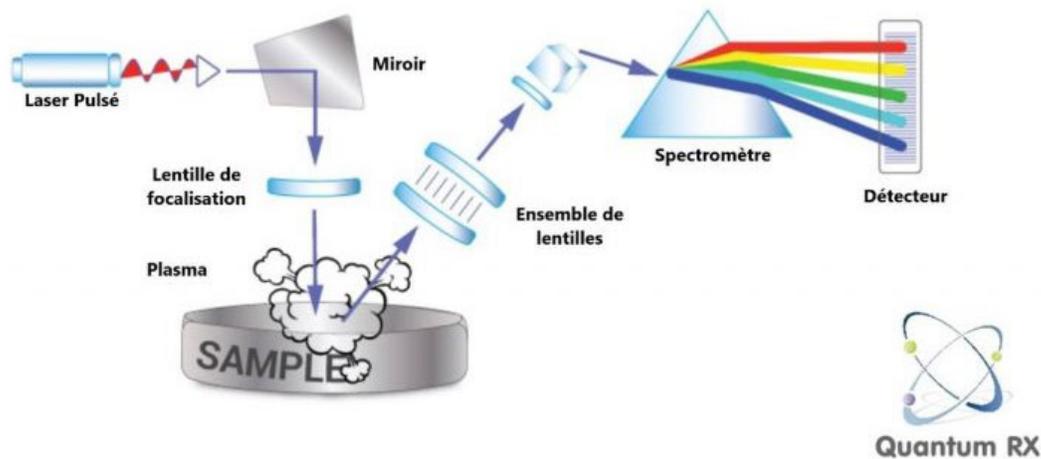


Figure 3-2: Principe du LIBS (Quantum RX, 2021)
d'échantillonnage (Harmon et al 2019).

La majorité des éléments sont capables d'être mesurés par le LIBS, les éléments légers sont mesurables par le LIBS contrairement au FRX. Le tableau 3-2 montre une sélection des éléments majeurs à gauche et des éléments associés à des gîtes minéraux à

Tableau 3-2: Longueurs d'ondes (nm) de certains éléments majeurs à gauche et métalliques à droite obtenus avec la technologie LIBS (Harmon et al 2019).

Element	Wavelength	Wavelength	Wavelength	Element	Wavelength	Wavelength	Wavelength
O	777.42	794.76	844.64	Ag	328.07	520.91	338.29
Si	288.16	251.61	390.55	Au	267.59	242.80	312.28
Al	309.30	394.40	396.15	Co	238.89	389.41	258.04
Mg	2795.5	383.33	279.80	Cr	425.44	427.48	284.33
Fe	259.94	259.84	438.35	Cu	521.82	324.75	578.21
Ca	393.37	396.85	422.67	Mn	478.34	482.35	602.48
Na	589.99	589.59	330.24	Mo	267.28	379.89	268.41
K	766.49	769.90	404.72	Ni	239.45	241.63	300.25
Li	670.78	610.35	812.62	Pb	405.78	438.65	363.96
B	249.77	249.68	208.96	Pt	265.95	214.42	224.55
Rb	780.03	794.76	-	Sn	380.10	283.99	317.50
Sr	430.54	407.78	460.73	Ti	334.94	375.93	376.13
Ba	452.49	614.17	389.18	Zn	472.22	481.05	328.23

droite avec leurs longueurs d'onde associées.

Limitations

Le LIBS est un outil connu depuis les années 1960 mais son application dans divers domaines (militaires, environnementaux, miniers...) est récent en lien avec l'évolution des technologies optoélectroniques (Bogue, 2004). Les récents développements ont permis l'élargissement du champ d'action du LIBS mais les bibliothèques de traitement de l'information sont en cours de développement dans le domaine minier. De plus, l'ablation de masse issue de la thermodynamique du plasma nécessitent des paramètres opérationnels très contrôlés (distances lentille/échantillon, pression atmosphérique, puissance du laser...) afin d'obtenir des résultats significativement bons (Cremers & Chinni, 2009). De manière similaire à la FRX, l'analyse au LIBS peut enregistrer des effets de matrice reliés à des problèmes de calibration ou encore d'entraînement de l'algorithme permettant une bonne identification d'un nouvel échantillon (Harmon et al.,

2019). Enfin, des problèmes d'acquisition reliés à la génération de poussières sur la lentille suite à l'ablation peuvent être générés et alors altérer les résultats.

3.3. Identifications des fournisseurs

La seconde étape de ce projet est de dresser un portrait du marché actuel selon les différentes technologies à travers le monde. Ce travail permet ainsi d'identifier les acteurs majeurs dans le domaine de l'imagerie hyperspectrale, le FRX et le LIBS. Après avoir effectué une recherche sur les différents produits et offre de services disponibles, certains fournisseurs ont été contactés afin d'obtenir plus d'informations spécifiques sur leur offre. Une fiche récapitulative a été rédigée après chaque entrevue permettant de réaliser un comparatif entre chaque produit notamment sur les aspects spécifiques du produit, le type de traitement réalisé, le type de résultats obtenus ou encore les coûts de service. Cette fiche a été produite comme livrable du projet MITACS.

Au travers de ce projet, plus d'une trentaine de fournisseurs a été identifiée à travers le monde, mais, pour le projet, seulement les principaux ont été contactés et leur modèle d'affaire étudiée (Figure 3-3).



Figure 3-3 : Principaux fournisseurs contactés lors de la phase deux du projet

Cette étude de marché a permis d'identifier plus clairement les enjeux du projet MITACS et également observer le point de vue de l'industrie envers eux. Elle a

également permis de réaliser une synthèse de la première partie qui est présentée dans la partie suivante.

3.4. Définition des défis géométallurgiques

Une fois les technologies identifiées, il est important de déterminer les objectifs et orientations du projet. Cinq grands aspects au sein de l'industrie minière ont été déterminés, l'exploration, la métallurgie, l'environnement, la géotechnique et la modélisation. Pour chaque domaine, les enjeux majeurs ont été identifiés pour permettre de mieux comprendre les informations à recueillir avec les technologies. Dans le cadre du projet MITACS, le partenaire MISA cherche à établir une cartographie des processus de l'industrie minière et une discussion des volets à développer a été entamée avec les ressources allouées à ce projet. Une version préliminaire (Figure 3-4) a été élaborée afin de pouvoir orienter le travail des autres stagiaires MITACS. Chaque domaine va être succinctement présenté dans cette partie.

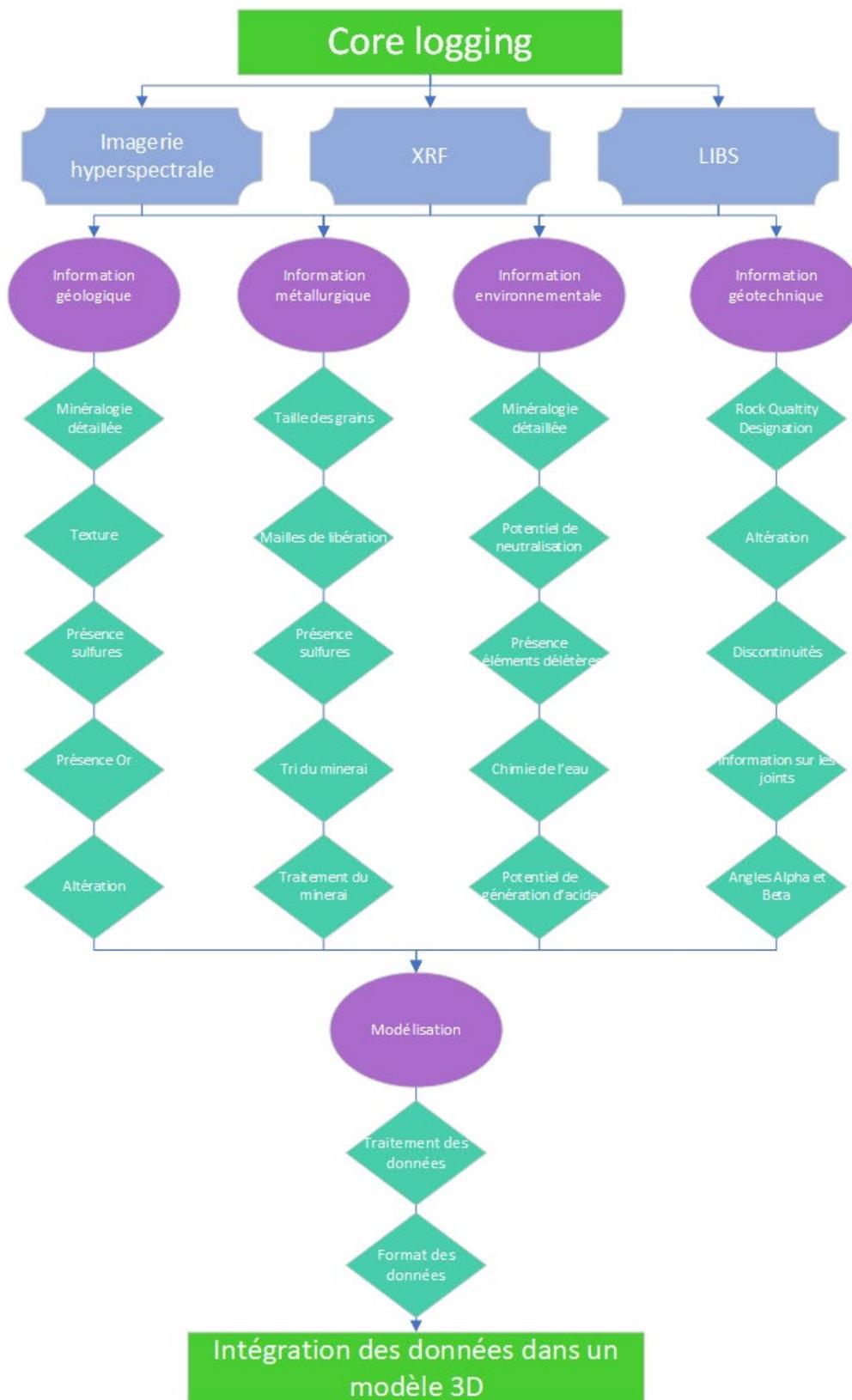


Figure 3-4 : Logigramme représentant les différents défis identifiés lors du projet MITACS

Exploration

Le volet exploration est un pilier dans l'industrie minière, car il est le secteur qui permet de générer de la valeur dans les projets, mais il reste l'un des secteurs les plus risqués, car la majorité des projets investigués ne débouchent pas vers la mise en production. C'est pourquoi il est important de mettre l'effort sur la caractérisation géologique afin de pouvoir comprendre le gisement. Dans le cadre du projet, les enjeux majeurs liés à la caractérisation géologique dans la phase d'exploration minière se basent sur la description des carottes de forage d'un point de vue :

- Minéralogie : Connaître les minéraux indicateurs, les associations minérales, les proportions ...
- Lithologie : Identifier les différents types de roches (encaissantes, porteuses de la minéralisation; créer des domaines de roches typiques du projet (Géomet)
- Présence en métaux: Identifier les zones d'intérêts ainsi que de la minéralisation et sers traceurs
- Texture : Identifier les textures principales ayant un impact sur la minéralisation ou sur la génération de la minéralisation
- Altération : Peut favoriser et défavoriser la présence de minéralisation, son extraction; peut servir de guide pour l'exploration (modèle géologique, compréhension du gisement)
- Fractures et structures : Permet de comprendre les relations entre les lithologies et si il y a un contrôle de la minéralisation

Métallurgie

Le volet métallurgie concerne la gestion de la production de minerais sur le site minier. Il regroupe l'ensemble des procédés de fabrication des métaux (dans le contexte du projet, l'or est le métal recherché), il combine aussi bien le tri du minerai brut que les processus d'extraction. Dans ce projet, plusieurs enjeux en lien avec la métallurgie ont été identifiés :

- Minéralogie : Connaître les phases minérales porteuses qui devront être traitées; identifier si la minéralogie peut générer des défis métallurgiques liés aux procédés d'extraction
- Taille des grains : Préparer la comminution et le traitement après broyage et quantifier la maille de libération
- Indice de fragmentation (comminution index) et dureté: Identifier la taille nécessaire de réduction des grains afin de pouvoir libérer l'élément d'intérêt et la dureté va déterminer l'énergie nécessaire pour réduire la roche.
- Textures et dureté : Les textures peuvent jouer un rôle dans la libération (encapsulation de l'or par exemple)
- Tri du minerai : Identifier les techniques de tri les plus performantes en fonction du type du contexte géologique et des informations précédemment récupérées
- Traitement du minerai : Identifier les techniques de récupération du minerai les plus performantes en fonction du type du contexte géologique et des informations précédemment récupérées

Environnement

Le volet environnement est primordial dans un projet minier, il va dicter la viabilité d'un projet en fonction du degré de risque environnemental évalué. Il va également permettre d'identifier les mesures à mettre en place lors du traitement du minerai et de la gestion des résidus afin que les effluents miniers respectent les normes environnementales émises par le gouvernement. Dans le cadre de ce projet, les enjeux identifiés sont :

- Minéralogie : Identifier les minéraux de types carbonates et sulfures, et les quantifier
- Potentiel de neutralisation : Estimer le potentiel de neutralisation de la roche avec l'identification des carbonates notamment
- Potentiel de génération d'acide : Estimer le potentiel de génération d'acide de la roche avec l'identification des sulfures notamment

- Présence d'éléments délétères : Identifier les minéraux pouvant être porteurs d'éléments nocifs pour l'environnement et leurs concentrations mise en relation avec les fonds géochimiques

Géotechnique

Le volet géotechnique est important lors de la phase d'aménagement et de production de la mine. Un loggage géotechnique est généralement fait lors de cette étape, les géologues doivent retravailler sur les carottes préalablement loguées afin d'identifier les risques structuraux, de connaître les structures en place et les propriétés géomécaniques des roches. Obtenir ces informations dès le début pourrait ainsi, éviter de devoir travailler une seconde fois sur les mêmes échantillons. Enfin, de l'instrumentation de foreuses pourrait être utilisée afin d'obtenir le maximum d'informations in situ, sans modification et altération de la donnée suite au forage et à l'extraction de la carotte.

- Minéralogie : Permet de connaître la minéralogie afin d'identifier la qualité géomécanique de la roche
- RQD (Rock Quality designation) : Calculer le RQD de manière automatique
- Informations sur les joints et la dureté : Connaître les faiblesses dans la roche pouvant créer de l'instabilité
- Angles de discontinuités (Alpha et Beta) : Obtenir l'information en trois dimensions des structures majeures avec uniquement la carotte de forage, cela nécessite des forages orientés
- Altération : Connaître le degré d'altération, permet d'estimer la dureté du matériel
- Fractures et structures : Identifier les structures (Failles, plis, foliations...) générales et leur intensité permettant de dresser le portrait géotechnique du gisement.

Modélisation

Le volet modélisation permet de faire le lien entre les différents volets et ainsi représenter le gisement de manière globale et précise. Plus les informations vont pouvoir être recoupées plus la confiance dans le modèle 3D va être grande.

- Traitement des données : Automatiser l'acquisition et le traitement des données par apprentissage machine
- Format des données : Trouver un format de données universel pour les différents logiciels utilisés par la compagnie et les différentes équipes.
- Homogénéité des données : Permettre d'avoir une homogénéité de toutes les données au cours du projet
- Intégration des données : Prendre chacun des volets et les réunir dans un modèle 3D du gisement

3.5. Synthèse

Cette synthèse correspond à la compilation des informations obtenues dans les deux phases précédentes. Elle a pour objectif de faire un état des lieux de chaque technologie en fonction des données obtenues lors des entrevues avec les représentants des fournisseurs contactés. Cette synthèse est construite autour des cinq axes géométallurgiques présentés dans la première partie de ce chapitre. Chaque axe est défini par des sous-objets (Annexe 8-8) pour lesquels une valeur lui est attribuée. (Figure 3-5)

D'après les résultats obtenus lors des phases précédentes, deux types d'outils par technologies ont été identifiés. En effet l'imagerie hyperspectrale peut être séparée en deux catégories, les outils permettant de faire une cartographie hyperspectrale et les outils permettant de faire une série d'analyse linéaire sur l'échantillon. La FRX peut se distinguer par les spectromètres portatifs et les appareils permettant d'analyser une boîte de carotte complète. Enfin, le LIBS est divisé en deux catégories, le LIBS portatif et le LIBS de table.

Domaine	Cartographie Hyperspectrale	Scan linéaire hyperspectral	FRX portatif	FRX boîtes de carottes	LIBS portatif	LIBS de table
Géologie						
Minéralogie	Fonctionne	Fonctionne	Fonctionne partiellement	Fonctionne partiellement	Fonctionne partiellement	Fonctionne
Lithologie	Fonctionne	Fonctionne	Résultats approximatifs/Inc	Fonctionne		
Identification élémentaire	Non fonctionnel	Non fonctionnel	Fonctionne	Fonctionne	Fonctionne	Fonctionne
Textures	Fonctionne	Fonctionne	Non fonctionnel	Fonctionne	Fonctionne partiellement	Fonctionne
Teneur en or	Résultats approximatifs/Incertain	Résultats approximatifs/Incertain	Fonctionne partiellement	Fonctionne partiellement	Fonctionne	Fonctionne
Minéralogie d'altération	Fonctionne	Fonctionne	Fonctionne partiellement	Fonctionne partiellement	Fonctionne partiellement	Fonctionne
Métallurgie						
Tri du minerai	Fonctionne	Fonctionne	Non fonctionnel	Résultats approximatifs/Incertain	Résultats approximatifs/Incertain	Non fonctionnel
Détection des sulfures	Résultats approximatifs/Incertain	Résultats approximatifs/Incertain	Fonctionne	Fonctionne	Fonctionne	Fonctionne
Taille des grains	Fonctionne	Fonctionne partiellement	Non fonctionnel	Fonctionne partiellement	Fonctionne partiellement	Fonctionne partiellement
Traitement du minerai	Résultats approximatifs/Incertain	Résultats approximatifs/Incertain	Non fonctionnel	Fonctionne partiellement	Non fonctionnel	Fonctionne partiellement
Communion	Fonctionne partiellement	Fonctionne partiellement	Non fonctionnel	Fonctionne partiellement	Non fonctionnel	Fonctionne partiellement
Modélisation						
Classification des données	Fonctionne	Fonctionne partiellement	Non fonctionnel	Fonctionne	Fonctionne partiellement	Fonctionne
Types de données	Fonctionne partiellement	Fonctionne partiellement	Fonctionne partiellement	Fonctionne	Fonctionne partiellement	Fonctionne partiellement
Environnement						
Détermination duPGA /PN	Résultats approximatifs/Incertain	Résultats approximatifs/Incertain	Résultats approximatifs/Inc	Fonctionne partiellement	Fonctionne	Fonctionne
Éléments délétères	Non fonctionnel	Non fonctionnel	Fonctionne	Fonctionne	Fonctionne	Fonctionne
Geotechnics						
RQD	Fonctionne	Non fonctionnel	Non fonctionnel	Fonctionne	Non fonctionnel	Fonctionne partiellement
Minéralogie d'altération	Fonctionne	Fonctionne	Fonctionne partiellement	Fonctionne partiellement	Fonctionne partiellement	Fonctionne
Informations sur les joints	Fonctionne	Non fonctionnel	Non fonctionnel	Fonctionne	Non fonctionnel	Fonctionne
Dureté	Fonctionne	Fonctionne	Résultats approximatifs/Inc	Fonctionne	Non fonctionnel	Fonctionne
Fracturation / Structures	Fonctionne	Fonctionne partiellement	Résultats approximatifs/Inc	Fonctionne	Non fonctionnel	Fonctionne
Angles Alpha/Beta	Fonctionne partiellement	Non fonctionnel	Non fonctionnel	Fonctionne partiellement	Non fonctionnel	Fonctionne partiellement

Fonctionne	Donne de bons résultats
Fonctionne partiellement	Donne des résultats dépendant de la qualité de la calibration
Résultats approximatifs	Donne de l'information qui peut être utile, mais avec peu de certitude. Projets de recherche
Non fonctionnel	Ne fonctionne pas, ne donne pas d'information pertinente
	Pas d'information à ce sujet

Figure 3-5 Synthèse de l'efficacité des outils étudiés selon chacun des volets

3.6. Poursuite du projet

Ce stage rentre dans une approche géométallurgique d'optimisation des processus d'un point de vue de recherche avec la participation de l'UQAT, mais également d'un point de vue industriel avec la participation, notamment, d'Agnico Eagle Ltd et de l'organisme MISA. Il représente la première partie de ce projet, et deux autres stages de plus longue durée et démarrés en parallèle complètent cette étude.

Les résultats de ce stage ont permis de faire appel à des fournisseurs afin de réaliser des essais de laboratoire. Il a également permis de faire une cartographie des processus des étapes d'exploration, afin de définir une approche géométallurgique dans son ensemble. Ce travail de cartographie est réalisé par l'organisme MISA et un étudiant de Polytechnique Montréal.

L'intérêt de ce projet de MITACS dans ce mémoire de maîtrise l'utilisation des outils d'analyse non destructive permettant d'obtenir beaucoup d'informations sur la composition de la roche via l'observation des carottes de forage. Il a également permis de connaître les enjeux et défis de l'industrie d'extraction minière, mais également ceux des fournisseurs de technologie. L'intervention des différents fournisseurs ainsi que de plusieurs experts a permis de préciser le type d'outils à tester dans le cadre de cette maîtrise d'un point de vue réaliste compte tenu de la faible quantité d'échantillons à notre disposition, mais également d'un point de vue contribution à l'évaluation de l'aspect environnemental du projet.

CHAPITRE 4: EVALUATION OF RAPID NONDESTRUCTIVE TOOLS FOR PRELIMINARY ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT AT THE EXPLORATION STAGE OF A MINING PROJECT

4.1. Préambule :

Ce chapitre présente un article soumis à la revue *Minerals Engineering* portant sur l'évaluation d'outils non destructifs et rapides pour l'estimation préliminaire des risques environnementaux au stade de l'exploration d'un projet minier. Cet article a été soumis le 10 décembre 2021. L'auteur principal est Alban Duvernois affilié à l'IRME-UQAT et les co-auteurs Isabelle Demers, Li Zhen Cheng et Carmen Mihaela Neculita sont également affiliés à l'IRME-UQAT.

4.2. Résumé :

L'évaluation environnementale est étudiée lorsqu'un projet minier est à un stade de développement avancé tel que l'étude de pré faisabilité. Cette dernière est une étude approfondie basée sur plusieurs tests pertinents tels que des essais statiques et cinétiques, qui sont souvent longs et coûteux lorsqu'ils sont effectués sur un grand nombre d'échantillons. Obtenir des informations environnementales préalables pour détecter une contamination potentielle est essentiel pour réduire le nombre d'échantillons requis pour la caractérisation environnementale globale. La présente étude vise à sélectionner des outils efficaces et appropriés pour améliorer la méthode d'évaluation environnementale. Trois outils (FRX, spectromètre minéral, coloration des carbonates) ont été identifiés pour former une méthodologie d'évaluation environnementale préliminaire. Cette méthodologie est appliquée sur deux projets miniers différents : i) une mine bien développée (LaRonde zone 5) avec un set complet de géochimie dans un contexte de sulfures massifs, et ii) un projet d'exploration (projet O'Brien) avec un set de données géochimiques en cours d'acquisition dans un contexte de veines de quartz aurifère. Les deux sites sont situés au sud du Groupe de Blake River dans la ceinture de roches vertes de l'Abitibi, Québec, Canada. Le premier site est utilisé pour valider la méthodologie développée. Tandis que le second sert de site d'essai pour appliquer la méthodologie en

tant qu'évaluation environnementale préliminaire. Les résultats du premier site démontrent que les outils sélectionnés fournissent des ensembles de données géochimiques et minéralogiques comparables aux essais réguliers. Il permet ensuite d'établir une classification en domaines géoenvironnementales préliminaires pour le second site. La contribution de la présente étude est de réduire le nombre d'échantillons à faible risque et de se concentrer sur les échantillons à haut risque dans des évaluations environnementales subséquentes.

4.3. Abstract

Environmental assessment is generally performed when a mining project is at an advanced development stage, such as the prefeasibility study. Environmental assessment involves several laboratory tests such as detailed characterisation and geochemical behavior prediction tests, which require a large number of samples considered to be representative of the deposit. Prior environmental information detecting potential contamination can help to decrease the number of samples required for the overall environmental characterisation. The present study proposes a selection of effective and appropriate tools for improving the early environmental assessment of a mineral deposit. Three tools (XRF, mineral spectrometer, carbonate staining) were identified to form a preliminary environmental assessment methodology. This methodology was applied on two different mining projects: i) a well developed mine, LaRonde zone 5, with available geochemical data in a VMS context, and ii) an exploration project, O'Brien project, with ongoing geochemical acquisition in an Au-quartz vein context. Both sites are in the south of the Blake River Group within the Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada. The first site was used to validate the developed methodology, whereas the second acted as a test site to apply it as a preliminary environmental assessment. The results on the first site confirmed that the selected tools provide geochemical and mineralogical data sets comparable to those of regular testing. The developed methodology then enabled the classification of preliminary geoenvironmental domains for the second site. The validated methodology in the present study permitted to reduce the number of low-risk samples and to focus on the potentially higher risk samples for further environmental assessments.

4.4. Introduction

Six distinct phases represent the mining cycle: prospecting and exploration, project development, mining and beneficiation of ore, closure and reclamation of the site, and environmental monitoring (AMQ, 2020). The first two phases generally cover on average a period of 8 to 10 years before operations begin. During this long period of project development, the geology teams perform drilling campaigns to collect information in order to establish the geological model of the deposit. If this first step is successful, the project will be enhanced with the definition of technical (e.g., type of extraction) and economic parameters through pre-feasibility and feasibility studies. It is during this phase that, generally, the environmental risks are estimated via the identification of the potential impacts that the mine could generate in the future (Lottermoser, 2017). During the exploration stage, the emphasis is put on detecting the revenue making resources (e.g., gold or copper) and environmental assessment is minimal. Yet, environmental risks can have a significant impact on the success or failure of a mining project, due to social acceptability and with the update of the legislation (Loi sur la qualité de l'environnement, 2021; Owen & Kemp, 2013). With recent technological developments, core characterization tools make it possible to obtain rapidly and in a mostly non-destructive way information on the mineralization, texture, physical properties, structure, chemical content, rapidly, and in a mostly non-destructive way (Bolin & Moon, 2003; Chopard et al., 2019; Michaux & O'Connor, 2020). These data are acquired systematically for the resource definition but not for environmental studies, although the raw data are the same. It then becomes important to find methods to allow the processing of the available information in a geo-metallurgical and geoenvironmental model to optimise decision-making at the project development stage.

4.4.1 Environmental risks

The mining industry is known to pose significant environmental risks to the surrounding environment, mostly associated with solid mine waste (Dold, 2017). Physical stability issues with tailings storage facilities have received significant attention in the last few years due to catastrophic failures (Global Tailings Review, 2020). Chemical stability issues can be related to the mineralogical composition of the mine

waste. One of the most common issue associated to sulfidic orebodies is acid mine drainage (AMD) which is produced by the oxidation of sulfides (e.g. pyrite, pyrrhotite) in contact with meteoric water and atmospheric oxygen (Lindsay et al., 2015; Bussière & Guittonny, 2021). AMD decreases water pH and enhances metal solubility, leading to effluents with high acidity, and concentrations of sulfate and dissolved metals (Blowes et al., 2014). Another risk is related to neutral pH drainage where several elements can be mobilized at near neutral conditions ($\text{pH} > 6$) and may exceed acceptable levels, such as Sb, As, Cd, Cr, Zn (MEND, 2004; Plante et al., 2011). In this study, both types of drainage (AMD and contaminated neutral drainage) will be referred to as contaminated mine drainage (CMD).

Acid generation assessments are made at different stages of the mine life cycle to evaluate the potential for CMD from mine waste. The most common assessment tests can be divided into two categories: 1) static tests (e.g. NAG, Acid Base Accounting, Sobek...) (Jambor et al., 2007) which identify the acid generation and neutralisation potential, as an overall balance between the acid forming and acid consuming components of the sample; 2) kinetic tests (e.g. humidity cells, columns) (Lawrence & Marchant, 1991; Miller et al., 1997; Price & Kwong, 1997) which evaluate the geochemical reaction rates implied in acid generation and neutralisation. They are performed over several weeks to months to document the depletion rates of acid forming and acid consuming minerals. For static and kinetic tests, the selection of representative samples is essential to ensure results validity (Steffen et al., 1989). Mineralogical composition is poorly involved in static tests, eventhough mineralogy has a significant impact on CMD generation. Theoretical methods have been developed to consider mineralogy in acid base accounting, but their application remains limited (Plante et al., 2012). Yet, static and kinetic tests are part of environmental assessments for project permitting, as well as providing information on mitigation strategies to limit the environmental impacts on the wildlife and the surrounding communities. The Geochemistry-Mineralogy-Texture (GMT) approach was developed to structure the prediction of CMD by thorough characterization of chemistry, mineralogy and texture of samples considered at risk (Parbhakar-Fox et al., 2011, 2013).

All these aspects are increasingly integrated into the geometallurgical approach, which aims to maximize a deposit's value while minimizing technical, operational, and environmental risks. Advantages include reduction of technical and economical risks and improvement of production planning and decision-making (Lishchuk et al., 2020). Based on previous studies (Dold, 2008; Parbhakar-Fox, 2012; B. G. Lottermoser, 2017), the use of a geometallurgical approach is beneficial to properly classify and identify the challenges of mine development and operation using data from mineralogical, geochemical, beneficiation and geotechnical studies.

Development of a geoenvironmental approach or a geoenvironmental model (Plumlee & Nash, 1995) is based on the same principles as a geometallurgical approach but applied for environmental parameters. Such an approach needs to subdivide a deposit into geoenvironmental domains where each domain contains rocks that will react in a homogeneous way as waste. However, this approach is descriptive and cannot be used as an accurate predictive tool, since regular experiments still need to be realised to confirm a geoenvironmental model (Vermette, 2018). The GMT approach has also been developed for waste classification (Parbhakar-Fox, 2012b) and is divided in three stages to adequately determine the CMD and reduce the number of samples needed between each stage.

Given the need for environmental data, the purpose of this study is to select known analytical tools which are or can be used at the exploration stage for mineralogical and geochemical characterisation to facilitate sample selection for further geoenvironmental approaches, such as GMT. At the exploration stage, core analysis tools can provide relevant data for geoenvironmental purposes, depending on the specificity of the equipment and the geological features of the deposit. For example, hyperspectral analyses can provide information on mineralization types, alteration, textural features and can give information about the origin of the deposit and its history (e.g. chemical interaction, structures) (Egaña et al., 2020). Core samples from two deposit sites were selected to evaluate the possibility of using rapid, nonintrusive analytical tools on core samples. The first deposit was used for data validation, whereas the second was utilized for preliminary environmental risk assessment.

4.5. Materials and methods

4.5.1 Site A and site B presentation

The two deposits studied are located in the Abitibi-Témiscamingue region, 30 km southeast of Rouyn-Noranda (Figure 1-10), in the Cadillac mining camp (Quebec, Canada). Site A refers to the LaRonde Zone 5 (LZ5) mine on the Bousquet property (LaRonde Complex), which is currently in production. The general geology corresponds to volcanic and volcanoclastic units hosting two world class deposits, the Bousquet Dumagami VMS deposit and the Westwood intrusion related and VMS deposit (Westwood mine) (Figure 1-10) (Boily-Auclair et al., 2020).

The LZ5 mineralization is associated with gold-rich disseminated and stringer sulfides (pyrite, chalcopyrite, sphalerite and pyrrhotite). The samples used in this study come from a single drill hole, S11-44 which intersects the major geological formations of LZ5 deposit. In total, 41 20-cm long samples were selected from this drill hole. In addition, the mine provided us with existing data (e.g., chemical analyses, geological descriptions, environmental parameters). Site B refers to an exploration project based on an old gold mine site that operated between 1924 and 1956. This second site is currently owned and developed by Radisson Mining Resources as the O'Brien project. The main gold mineralization is associated to quartz veins hosted in conglomerates surrounded by volcanic units (Kenneth Williamson (3DGeo-solution), 2019). In total, 17 samples were selected with the geology team to cover all the lithologies of interest and form several drill holes distributed over the whole property.

These two sites were selected because of their geological similarity with respect to the volcanoclastic context but with different types of gold mineralisation. The sites are at different stages of the mine life cycle: site A is in operation, with access to numerous data (geochemical and drilling), whereas site B is at the exploration/development stage with incoming drilling and geochemical data

4.5.2 Sample preparation

Half core samples from both sites were sent from the company site to UQAT laboratories, and then were labelled. All measurements were made on the sawed surface. For site A, samples were placed in a core box according to their relative depth. For site B,

samples were placed in a core box according to their lithology. The samples were dusted and visually observed to get a first description of the geology. Each drill core sample was observed to determine two homogeneous analysis points which are visually representative of the entire sample and, if observed, areas of interest for additional analyses. Each zone was numbered in ascending order: the first two numbers corresponding to points considered to be representative of the whole sample core. Then, several analytical tools were used to identify the main features related to their potential environmental behaviour.

4.5.3 Analytical methods

Based on a detailed literature and technology review, three rapid and non-destructive tools were selected to identify the main chemical elements (portable XRF), the alteration minerals (mineral spectrometer) and the type of carbonate minerals (staining). These tools are presented in the following sections.

4.5.3.1 Portable XRF

The tool used for the X-ray fluorescence analysis was a Niton XL3t 900SHE hand-held XRF instrument from Thermo Fischer Scientific. The specific parameters of the analysis are presented in Tableau 4-1. The scanner was placed on the half core, which was previously cleaned to remove surface dust.

Tableau 4-1 : XRF acquisition parameters

Parameters	Details
Acquisition Time	60 seconds
Type of analysis	Cu/Zn Ore
Area	1 cm ²
Standard	Two types of standards V6: Andesite V9i: Intermediate tuf
Filters	Four successive filters Main: 15 seconds Low: 15 seconds High: 15 seconds Light: 15 seconds
Vacuum	Helium
Number of analyses per sample	Minimum 2 – up to 6

Once the analyses are done, the data are imported in a visualisation software (NDT 6.5.5) and then exported in an Microsoft excel format. The global chemistry analyses (points 1 and 2 of each sample) were selected to estimate the oxide content. The concentrations of Si, Al, Ca, Cr, Fe, Mg, Mn, Na, P, T were converted into SiO₂, Al₂O₃, CaO, Cr₂O₃, Fe₂O₃, MgO, MnO, Na₂O, P₂O₅, TiO₂, respectively. Others elements such as S, As, Cu, Zn, Pb are also measured.

4.5.3.2 Mineral spectrometer

The Terraspec Halo ASD is a VIS-NIR-SWIR spectrometer from REFLEX/IMDEX Limited. It is a handheld field tool developed for outcrops measurements, but the ideal use is on powders to get an accurate result on the sample composition. For this study, this spectrometer was used on half cores for a semi-quantitative mineralogical composition. A spectralon® routine was used before each period of acquisition as a blank. A mylar sheet was also used to verify the quality of the analyses. Two types of data are available from the spectrometer: raw data and data processed with an artificial intelligence software. Raw data consist of several minerals identified with a given confidence level (1 to 3 stars). These results give a first qualitative estimation and need to be used carefully. The raw data can be imported into the AiSIRIS software developed by REFLEX/IMDEX Limited which processes the data and gives the user spectral parameters on the specific absorption features, such as composition or crystallinity. It also refines the mineralogical composition estimate.

The mineral composition semi-quantitative estimate is given relative to its spectral contribution and not its weight percentage. Moreover, the global measure is rounded to 100%, meaning that only detected minerals are considered; if a mineral is not detected, it is not added to the results. The specific minerals from each category are displayed in the AiSIRIS output table (IMDEX, 2019). Unidentified minerals, such as quartz, feldspar, sulfides, and magnetite, do not have specific features in the infrared or visible range.

4.5.3.3 Carbonate staining

Staining was used to detect the presence or absence of carbonates on the surface of the samples. The procedure was adapted from (Parbhakar-Fox et al., 2017). It involved two reactive agents, alizarin red-S (ARS) and potassium ferricyanide (PF), mixed with hydrochloric acid (HCl). A solution composed of 2 g ARS, 2 g PF, and 250 ml of HCl (2%) was prepared. The solution was applied on the half core with a paint brush and several coats were layered to cover the entire sample. Then, the cores were left to dry for 10 to 15 min. The stained samples were observed by the naked eye and the types of carbonates were identified according to the color chart shown in Tableau 4-2.

Tableau 4-2 : Identification of stained carbonates (modified from Parbhakar-

Carbonates	Staining agent	Carbonates	Staining agent
	ARS+PF		ARS+PF
Calcite	Rose-Orange	Magnesite	NA
Ferroan calcite	Mauve purple	Rhodocrosite	Pale brown
Dolomite	NA	Aragonite	Rose-Orange
Ferroan Dolomite	Turquoise green	Witherite	Red
Siderite	NA	Cerussite	Mauve

Fox
et
al.,
2017
)

4.5.3.4 Referene method

A binocular microscope Axio Zoom V16 was used as a descriptive tool. The half core was placed on a core holder to stabilize it as the microscope movements were automated. The sample was placed onto the microscope plate and illuminated with a white light. The focus was automatically made with the zoom level defined by the user (for this study: x8). For this project, the binocular images were used as a visual support. However, the information from an optical microscope can be highly relevant and allows the geologists to do better geological description such as mineralization, textures, and alteration.

X-Ray diffraction (Bruker D8 Advance) is used to validate the results obtained with the previous non-destructive methods (Truche, 2010). Ten samples from site A were prepared by crushing, pulverizing, and homogenization into a fine powder and analysed

by XRD. Interpretation of the diffractograms was performed with the Diffrac.EVA v 5.2.0.3 software to match the corresponding peaks from the data and the models from the literature. Once the minerals were identified, a second software, TOPAS v 4.2, was used to quantify the mineral content with the Rietveld method. The minerals determined by XRD were grouped into families matching those determined by the spectrometer (Tableau 4-3).

Tableau 4-3 : Matching groups between mineral spectrometer and XRD results

Spectrometer Groups	Quartz (wet silica)	Feldspaths	Sulfide/oxide	Chlorite	Carbonates
XRD	Quartz	Albite	Magnetite	Chamoisite	Calcite
		Oligoclase	Pyrite	Clinochlore	Dolomite
		Anorthite	Pyrrhotite		Siderite
		Labradorite	Galena		Witherite
		Microcline/ orthoclase	Ilmenite		
			Rutile		
Spectrometer Groups	Clays	Fluorapatite	Biotite	Muscovite	Epidote
XRD	Palygorskite	Fluorapatite	Fluorannite	Muscovite	Piemontite

4.6. Results

4.6.1 Site A

The samples were processed in the following sequence: i) a global visual diagnostic of each sample with the choice of representative analysis points, ii) XRF analyses, iii) mineral spectrometer analyses, iv) macroscopic photography and staining, v) and, for selected samples, the XRD analyses. The samples from site A were compared to known data (ICP results, XRD, logging tables) to verify the validity of the process.

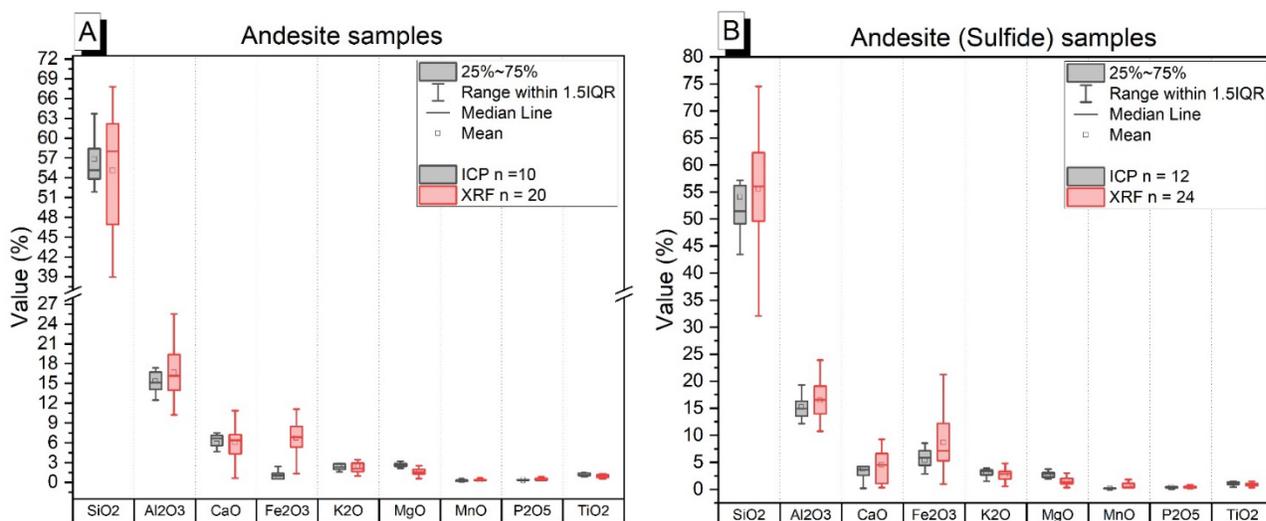
4.6.1.1 Site A oxide comparison

The following elements were compared as oxides for the six main lithologies of site A: Si, Al, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, and Ti, using XRF results and ICP-OES chemical results provided by the mine personel. The data were compiled for different lithologies as shown in Figure 4-2. Box plots indicate the range of data for each analytical method. The outliers were removed as they were not representative of the global lithology chemistry.

The number of analyses per lithology depended on the samples available (between 1 and 12).

The general trend shows similar oxides contents with XRF and ICP analyses. XRF can be considered as average chemical results for lithological identification. The dispersion for XRF results is larger than with ICP because of the tool's precision, which can be improved by upgrading the XRF procedure with additional features (e.g., filters, longer acquisition time, new analyses spots).

Several oxides, such as SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , K_2O , MgO , P_2O_5 and TiO_2 give similar results independently from the lithology, except Fe_2O_3 which is overestimated compared to the ICP results for each lithology (Figure 4-1 A-F). Indeed, ICP analyses require the crushing, homogenisation, and digestion of the sample, whereas XRF is a non-destructive tool and analyzes a single surface spot. Moreover, as Fe is mainly related to sulfides, Fe_2O_3 is more sensitive to spatial heterogeneity of sulfides than the other oxides. The result is, then, dependent on the localisation of the analysed spot.



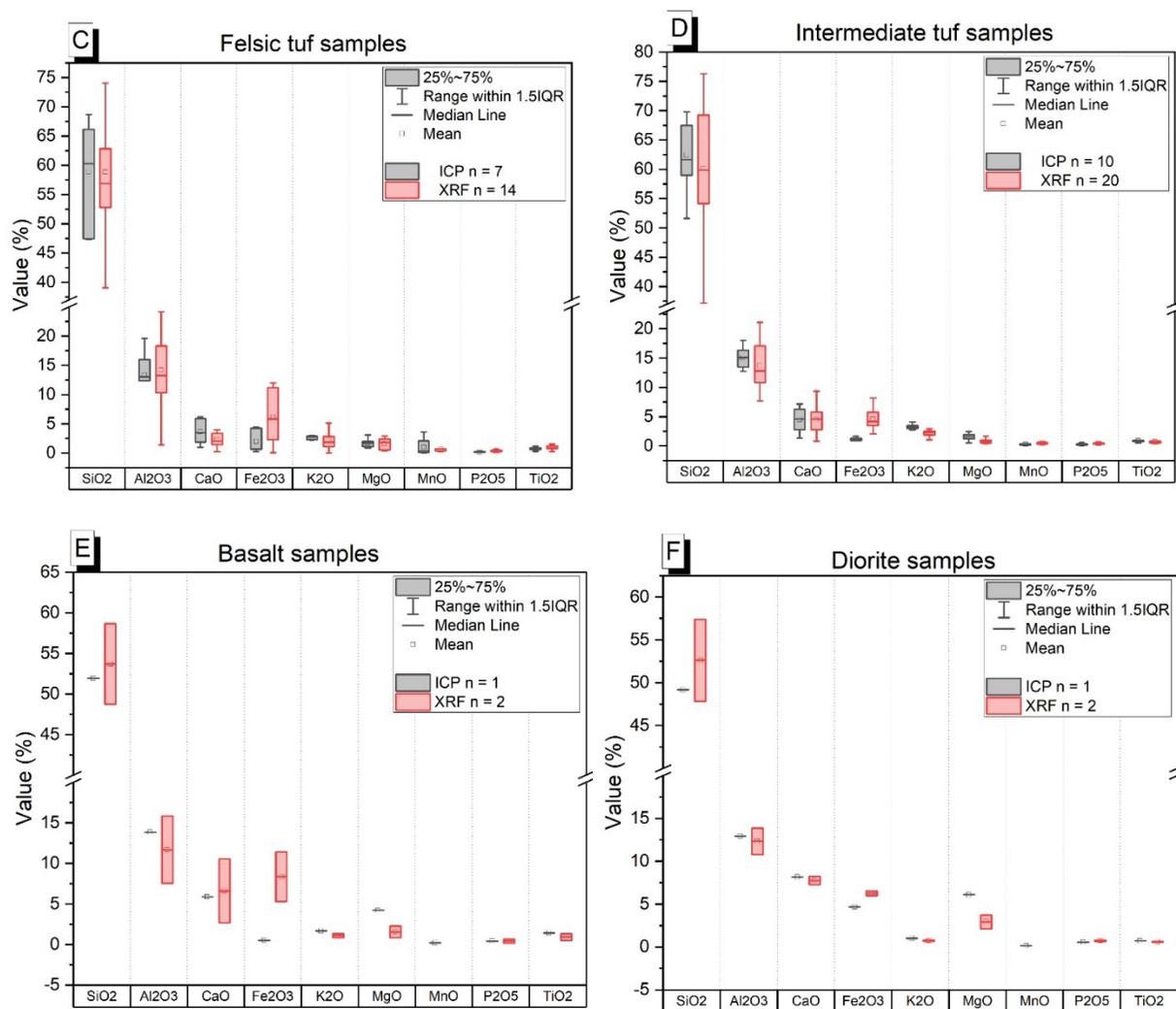


Figure 4-1 : Comparison of oxide concentrations between ICP and XRF measurements of different lithologies for Site A

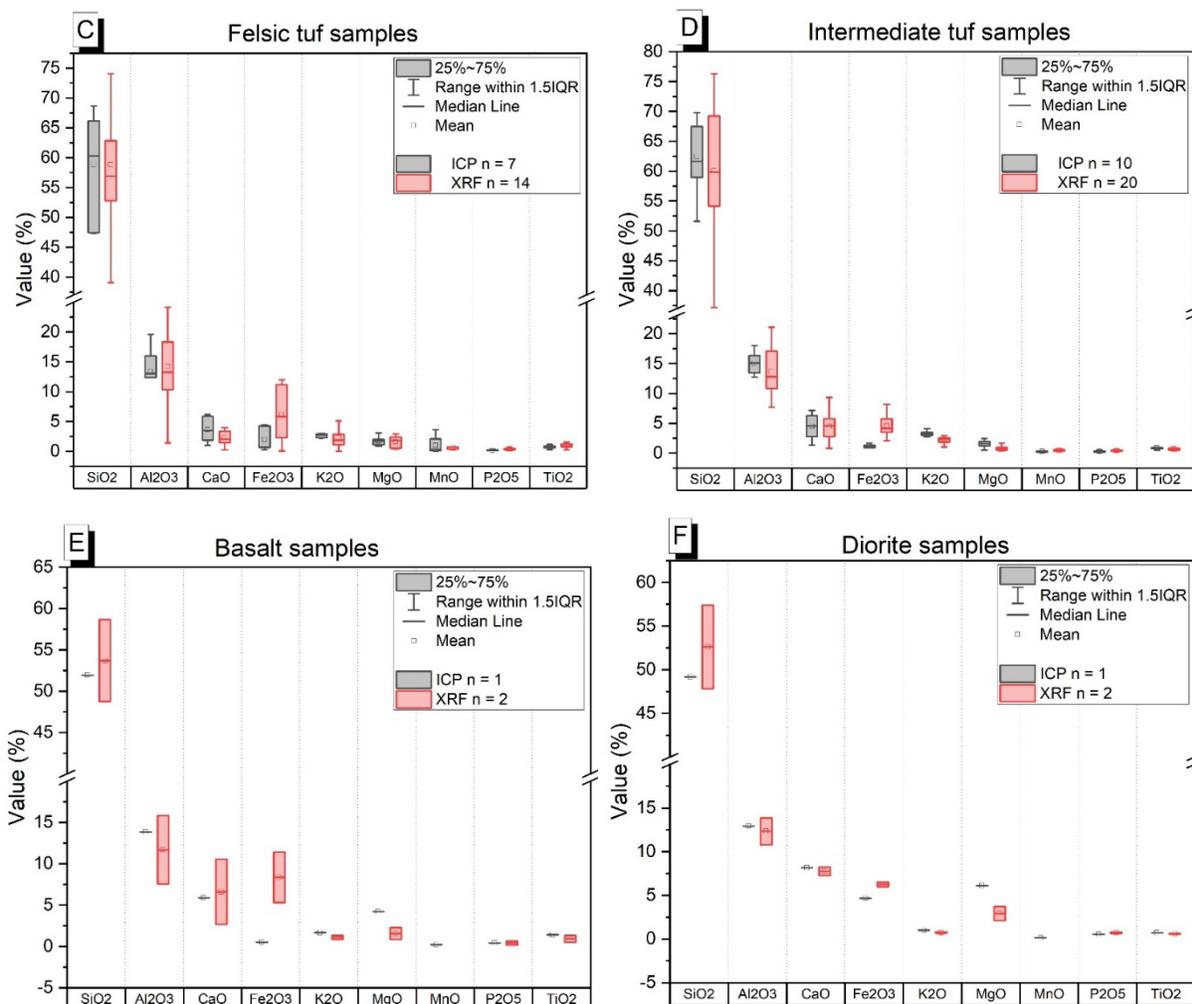
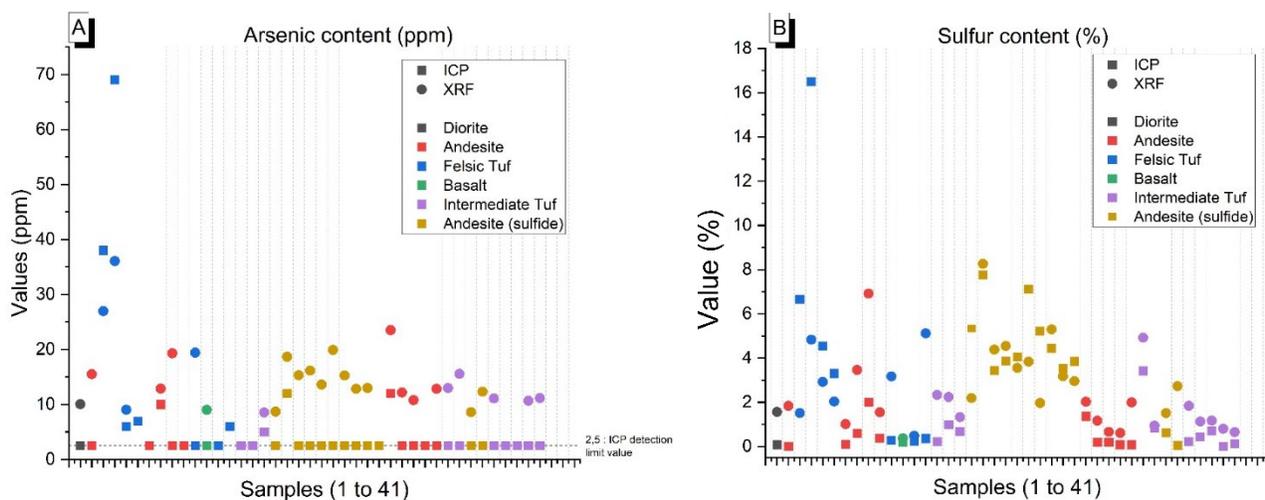


Figure 4-2 : Comparison of oxide concentrations between ICP and XRF measurements of different lithologies for Site A

4.6.1.2 Site A elemental comparison

A similar interpretation was made with elements such as As, Zn, Ni, and S (Figure 4-2). Arsenic (Figure 4-2 A) was well detected by XRF measurements but was also often overestimated. Indeed, ICP analyses revealed that the majority of samples contained As below the detection limit ($LOD > 2.5$ ppm). XRF measurements however showed that most of the samples contained low but measurable As concentrations (10-20 ppm). Two samples of felsic tuff contained more As than the others (25-70 ppm, measured with ICP), potentially because of the specific areas selected for XRF analyses. Figure 4-2 B shows the S content (%). The geological logging did not reveal S-bearing minerals other than

sulfides, therefore the XRF and ICP results allow to estimate the quantity of sulfides in the samples. There was a good correspondence between XRF and ICP results, meaning that XRF can detect S adequately when the acquisition parameters are adapted (e.g., helium vacuum, acquisition time). The observed differences (2-5%) were probably related to the surface location of the analyses. The same observations can be made for zinc (Figure 4-2 C). Two outliers were noticed with XRF (2307 and 276 ppm) but not with ICP, meaning that the XRF analysis spots were on a Zn-rich mineral. From the geological logging data, the most probable Zn bearing mineral in this sample is sphalerite. Figure 4-2-D presents Ni concentrations from XRF and ICP. ICP showed low concentrations (less than 20 ppm) while XRF detected Ni in only 6 samples, and the results contained higher than the ICP results (except for diorite).



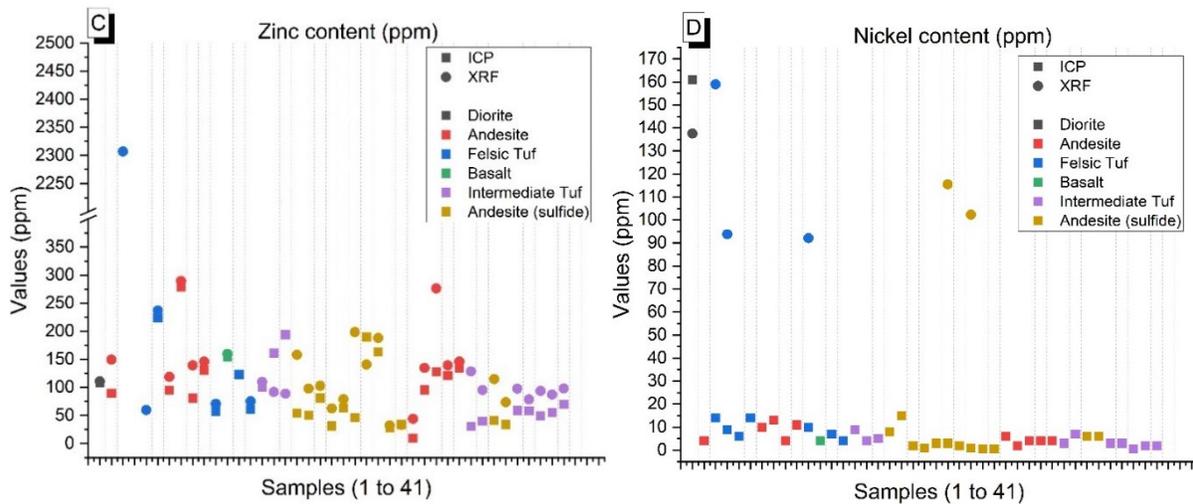


Figure 4-3 : Comparison of concentrations of selected elements between ICP and XRF measurements for Site A

NB: X-Axis presents samples ordered by depth

4.6.1.3 Mineralogy

Mineralogy is generally determined during the logging phase from the interpretation of a geologist based on visual and physical properties (shape, magnetism, hardness). The geologist can use several tools at a microscopic scale to enhance the description of mineralogy, such as high-quality imagery. Annexe 8-9 is a compilation from representative samples with specific features such as pyrite clusters, quartz carbonates veinlets and several fragments in the andesite and tufs lithologies. Imagery also allows identification of pervasive alteration such as ribbon chlorites, or micas alteration. Mineralogy is one of the first clues in the evaluation of acidification (sulfides) or neutralisation potential (carbonates) of samples.

Mineral spectrometer

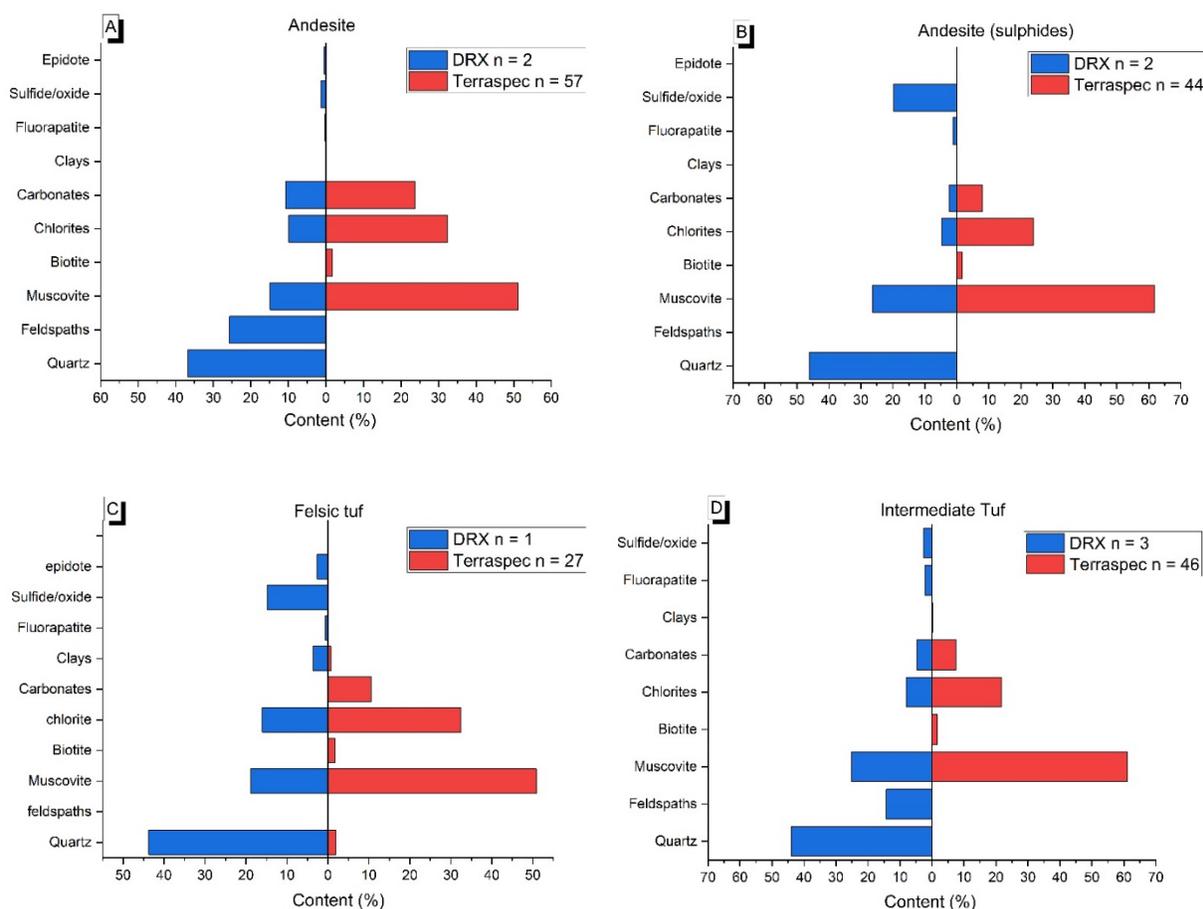
Tableau 4-4 compiles the mineral assemblages described by the geologist on rock samples for site A. Minerals were grouped into 3 categories: i) sulfides, including pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, sphalerite, and galena; ii) veins minerals, including quartz, carbonates, micas etc.; iii) alteration minerals, mainly carbonates, sericite, chlorite, biotite, silica and potassium bearing minerals.

Tableau 4-4: Minerals identified during the logging process classified by lithologies

Lithology	Sulfide	Gangue minerals	Alteration
Diorite	Pyrite	Carbonate; sericite	Chlorite; carbonates
Felsic tuf	Pyrite; galena; sphalerite	Quartz; sericite; chlorite; muscovite; tremolite	Chlorite; silica; potassium
Andesite	Pyrite; pyrrhotite; chalcopyrite	Sericite; chlorite; carbonates; quartz; biotite; magnesite; tremolite	Chlorite; silica; potassium; carbonates
Intermediate tuf	Pyrite; sphalerite; pyrrhotite; chalcopyrite	Quartz; carbonates; chlorite; biotite; plagioclases; sericite; magnetite	Chlorite; silica; potassium; carbonates; biotite
Basalt	Pyrite; sphalerite	Chlorite; carbonates	Carbonates; chlorite; potassium; silica
Andesite (Sulfide)	Pyrite; pyrrhotite; chalcopyrite; sphalerite	Carbonates; sericite; quartz; visible gold	Chlorite; potassium; carbonates; silica

Annexe 8-10 summarizes each mineral mentioned by the mineral spectrometer analyses (≈ 150) for site A with two categories of information: raw data and data treated by artificial intelligence with the AiSIRIS software. This interpretation confirmed the alteration minerals with greater precision. In this case, 7 different phases were found: white micas, biotite, chlorite, carbonate, gypsum, kaolinite, and water silica. The mention of VNIR-no match and SWIR-no match are related to the absence of mineral response in the proper wavelength, it can be associated generally to sulfides which do not give any signal in these wavelengths. As mentioned previously, groups were made to allow a comparison between XRD and mineral spectrometer (Tableau 4-3). XRD mineralogy showed more specific minerals, such as quartz,

feldspaths and sulfides, which were not, or poorly, detected by the spectrometer, even though combined they account for 40 to 60% of the sample (Figure 4-3 A-F). The spectrometer showed many chlorites (Fe-Chlorite and FeMg-Chlorite) and two muscovites (muscovite and phengite). Both XRD and spectrometry techniques detected carbonates, but the mineral with spectrometer tended to overestimate their concentration, probably because of the volumetric analysis (data summed to 100%, even if there were missing minerals). Biotite and clays concentrations were low with both methods; however, they were not detected simultaneously with XRD and the spectrometer. The mineral spectrometer can measure high water content with the SWIR results. If no other features are detected, water is often associated to "wet silica" and is therefore interpreted as quartz or silica alteration



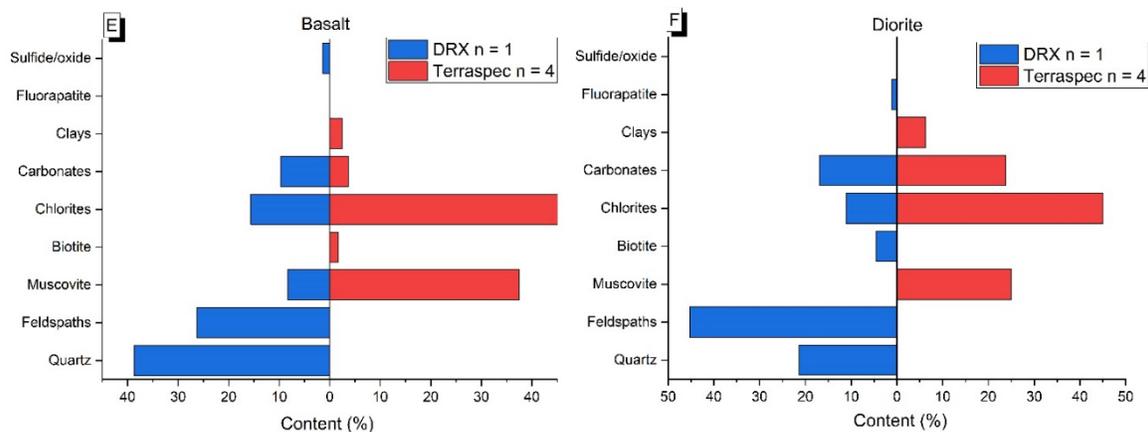


Figure 4-4 : Pyramidal plot for mineral content comparison for site A

4.6.1.4 Carbonate staining

Figure 4-4 presents a sample from each lithology, before and after staining. The felsic tuf (LR-03) was stained in blue/turquoise meaning that the carbonates are mainly ferroan dolomite. The intermediate tuf (LR-40) showed similar albeit lighter results; the matrix contains also ferroan dolomite. Andesite (LR-08) samples were slightly stained in turquoise and rose orange, revealing the presence of ferroan dolomite and ferroan calcite. Andesite (sulfide) (LR-23) sample contains more ferroan dolomite than the regular andesite. Moreover, a quartz vein was visible around the analysis spot #3 with a grey color. The staining for the diorite sample (LR-01) displayed a deep grey with some diffuse blue and red, indicating the presence of ferroan calcite and ferroan dolomite in low concentrations. Finally, the basalt sample (LR-12) was partially stained in blue within a banded section, which indicates ferroan calcite and ferroan dolomite.

Overall, the major carbonates minerals detected in the samples are ferroan calcite and ferroan dolomite, consistent with XRD results in which calcite and dolomite were identified as the main carbonates.

4.6.1.5 Site A conclusion

The work realised for site A revealed that the early predictive tools give reliable data when compared to data obtained with typical testing methods (ICP, logging, imagery). XRF can provide useful data for early decision making of an exploration project. Indeed, it gives rapid chemical information, allowing to a reduction in the number of samples to integrate in a GMT approach. The spectrometer can identify alteration minerals and give a relative mineral composition. Even if the spectrometer is less precise than XRD, the

time required for results acquisition and the cost per analysis are lower, providing preliminary results for the GMT approach. The objective of carbonate staining was to identify the carbonate minerals present that could be involved in AMD neutralisation. Indeed, the reactive agent successfully stained carbonates revealing ferroan calcite and ferroan dolomite. It also highlighted quartzic zones thanks to the etching with hydrochloric acid. For a more detailed interpretation, the stained cores can be analysed with a binocular microscope and image analysis to obtain semi-quantitative carbonate contents.

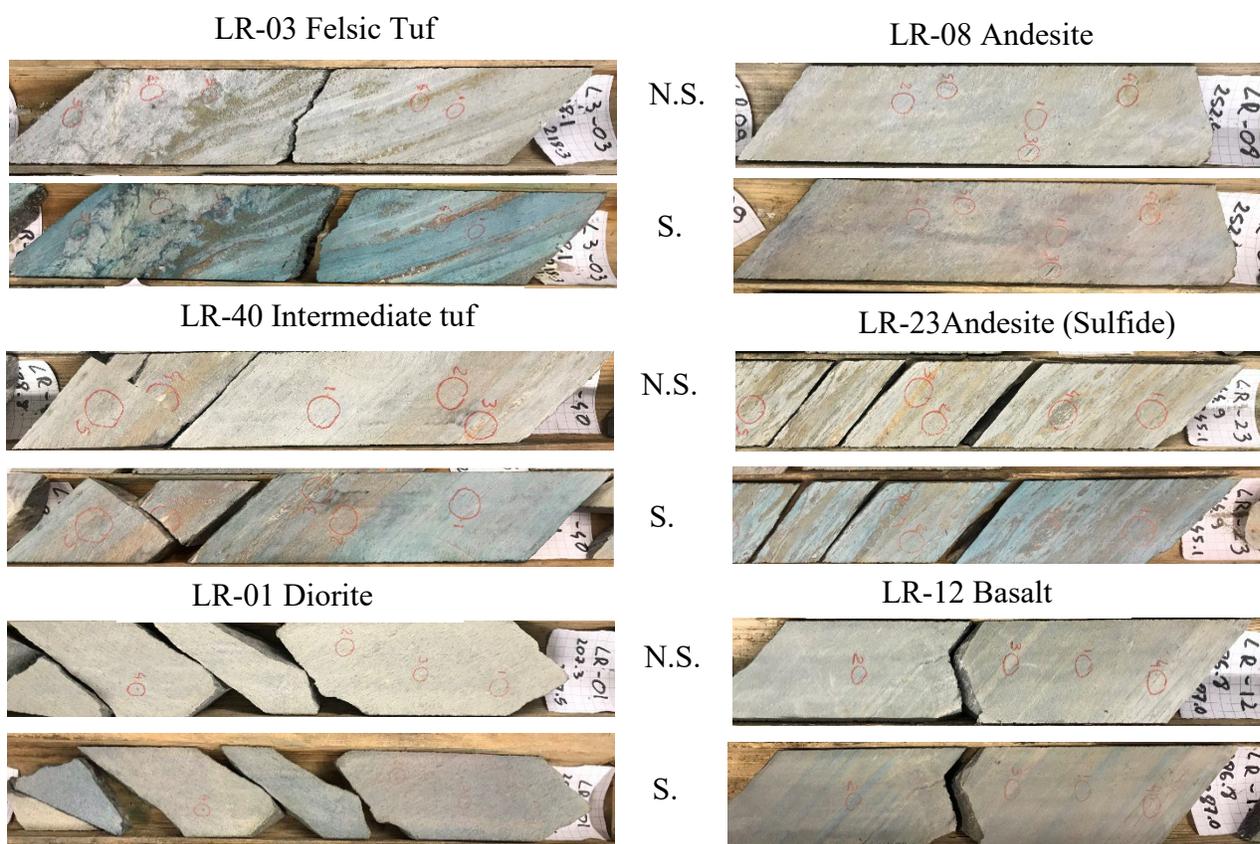


Figure 4-5: Site A carbonates identification through staining

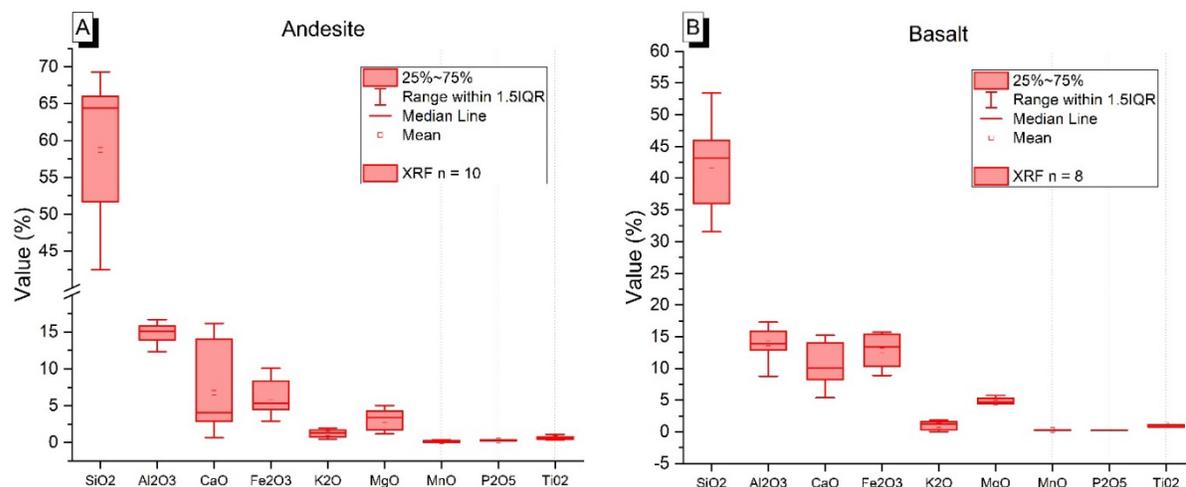
N.S.: not stained; S: stained

4.6.2 Site B

Site B is used as an application of the rapid, non destructive analysis methodology tested on site A, to carry out a preliminary assessment of the environmental risk. Four main lithologies were identified within the Piché Group: andesite, basalt, greywacke, and a conglomerate.

4.6.2.1 Site B oxide measurement

Andesite (Figure 4-5 A) composition was evaluated at 57% SiO₂, between 5 and 15% CaO and 7% Fe₂O₃ from 10 XRF analyses. The calcium and iron contents indicated carbonate and sulfide minerals. Carbonates may be dolomite as there was also a low MgO content (less than 5%). Basalt (Figure 4-5 B), showed a SiO₂ content lower than andesite, however, CaO and Fe₂O₃ were slightly higher, an average of 10% and 12.5% respectively from 8 XRF analyses. Generally, the MgO content in basaltic units were higher than in other lithologies. Greywacke (Figure 4-5 C) shoed 57% SiO₂ and showed a low CaO content (less than 3%). The Fe₂O₃ content was also lower suggesting that sulfides might be less abundant in this lithology. Conglomerate (Figure 4-5 D), showed variations between 65% and 83 % SiO₂, and an average of 5% CaO reflecting possibly some carbonate presence, and a low Fe₂O₃ content (less than 5%). The other oxides had similar results for most lithologies.



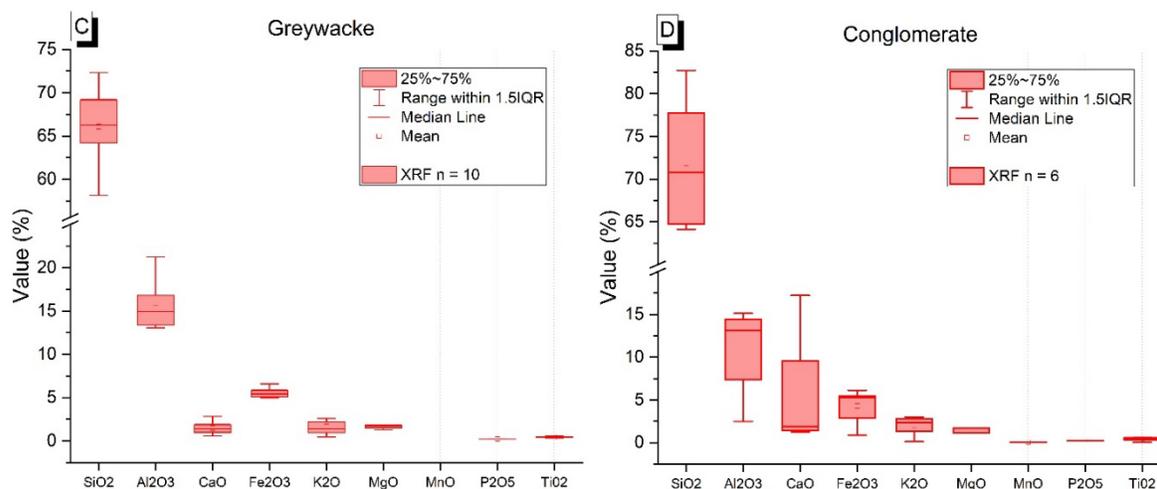


Figure 4-6 :Site B XRF oxide measurements

4.6.2.2 Site B elemental composition

Site B's elemental characterisation is shown in Figure 4-6 where each square/dot is a mean calculated from 2 to 4 XRF analyses. The As content Figure 4-6 A showed high concentrations in the basalt (from 750 to 1250 ppm, and a maximum of 4000 ppm) and in two samples from the andesite (1250 ppm and 7700 ppm). Conglomerate and greywacke had low As values (< 250 ppm) for the greywacke. A high S content (Figure 4-6 B), was observed in the basalt (0.6-2%), which can be associated with As, suggesting the presence of arsenopyrite or arsenian pyrite. The greywacke's S content was relatively low (less than 0.5%). Andesite had a slightly higher S content than greywacke (0.25-0.75%), yet one andesite sample recorded 2.25% S, probably an analysis made in the vicinity of a sulfide grain. The Zn content (Figure 4-6 C) for each sample was between 50 and 150 ppm. Pb and Ni (Figure 4-6 D) were not often detected by XRF, only for 2 samples for Pb and 6 for Ni. Lead measurements are low (less than 20 ppm), whereas nickel in conglomerate and andesite ranged between 70 and 120 ppm.

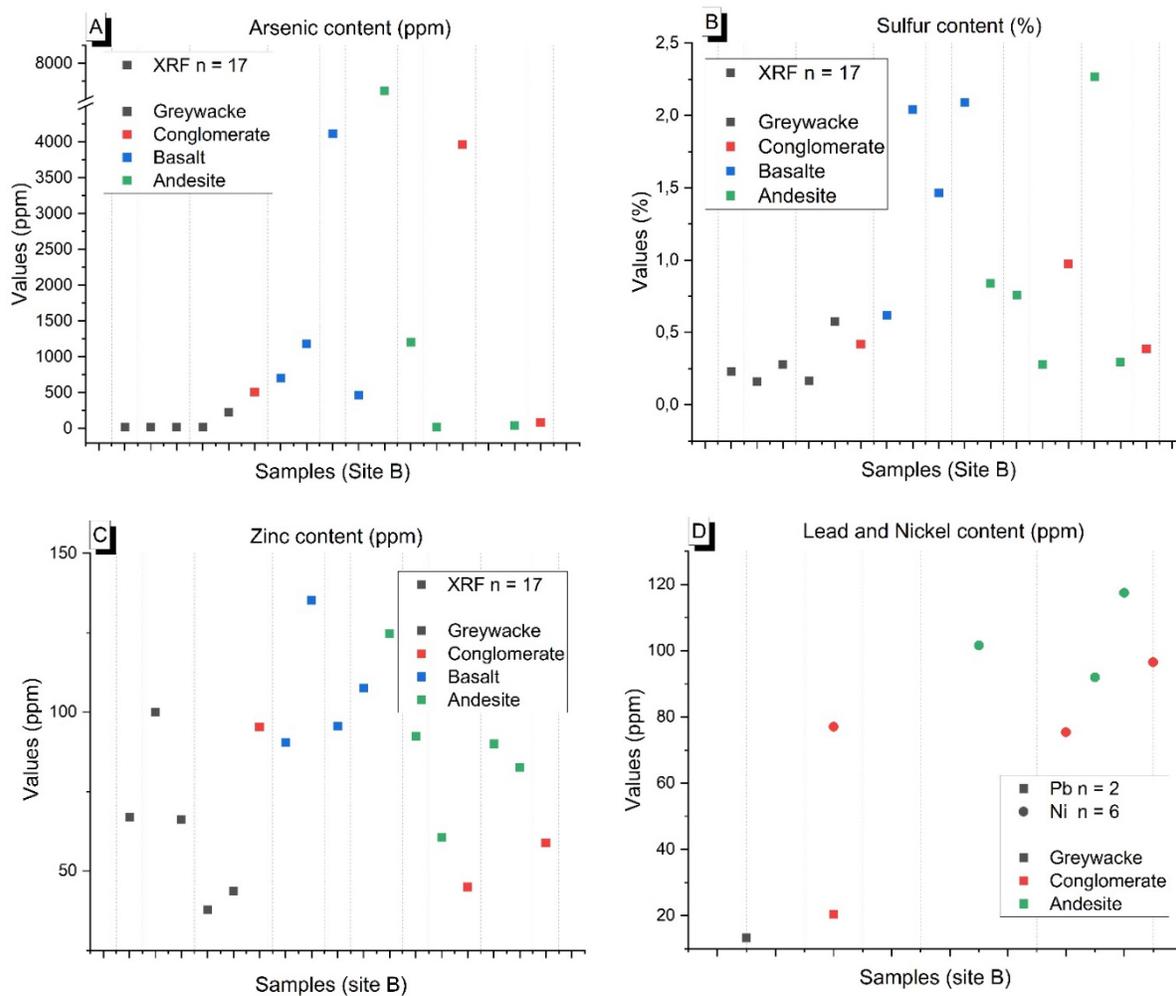


Figure 4-7 : Site B XRF elemental measurements

4.6.2.3 Site B mineralogy

A short description was given by the geological team for each sample which included the depth, the textural and structural (veins) information and the alteration of the main mineralisation. In addition, macroscopic imagery (Annexe 8-11) was done with the same parameters as for site A. The main features visible with these images corresponded to the alteration type (chlorite, biotite, silica), the sulfides and carbonate mineralogy, and structures such as quartz carbonates veins.

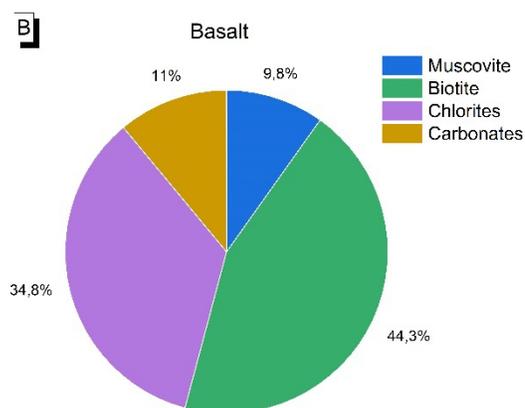
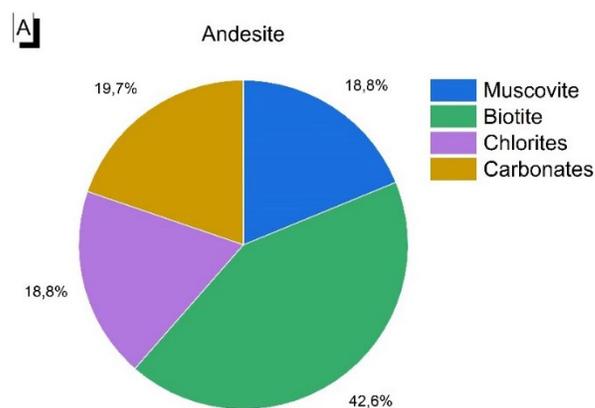
Mineral spectrometer and logging mineralogy

Tableau 4-5 presents the information given by the geological team along with the spectrometer results. The main sulfides were pyrite, arsenopyrite, and some traces of pyrrhotite. The other minerals of interest were mainly carbonates and quartz (often in veins) for all lithologies, and chlorite, biotite, and clay for greywacke. All lithologies presented alteration, often pervasive for the chloritic, sericitic and silicate ones; biotitic alteration was often observed within the samples. Spectrometer analyses after treatment with AiSIRIS identified minerals that can be different from logging data, but the mineral groups were generally represented; micas (phengite, muscovite, biotite, lepidolite, phlogopite), clays (kaolinite, illite), carbonates (calcite, dolomite), chlorites (clinozoisite, (FeMg)chlorite).

Figure 4-7 gives a global relative estimation of minerals identified with the spectrometer. The percentage does not reflect the true mineral concentrations, but the relative proportion of each mineral categories. The spectrometer analyses on andesite (Figure 4-7 A) showed a high content of biotite. The carbonate content was estimated at 20% of the overall minerals detected with the spectrometer. Basalt (Figure 4-7 B) was composed of 38% wet-silica, considered as quartz. The relatively high quartz content came from a nugget effect caused by two analysed points with a very high content (> 90%) in wet silica. Greywacke mineralogy (Figure 4-7 C) was mainly estimated as chlorite (38.4%) and muscovite (27.7%) with a low content of carbonates. In the conglomerate samples (Figure 4-7 D), muscovite was mostly identified with biotite, chlorite and carbonates were detected at a lower percentage.

Tableau 4-5 : Minerals identified by visual identification and by spectrometer after treatment classified by lithology.

Lithology	Sulfides	Other minerals	Alteration	AiSIRIS (after treatment)
Andesite	Arsenopyrite; pyrite; pyrrhotite	Carbonate; quartz; visible gold; chlorite	Carbonate; biotite; sericite;	Chlorite; tourmaline; carbonate; biotite; white micas
Basalt	Pyrite; arsenopyrite; pyrrhotite	Carbonates; quartz	Biotite; sericite carbonate	Chlorite; biotite; water silica; tourmaline; amphibole; kaolinite
Greywacke	Pyrite;	Quartz; carbonates; biotite; chlorite; argilite	Biotite; chlorite	White micas; chlorite ; carbonate; biotite
Conglomerate	Pyrite; arsenopyrite	Carbonate; quartz	Biotite; sericite	Carbonate, chlorite; white micas; tourmaline; biotite



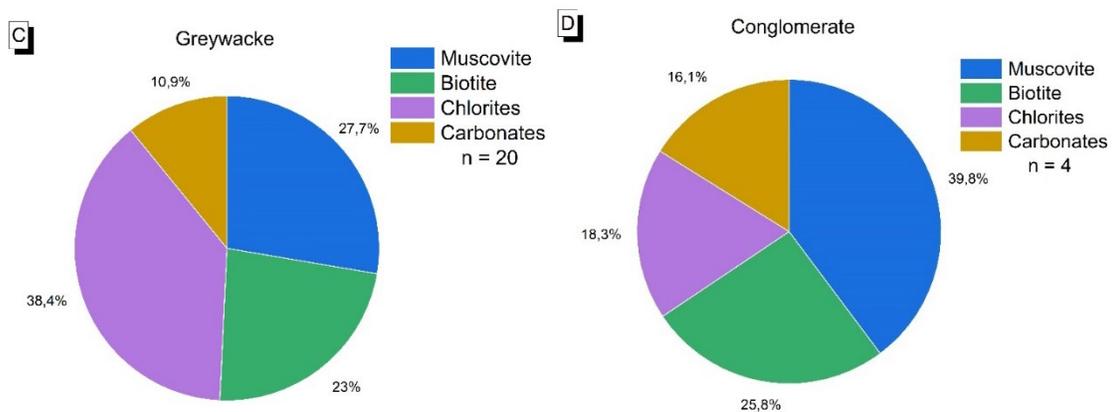


Figure 4-8 : Site B spectrometer mineral estimations

4.6.2.4 Site B carbonates staining

An example of each lithology is shown before and after staining in Figure 4-8.. The chosen samples are representative of each lithology. Conglomerate (OB-95-49-01) had a diffuse blue stain linked with the rock texture indicating the presence of ferroan dolomite. Andesite (RM-11-03-01) was not stained except a slight shade or pink mauve referring to punctual calcite and ferroan calcite grains. Greywacke (OB-17-26-01) was fully stained in blue revealing the presence of ferroan dolomite. The presence of a quartz vein with fractures stained in mauve purple (ferroan calcite) and black (probably dirt or unknown mineral) is also present the basalt sample (RM-11-15-01) was slightly stained in rose mauve indicating a low ferroan calcite content. According to the spectrometer analyses, basalt and greywacke samples recorded less carbonates, however staining revealed more carbonates than expected. It is possible that the type of carbonate shown with the staining was not well detected by the spectrometer.

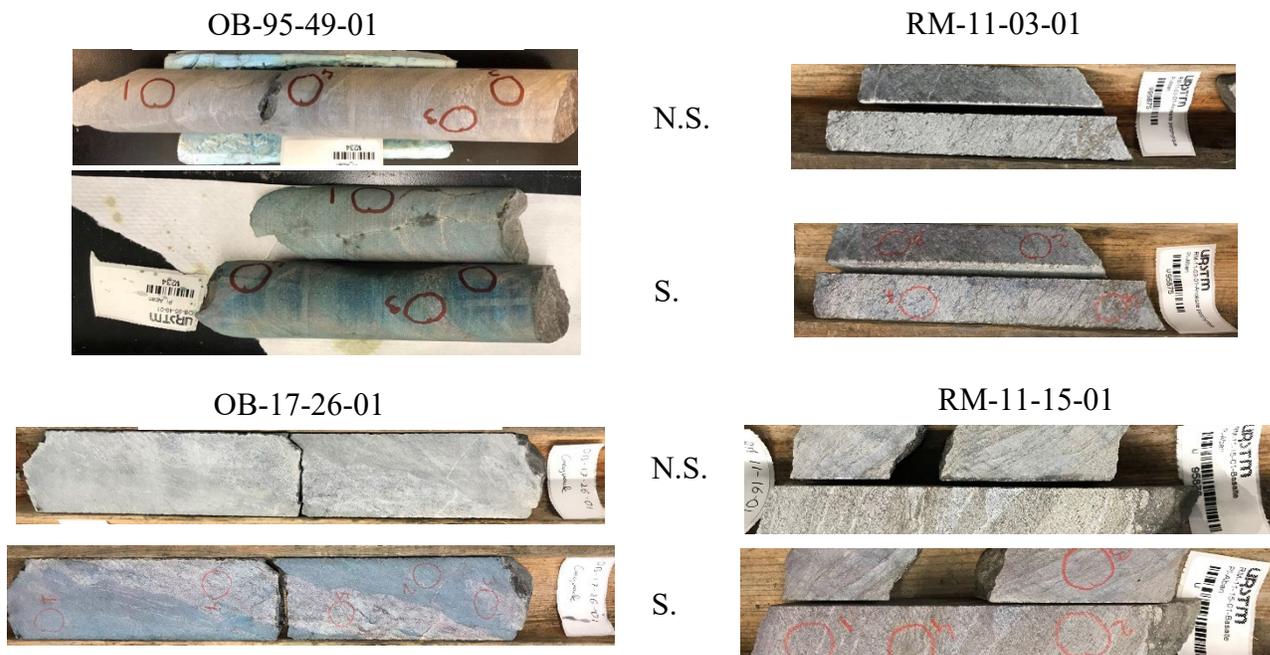


Figure 4-9: Site B carbonates identification through staining (N.S.: not stained; S: stained)

4.6.2.1 Site B conclusion

After site A showed the effectiveness of the chosen characterisation tools, site B samples were used to apply the methodology and try to identify potential environmental risks. Andesite is rich in Fe_2O_3 (5-10%) with 0.25 to 0.75% S and some As observed by XRF, suggesting that the main sulfides are pyrite and arsenopyrite. In terms of alteration minerals, andesite contains significant micas, chlorite and carbonates. The carbonates were identified as Fe-calcite and calcite with the staining. Basalt is the lithology with the highest content in Fe_2O_3 (10-15%), in S (1 to 2 %), As (500-1250 ppm) and Zn (90-130 ppm). The basalt lithology is rich in several metals (As, Fe, Zn), therefore the risk of metal leaching should be considered. The spectrometer detected wet silica, which can be interpreted as silicification, and a low amount of carbonates, which were confirmed with staining. The greywacke contains a low quantity of CaO and Fe_2O_3 (less than 5%), whereas the As and S contents are low. The chlorite alteration was the major feature detected with the

spectrometer along with micas and carbonates. Staining revealed a large diffusion of carbonate (Fe-dolomite) within the matrix. Finally, the conglomerate lithology is composed of 3 to 10 % CaO and less than 5% Fe₂O₃. Conglomerate samples recorded low amounts of As, S, Ni, and Zn. The carbonates were detected with the spectrometer and with the staining (diffused Fe-dolomite within the matrix). Therefore the main lithologies where environmental risks are suspected are basalt and andesite with CMD suspicion linked to the As concentrations.

4.7. Discussion

Site B's environmental challenges can be assessed in a preliminary manner with the data obtained from the analyses performed in this study and the logging information. The sulfur content (S) can be linked to the metals detected by XRF (Fe, As, Pb, Zn) as sulfides (e.g., pyrite, arsenopyrite, pyrrhotite, galena and sphalerite). These metal concentrations were recorded for each lithology, and the volcanic lithologies (andesite and basalt) have a high content in As, Zn and Pb, and should be monitored for potential environmental issues. The biotite alteration detected by spectrometry was often related to sulfide and gold mineralisation. This could be an indicator for potential CMD. Even if the conglomerate and the greywacke contained less sulfides, several XRF analyses registered high concentrations in As and Zn. Carbonates evaluated in all four lithologies were mainly calcite and dolomite. which have a significant neutralizing potential. However the staining also detected that iron is associated with the carbonates, indicating a possible decrease of the neutralising potential because of the presence of Fe in their crystal structure (Kwong, 1993). According to geological logging and staining, carbonates were mainly found in veinlets and in massive pervasive alteration. These preliminary conclusions led to an environmental risk classification for each lithology based mainly on sulfides and carbonates potential occurrences. The basalt would have the highest potential for CMD generation, followed by the andesite, and finally the conglomerate and greywacke with a low-risk potential. This approach is a preliminary predictive

assessment and needs to be cautiously applied. The aim was to test a rapid non-destructive methodology for geoenvironmental evaluation. The different types of data acquired can give valuable information for mineralogical, geochemical, geotechnical and environmental characterization. The combination of geochemical and mineralogical characterization is important to properly evaluate the various mineralisation types. Imagery helps geological logging revealing textures, mineral associations, and structures.

This study is an early work potentially leading to geoenvironmental modelling into early exploration phases (before prefeasibility studies) where presently the focus is on the minerals of interest. Environmental data acquisition can save time and money for the future of a mine project. More specifically, this methodology could become a guideline for environmental sampling for further analyses for the CMD risk. The More available information on the potential value and environmental risks associated a mining project enables better decision-making for investors at an earlier stage of project. Decisions to move further ahead with exploration and development work are based in part on the potential environmental risks. Such an environmental evaluation can be developed in different ways, with different tools depending on the needs for each specific project. The tools selected in this project provided a geochemical and mineralogical overview; XRF identified specific elements, the mineral spectrometer detected alteration minerals, and the carbonate staining discriminated the carbonates.

Today, new approaches using automated spectral technologies such as visible/near infrared imagery and automated hyperspectral imagery (Bolin & Moon, 2003; Harraden et al., 2016) are available to help the data collection and speed up the data acquisition process. Certainly, these tools will gain acceptance at the exploration and development stage of further mining projects for both orebody definition and preliminary environmental assessment.

4.8. Conclusion

This study focused on the development of a methodology for preliminary environmental assessment applicable at an advanced exploration stage. The aim was to detect lithological domains with a contaminated mine drainage risk at an early phase of the mine cycle with rapid and nondestructive analytical tools. The proposed methodology used general tools already known in the exploration industry for geological and mineralogical analyses: XRF, mineral spectrometer, high-definition imagery, and carbonate staining. All these tests were applied on half drill cores obtained from two gold mine sites in Abitibi-Temiscamingue region, Québec, Canada. The first site (site A) confirmed a correlation between the results obtained with regular laboratory analyses (ICP, XRD, geological logging) those from with the proposed methods. The second site (site B) presented a direct application of the preliminary environmental assessment using the developed methodology. It led to an environmental risk classification, where basalt was identified as a potentially problematic lithology, followed by andesite, whereas conglomerate and greywacke were recognized as a low CMD risk. In further development stages, more specific experiments will need to be performed to properly assess the environmental risk.

Future work is recommended for on detailed interpretation of the data acquired during the proposed methodology

- Comparison of the data available from the drill hole with the rocks in place, such as: structural data, specific features, geotechnical information, or water sampling in drill hole for the geochemical background.
- On site data acquisition with the geological team on an exploration campaign followed by a GMT approach to ultimately establish a geoenvironmental model of the deposit.
- Application of this methodology to different geological environment to determine which tools are better adapted to different rock types.

4.9. Acknowledgements

This study was funded by FRQNT (Fonds de Recherche du Québec – Nature et Technologies; Québec’s Research Funds - Nature and Technology) team research grant obtained by Professor Cheng. The authors thank the staff of Agnico Eagle Mines Ltd and Radisson Mining Resources for their contributions, and the Unité de Recherche et Service en Technologie Minérale (URSTM) staff for their assistance in the laboratory.

4.10. References

- AMQ. (2020). *Industrie Minière*. Association minière du Québec. <https://www.amq-inc.com/lindustrie-miniere/industrie-miniere>
- Blowes, D. W., Ptacek, C. J., Jambor, J. L., Weisener, C. G., Paktunc, D., Gould, W. D., & Johnson, D. B. (2014). The Geochemistry of Acid Mine Drainage. In *Treatise on Geochemistry* (p. 131-190). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00905-0>
- Boily-Auclair, É., Mercier-Langevin, P., Ross, P.-S., & Pitre, D. (2020). *Stratigraphic setting of the LZ5 and Ellison mineralized zones, LaRonde Zone 5 project, Doyon-Bousquet-LaRonde mining camp, Abitibi, Quebec* (N° 8712; p. 8712). <https://doi.org/10.4095/323665>
- Bolin, B. J., & Moon, T. S. (2003). Sulfide detection in drill core from the Stillwater Complex using visible/near-infrared imaging spectroscopy. *GEOPHYSICS*, 68(5), 1561-1568. <https://doi.org/10.1190/1.1620630>
- Bussière, B., & Guittonny, M. (2021). *Hard Rock Mine Reclamation : From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. CRC Press.
- Chopard, A., Marion, P., Royer, J.-J., Taza, R., Bouzahzah, H., & Benzaazoua, M. (2019). Automated sulfides quantification by multispectral optical microscopy. *Minerals Engineering*, 131, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.005>
- Dold, B. (2008). Sustainability in metal mining : From exploration, over processing to mine waste management. *Reviews in Environmental Science and bio/technology*, 7(4), 275.
- Dold, B. (2017). Acid rock drainage prediction : A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, 172, 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.014>
- Egaña, Á. F., Santibáñez-Leal, F. A., Vidal, C., Díaz, G., Liberman, S., & Ehrenfeld, A. (2020). A Robust Stochastic Approach to Mineral Hyperspectral Analysis for Geometallurgy. *Minerals*, 10(12), 1139. <https://doi.org/10.3390/min10121139>

- Global Tailings review. (2020). *Global industry standard on tailings management*. The International Council on Mining and Metals, the United Nations Environment Programme, and the Principles for Responsible Investment. <https://globaltailingsreview.org/>
- IMDEX. (2019). *AiSIRIS results information sheet*.
- Jambor, J. L., Dutrizac, J. E., & Raudsepp, M. (2007). Measured and computed neutralization potentials from static tests of diverse rock types. *Environmental Geology*, 52(6), 1019-1031. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0542-4>
- Kenneth Williamson (3DGeo-solution). (2019). *NI 43-101 Technical Report and Mineral Resource Estimate for the O'Brien Project, Abitibi, Québec* (p. 136) [Norme NI 43-101].
- Kwong, Y.-T. J. (1993). *Prediction and prevention of acid rock drainage from a geological and mineralogical perspective*. MEND.
- Lawrence, R. W., & Marchant, P. M. (1991). *Acid rock drainage prediction manual. MEND/NEDEM Report, 1*.
- Lawrence, R. W., & Scheske, M. (1997). A method to calculate the neutralization potential of mining wastes. *Environmental Geology*, 32(2), 100-106. <https://doi.org/10.1007/s002540050198>
- Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement—Loi sur la qualité de l'environnement., RLRQ c Q-2 (2006). <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/Q-2/>
- Lindsay, M. B. J., Moncur, M. C., Bain, J. G., Jambor, J. L., Ptacek, C. J., & Blowes, D. W. (2015). Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings. *Applied Geochemistry*, 57, 157-177. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.01.009>
- Lishchuk, V., Koch, P.-H., Ghorbani, Y., & Butcher, A. R. (2020). Towards integrated geometallurgical approach : Critical review of current practices and future trends. *Minerals Engineering*, 145, 106072. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106072>
- Lottermoser, B. (2017). Predictive Environmental Indicators in Metal Mining. In B. Lottermoser (Éd.), *Environmental Indicators in Metal Mining* (p. 3-12). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42731-7_1
- Lottermoser, B. G. (Éd.). (2017). *Environmental indicators in metal mining*. Springer.
- MEND. (2004). *Review of Water Quality Issues in Neutral pH Drainage : Examples and Emerging Priorities for the Mining Industry in Canada*. MEND Smithers, BC, Canada.
- Michaux, S., & O'Connor, L. (2020). *How to set up and Develop a Geometallurgical Program*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16170.24005>
- Miller, S., Robertson, A., & Donahue, T. (1997). *Advances in acid drainage prediction using the net acid generating (NAG) test*.

- Owen, J. R., & Kemp, D. (2013). Social licence and mining : A critical perspective. *Resources Policy*, 38(1), 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.06.016>
- Parbhakar-Fox. (2012). *Establishing the value of an integrated geochemistry—Mineralogy—Texture approach for acid rock drainage prediction*.
- Parbhakar-Fox, A., Fox, N., Moltzen, J., & Lottermoser, B. (2017). Chemical Staining Techniques for Drill Core Characterization. In B. Lottermoser (Éd.), *Environmental Indicators in Metal Mining* (p. 97-114). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42731-7_6
- Parbhakar-Fox, Edraki, Walters, S., & Bradshaw. (2011). Development of a textural index for the prediction of acid rock drainage. *Minerals Engineering*, 24(12), 1277-1287. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.04.019>
- Parbhakar-Fox, Lottermoser, B., & Bradshaw. (2013). *Cost-Effective Means for Identifying Acid Rock Drainage Risks – Integration of the Geochemistry-Mineralogy-Texture Approach and Geometallurgical Techniques*.
- Plante, B., Benzaazoua, M., & Bussière, B. (2011). Predicting Geochemical Behaviour of Waste Rock with Low Acid Generating Potential Using Laboratory Kinetic Tests. *Mine Water and the Environment*, 30(1), 2-21. <https://doi.org/10.1007/s10230-010-0127-z>
- Plante, B., Bussière, B., & Benzaazoua, M. (2012). Static tests response on 5 Canadian hard rock mine tailings with low net acid-generating potentials. *Journal of Geochemical Exploration*, 114, 57-69. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.12.003>
- Plumlee, G. S., & Nash, J. T. (1995). Geoenvironmental models of mineral deposits—fundamentals and applications. *US Geological survey Open-file report*, 95-831.
- Price, W. A., & Kwong, Y. T. J. (1997). Waste rock weathering, sampling and analysis : Observations from the British Columbia Ministry of Employment and Investment database. *Proceedings of 4th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Vancouver*, 31-45.
- Steffen, Robertson, & Kristen. (1989). *Draft acid rock drainage technical guide*.
- Vermette, D. (2018). *Approche de caractérisation géoenvironnementale axée sur l'utilisation des concepts géométallurgiques* [Mémoire de maîtrise]. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

CHAPITRE 5: DISCUSSION

Lors du développement d'un projet minier, l'emphase est mise en premier sur le potentiel minéral du gisement puis lors d'études plus approfondis le volet environnemental intervient afin d'évaluer les risques de drainage minier contaminés associés à l'exploitation du minerai. Obtenir cette information a généralement un coût non négligeable, il est donc important de développer et améliorer les outils disponibles pour réduire le risque environnemental. C'est dans cet aspect que ce projet a été mené en proposant une méthodologie d'identification des risques environnementaux lors des étapes préliminaires d'un projet minier en utilisant des outils d'analyses rapides et non destructifs. Les travaux réalisés lors de ce projet ont porté sur la géochimie des lithologies (oxydes et éléments d'intérêts principaux) et sur la minéralogie d'intérêt (carbonates et autres minéraux d'altération). Également, les outils étudiés permettent de générer d'autres données afin de compléter l'évaluation environnementale. De plus les données géochimiques obtenues par fluorescence X pourraient être utilisés dans des calculs normatifs (ex : norme CIPW) permettant de connaître la composition théorique de la roche. L'utilisation de la spectrométrie minérale avec des outils comme le Terraspec® permettent d'avoir des données quantitatives des minéraux détectables dans le champ du visible et du proche infrarouge ainsi que des données complémentaires spécifiques aux spectres des minéraux mesurés. La coloration, en plus d'être un outil discriminant pour les carbonates, permet d'évaluer leur quantité en fonction de l'emprise surfacique de la coloration. Enfin le dernier outil, utilisé mais peu développé dans ce projet, le microscope binoculaire, permet d'obtenir des images de précision permettant de souligner les zones d'intérêt des échantillons. De plus, cet outil peut être utilisé de manière automatique en créant des mosaïques d'image afin de représenter l'échantillon dans sa globalité et ainsi aider le géologue dans son processus de description. Dans le cadre de cette maîtrise il n'a pas été possible d'aborder tous les

aspects présentés précédemment et des choix ont dû être faits afin de pouvoir monter une méthodologie efficace dans le temps imparti du projet. Chaque outil a alors été traité selon son application principale et d'autres pistes de recherches ont été développées pour améliorer le projet par la suite et pour optimiser la collecte de données et leur traitement.

CHAPITRE 6: CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Avec les enjeux socio-économiques évoluant depuis les dernières décennies, l'évaluation environnementale d'un projet minier est cruciale. De ce fait, de plus en plus d'outils sont développés afin d'aider la prise de décision pour la continuité du projet et de son financement. La modélisation géoenvironnementale fait partie de ces outils émergents. Ces modèles se basent sur les conditions initiales d'un projet minier, les données préliminaires obtenues lors de l'exploration, la planification d'exploitation, ainsi que le développement du type de restauration le plus efficace (Plumlee, G S, 1999). Dans le cadre de cette maîtrise, l'identification préliminaire des risques environnementaux lors de l'étape de l'exploration minière a été développée. Après une recherche des outils existants ayant un potentiel de caractérisation environnemental, plusieurs ont été sélectionnés. Dans un premier temps, la fluorescence X (portative) permet d'obtenir une information géochimique semi-quantitative. Elle permet, en plus d'obtenir de l'information sur des éléments d'intérêts (Ag, Au, Cu...), ainsi que connaître les concentrations d'éléments potentiellement délétères (As, Pb, Hg...). En convertissant les résultats en pourcentage d'oxydes, une appréciation globale de la géochimie de la roche est possible. En complément, des outils d'imagerie hyperspectrale peuvent être utilisés afin d'obtenir des données minéralogiques précises tels que le types de minéraux, les associations minéralogiques, les textures et les altérations principales. Dans ce projet, un spectromètre minéralogique (Terraspec Halo ASD) portatif a été utilisé pour des raisons d'accessibilité et de disponibilité. Lors de projets d'exploration, les scanners automatisés permettent d'analyser des boîtes de carottes entières, en plus de fournir d'autres types d'information comme le "rock quality designation" (RQD) ou la fracturation, par exemple. Afin de compléter l'évaluation minéralogique, des images des carottes de forage ont été prises avec un microscope binoculaire automatisé permettant de souligner les points d'analyses réalisés mais également les points

d'intérêts principaux (minéraux, textures, veines...). Cet outil permet aux géologues d'améliorer leur description minéralogique mais également d'assurer un meilleur suivi des données récoltées. Enfin le dernier outil sélectionné pour la méthodologie d'évaluation environnementale préliminaire est la coloration des carbonates. C'est une technique rapide de discrimination des différents carbonates qui fonctionne par une application d'une solution d'acide chlorhydrique combinée avec des réactifs visant la coloration de la surface de la carotte de forage en fonction des éléments présents dans les minéraux. Selon les agents réactifs utilisés, une dizaine de types de carbonates peuvent être identifiés, mais également une semi-quantification peut être réalisée en mesurant la surface teintée des échantillons.

La méthodologie établie a ainsi été appliquée sur les échantillons du premier site (A) à l'étude, LaRonde Zone 5 de la compagnie Agnico Eagle Mines Ltd, afin de juger de son efficacité en comparant les résultats obtenus et les résultats géochimiques et minéralogiques réalisés via des essais de laboratoire conventionnels (ICP et DRX notamment). Les résultats ont montré des similitudes entre les deux méthodologies malgré une plus grande amplitude dans les résultats géochimiques (élémentaires et oxydes) obtenus avec la FRX. Du côté de la minéralogie, l'analyse par spectrométrie a démontré spécifiquement les minéraux d'altération (micas, chlorites, carbonates, ainsi que certaines argiles), ces résultats sont en adéquation avec ce qui a été observé visuellement. En complément, une caractérisation des carbonates par coloration a mis en valeur les minéraux de calcite et de dolomite ferrique dans le contexte géologique étudié. La méthodologie d'analyse a ainsi pu être validée pour l'estimation du potentiel de risque environnemental. Ce dernier a été appliquée sur un second site (B), le projet O'Brien de la compagnie Ressources Minières Radisson, afin de dresser un portrait environnemental préliminaire du projet d'exploration. Ainsi, une classification environnementale des quatre lithologies étudiées a été réalisée, indiquant que les unités volcaniques de basaltes et andésites sont les plus susceptibles de générer du drainage minier contaminé et les unités

comme le greywacke et le conglomérat sont jugées comme moins susceptibles d'en générer.

Cependant, les outils étudiés n'ont pas été utilisés à leur plein potentiel et plusieurs axes d'optimisation sont suggérés :

- Fluorescence X
 - Augmenter le temps d'acquisition des analyses afin d'améliorer la qualité des résultats
 - Utiliser différents logiciels de traitement pour connaître la lithogéochimie et la minéralogie théorique des échantillons (ex : Lithomodelleur développé par le CONSOREM)
- Spectrométrie minérale
 - Pousser davantage l'analyse des données obtenues par le spectromètre ainsi que par le logiciel de traitement de données
 - Utiliser d'autres outils hyperspectraux opérant dans d'autres gammes de longueurs d'ondes pour quantifier la minéralogie (LIBS, PIMA...)
- Coloration des carbonates
 - Quantifier le type de carbonates en utilisant des outils d'analyse d'image
- Microscope binoculaire
 - Caractériser les éléments d'intérêts et automatiser la description des carottes de forage (Chopard et al., 2019; Maitre et al., 2019)
 - Réaliser des mosaïques d'images afin de stocker l'information
 - Aider à la caractérisation des carbonates

Dans une optique d'amélioration et d'optimisation globale du projet certaines recommandations peuvent être émises. Tout d'abord, le nombre d'échantillons total devrait être augmenté afin d'améliorer la caractérisation; la méthodologie devrait être appliquée à d'autres contextes géologiques afin de statuer sur la pertinence de la méthodologie au complet ou de certains des outils proposés. Dans cette optique, la

méthodologie pourrait évoluer avec l'ajout de nouveaux outils d'analyses comme des appareils de type Core scanner ou encore en intégrant des outils recueillant de l'information dans les trous de forages (fractures, eaux de forage...). Ces nouvelles données recueillies pourraient permettre la comparaison avec des essais environnementaux (tests statiques et cinétiques).

Enfin, il serait également intéressant de participer à l'élaboration d'un modèle géoenvironnemental en étant acteur du suivi du développement d'un projet minier.

RÉFÉRENCES

- Adams, C., Brand, C., Dentith, M., Fiorentini, M., Caruso, S., & Mehta, M. (2020). The use of pXRF for light element geochemical analysis: A review of hardware design limitations and an empirical investigation of air, vacuum, helium flush and detector window technologies. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 20(3), 366-380. <https://doi.org/10.1144/geochem2019-076>
- AMQ. (2020). *Industrie Minière*. Association minière du Québec. <https://www.amq-inc.com/lindustrie-miniére/industrie-miniére>
- Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., Chapuis, R., Julien, M., Belem, T., Simon, R., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., & Li, L. (2002). La gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement. *Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil*, 5-8.
- Blowes, D. W. (1997). *The Environmental Effects of Mine Wastes*. 887-892.
- Blowes, D. W., & Jambor, J. L. (1990). The pore-water geochemistry and the mineralogy of the vadose zone of sulfide tailings, Waite Amulet, Quebec, Canada. *Applied Geochemistry*, 5(3), 327-346. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(90\)90008-S](https://doi.org/10.1016/0883-2927(90)90008-S)
- Blowes, D. W., Ptacek, C. J., Jambor, J. L., Weisener, C. G., Paktunc, D., Gould, W. D., & Johnson, D. B. (2014). The Geochemistry of Acid Mine Drainage. In *Treatise on Geochemistry* (p. 131-190). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00905-0>
- Bogue, R. W. (2004). Boom time for LIBS technology. *Sensor Review*, 24(4), 353-357. <https://doi.org/10.1108/02602280410558368>
- Boily-Auclair, É., Mercier-Langevin, P., Ross, P.-S., & Pitre, D. (2020). *Stratigraphic setting of the LZ5 and Ellison mineralized zones, LaRonde Zone 5 project, Doyon-Bousquet-LaRonde mining camp, Abitibi, Quebec* (N° 8712; p. 8712). <https://doi.org/10.4095/323665>
- Bolin, B. J., & Moon, T. S. (2003). Sulfide detection in drill core from the Stillwater Complex using visible/near-infrared imaging spectroscopy. *GEOPHYSICS*, 68(5), 1561-1568. <https://doi.org/10.1190/1.1620630>
- Bouzahzah, H., Benzaazoua, M., Bussière, B., & Plante, B. (2014). Revue de littérature détaillée sur les tests statiques et les essais cinétiques comme outils de prédiction du drainage minier acide. *Déchets Sciences et Techniques*, 66, 14-31.
- Brouwer, P. (2003). *Theory of XRF: getting acquainted with the principles*. PANalytical BV.
- Bussière, B., & Guittonny, M. (2021). *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. CRC Press.

- Chayes, F. A. (1949). A simple point counter for thin-section analysis. *American Mineralogist*, 34, 1-11.
- Chopard, A. (2017). *Évaluation environnementale de minerais sulfurés polymétalliques basée sur une approche minéralogique pluridisciplinaire*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- Chopard, A., Marion, P., Royer, J.-J., Taza, R., Bouzahzah, H., & Benzaazoua, M. (2019). Automated sulfides quantification by multispectral optical microscopy. *Minerals Engineering*, 131, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.005>
- Christmann, P., Arndt, N., Cochonat, P., Geronimi, V., & Le Meur, P. (2016). *Spécificités et phases du projet minier : Introduction*.
- Cracknell, M. J., Parbhakar-Fox, Jackson, L., & Savinova. (2018). Automated Acid Rock Drainage Indexing from Drill Core Imagery. *Minerals*, 8(12), 571. <https://doi.org/10.3390/min8120571>
- Cravotta, C. A. (2008). Dissolved metals and associated constituents in abandoned coal-mine discharges, Pennsylvania, USA. Part 2 : Geochemical controls on constituent concentrations. *Applied Geochemistry*, 23(2), 203-226. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.10.003>
- Cremers, D. A., & Chinni, R. C. (2009). Laser-Induced Breakdown Spectroscopy—Capabilities and Limitations. *Applied Spectroscopy Reviews*, 44(6), 457-506. <https://doi.org/10.1080/05704920903058755>
- CSD. (2015). *Préparation d'une solution de détection des carbonates*.
- Desta, F., Buxton, M., & Jansen, J. (2020). Fusion of Mid-Wave Infrared and Long-Wave Infrared Reflectance Spectra for Quantitative Analysis of Minerals. *Sensors*, 20(5), 1472. <https://doi.org/10.3390/s20051472>
- Desta, F. S., & Buxton, M. W. N. (2019). Chemometric Analysis of Mid-Wave Infrared Spectral Reflectance Data for Sulphide Ore Discrimination. *Mathematical Geosciences*, 51(7), 877-903. <https://doi.org/10.1007/s11004-018-9776-4>
- Dold, B. (2008). Sustainability in metal mining : From exploration, over processing to mine waste management. *Reviews in Environmental Science and bio/technology*, 7(4), 275.
- Dold, B. (2015). *Pre-mining Characterization of Ore Deposits : What Information Do We Need to Increase Sustainability of the Mining Process*. 10th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD) & IMWA Annual Conference. Santiago de Chile, Chile.
- Dold, B. (2017). Acid rock drainage prediction : A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, 172, 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.014>
- Dubé, B., Mercier-Langevin, P., Hannington, M., Lafrance, B., Gosselin, G., & Gosselin, P. (2007). The LaRonde Penna World-Class Au-Rich Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Abitibi, Quebec : Mineralogy and Geochemistry of

- Alteration and Implications for Genesis and Exploration. *Economic Geology*, 102(4), 633-666. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.633>
- Egaña, Á. F., Santibáñez-Leal, F. A., Vidal, C., Díaz, G., Liberman, S., & Ehrenfeld, A. (2020). A Robust Stochastic Approach to Mineral Hyperspectral Analysis for Geometallurgy. *Minerals*, 10(12), 1139. <https://doi.org/10.3390/min10121139>
- Friedman, G. M. (1959). Identification of Carbonate Minerals by Staining Methods. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 29. <https://doi.org/10.1306/74D70894-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Gélineau, M., Guay, I., Québec (Province), & Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs. (2009). *Document synthèse sur le calcul et l'interprétation des objectifs environnementaux de rejet*. Développement durable, environnement et parcs Québec. <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/1906314>
- Global Tailings review. (2020). *Global industry standard on tailings management*. The International Council on Mining and Metals, the United Nations Environment Programme, and the Principles for Responsible Investment. <https://globaltailingsreview.org/>
- Goutier, J., Dion, C., Ouellet, M.-C., Mercier-Langevin, P., & Davis, D. W. (2000). *Géologie de la région de la colline Masson, de la passe Awapakamich, de la baie Carbillet et de la passe Pikwahipanan* (N° RG2000-10). Ministère des Ressources naturelles, Québec.
- Harmon, R., Lawley, C., Watts, J., Harraden, C., Somers, A., & Hark, R. (2019). Laser-Induced Breakdown Spectroscopy—An Emerging Analytical Tool for Mineral Exploration. *Minerals*, 9(12), 718. <https://doi.org/10.3390/min9120718>
- Harraden, C. L., Berry, R., & Lett, J. (2016). *Proposed Methodology for Utilising Automated Core Logging Technology to Extract Geotechnical Index Parameters*. 5.
- Hitzman, M. W. (1999). Routine staining of drill core to determine carbonate mineralogy and distinguish carbonate alteration textures. *Mineralium Deposita*, 34(8), 794-798. <https://doi.org/10.1007/s001260050240>
- Huebner, S., Miyakawa, N., Kapsner, S., Pahlke, A., & Kreupl, F. (2015). High Performance X-Ray Transmission Windows Based on Graphenic Carbon. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 62(2), 588-593. <https://doi.org/10.1109/TNS.2015.2396116>
- ICM. (2014). *Normes de définitions de l'ICM pour les ressources minérales et les réserves minérales*.
- IMDEX. (2019). *AiSIRIS results information sheet*.
- Jambor, J. L., Dutrizac, J. E., & Raudsepp, M. (2007). Measured and computed neutralization potentials from static tests of diverse rock types. *Environmental Geology*, 52(6), 1019-1031. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0542-4>

- Kenneth Williamson (3DGeo-solution). (2019). *NI 43-101 Technical Report and Mineral Resource Estimate for the O'Brien Project, Abitibi, Québec* (p. 136) [Norme NI 43-101].
- Kwong, Y.-T. J. (1993). *Prediction and prevention of acid rock drainage from a geological and mineralogical perspective*. MEND.
- Lafrance, B., Moorhead, J., Davis, D. W., & Géologie Québec. (2003). *Cadre géologique du camp minier de Doyon-Bousquet-LaRonde*. Géologie Québec.
- Lawrence, R. W., & Marchant, P. M. (1991). *Acid rock drainage prediction manual. MEND/NEDEM Report, 1*.
- Loi sur les mines, M-13.1 80 (2021).
- Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement—Loi sur la qualité de l'environnement., RLRQ c Q-2 (2021). <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/Q-2/>
- Lindsay, M. B. J., Moncur, M. C., Bain, J. G., Jambor, J. L., Ptacek, C. J., & Blowes, D. W. (2015). Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings. *Applied Geochemistry*, 57, 157-177. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.01.009>
- Lishchuk, V., Koch, P.-H., Ghorbani, Y., & Butcher, A. R. (2020). Towards integrated geometallurgical approach : Critical review of current practices and future trends. *Minerals Engineering*, 145, 106072. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106072>
- Lottermoser, B. (2017). Predictive Environmental Indicators in Metal Mining. In B. Lottermoser (Éd.), *Environmental Indicators in Metal Mining* (p. 3-12). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42731-7_1
- Lottermoser, B. G. (2007). *Mine wastes : Characterization, treatment and environmental impacts ; with 43 tables* (2. ed). Springer.
- Lottermoser, B. G. (2010). *Mine wastes : Characterization, treatment and environmental impacts* (Third edition). Springer.
- Lottermoser, B. G. (Éd.). (2017). *Environmental indicators in metal mining*. Springer.
- Maitre, J., Bouchard, K., & Bédard, L. P. (2019). Mineral grains recognition using computer vision and machine learning. *Computers & Geosciences*, 130, 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.05.009>
- Marjoribanks, R. (2010). *Geological Methods in Mineral Exploration and Mining*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74375-0>
- Marsland, R., & Wylie, S. (1998). *Design for closure. Does it really work?* <https://doi.org/10.14288/1.0042320>
- MDDEP, M. (2012). *Directive 019 sur l'industrie minière*. Online: www.mddep.gouv.qc.ca/milieu_ind/directive019/directive019.pdf
- MELCC. (2018). *Directive pour la réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement*. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/evaluations/directive-etude-impact/directive-realisation-etude-impact.pdf>

- MELCC. (2020). *Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement (REAFIE)*. <http://environnement.gouv.qc.ca/lqe/autorisations/reafie/index.htm>
- MELCC. (2021). *Guide de référence du règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement* (p. 706). ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/lqe/autorisations/reafie/guide-reference%E2%80%93reafie.pdf>
- MEND. (2004). *Review of Water Quality Issues in Neutral pH Drainage: Examples and Emerging Priorities for the Mining Industry in Canada*. MEND Smithers, BC, Canada.
- Mercier-Langevin, P., Dubé, B., Blanchet, F., Pitre, D., & Laberge, A. (2017). The LaRonde Penna Au-Rich Volcanogenic Massive Sulfide Deposit. In T. Monecke, P. Mercier-Langevin, & B. Dubé (Éds.), *Archean Base and Precious Metal Deposits, Southern Abitibi Greenstone Belt, Canada* (Vol. 19, p. 0). Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/Rev.19.07>
- Mercier-Langevin, P., Dube, B., Hannington, M. D., Davis, D. W., Lafrance, B., & Gosselin, G. (2007). The LaRonde Penna Au-Rich Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Abitibi Greenstone Belt, Quebec: Part I. Geology and Geochronology. *Economic Geology*, 102(4), 585-609. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.585>
- MERN. (2005). *Le claim*. <https://mern.gouv.qc.ca/publications/enligne/mines/claim/leclaim.asp>
- MERN. (2016). *Lignes directrices encadrant les interventions du personnel de la direction générale de géologie québec*. https://mern.gouv.qc.ca/publications/mines/publications/Lignedirectrice_DG_GQ_f.pdf
- MERN. (2020a). *Processus de développement minéral*. https://www.mamh.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/orientations_gouvernementales/travaux_exploration_miniere.pdf
- MERN. (2020b, mars 31). *Restauration des sites miniers sous la responsabilité réelle de l'État*. MERN. <https://mern.gouv.qc.ca/mines/restauration-miniere/restauration-des-sites-miniers-abandonnes/>
- Merrill, J., Martínez, P., Urrutia, N., Voisin, L., Merrill, J., Martínez, P., Urrutia, N., & Voisin, L. (2016). Sulphides detection by hyperspectral analysis in the thermal infrared range. *Proceedings of the 3rd International Seminars on Geometallurgy (GEOMET), Lima, Peru*, 11-13.
- Michaux, S., & O'Connor, L. (2020). *How to set up and Develop a Geometallurgical Program*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16170.24005>
- Miller, S., Robertson, A., & Donahue, T. (1997). *Advances in acid drainage prediction using the net acid generating (NAG) test*.

- Moncur, M. C., Jambor, J. L., Ptacek, C. J., & Blowes, D. W. (2009). Mine drainage from the weathering of sulfide minerals and magnetite. *Applied Geochemistry*, 24(12), 2362-2373. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.09.013>
- Nicholson, R. V. (1994). Iron-sulfide oxidation mechanisms: Laboratory studies. *Environmental Geochemistry of Sulphide Mine-Wastes*, 22, 163-183.
- Owen, J. R., & Kemp, D. (2013). Social licence and mining: A critical perspective. *Resources Policy*, 38(1), 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.06.016>
- Parbhakar-Fox. (2012). *Establishing the value of an integrated geochemistry—Mineralogy—Texture approach for acid rock drainage prediction* [Thèse]. University of Tasmania.
- Parbhakar-Fox, A. (2017). Predicting Waste Properties Using the Geochemistry-Mineralogy-Texture-Geometallurgy Approach. In B. Lottermoser (Éd.), *Environmental Indicators in Metal Mining* (p. 73-96). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42731-7_5
- Parbhakar-Fox, A., Fox, N., Jackson, L., & Cornelius, R. (2018). Forecasting geoenvironmental risks: Integrated applications of mineralogical and chemical data. *Minerals*, 8(12), 541.
- Parbhakar-Fox, A., Fox, N., Moltzen, J., & Lottermoser, B. (2017). Chemical Staining Techniques for Drill Core Characterization. In B. Lottermoser (Éd.), *Environmental Indicators in Metal Mining* (p. 97-114). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42731-7_6
- Parbhakar-Fox, Edraki, Walters, S., & Bradshaw. (2011). Development of a textural index for the prediction of acid rock drainage. *Minerals Engineering*, 24(12), 1277-1287. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.04.019>
- Parbhakar-Fox, & Lottermoser. (2015). A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices. *Minerals Engineering*, 82, 107-124.
- Parbhakar-Fox, & Lottermoser, B. (2011). *Predictive environmental indicators in mining*.
- Parbhakar-Fox, Lottermoser, B., & Bradshaw. (2013). *Cost-Effective Means for Identifying Acid Rock Drainage Risks – Integration of the Geochemistry-Mineralogy-Texture Approach and Geometallurgical Techniques*.
- Pitre, D. (2020, octobre 21). *Complexe minier LaRonde: Développements récents, défis et opportunités* [Conférence]. Congrès XPLOR 2020.
- Plante, B., Benzaazoua, M., & Bussière, B. (2011). Predicting Geochemical Behaviour of Waste Rock with Low Acid Generating Potential Using Laboratory Kinetic Tests. *Mine Water and the Environment*, 30(1), 2-21. <https://doi.org/10.1007/s10230-010-0127-z>
- Plante, B., Bussière, B., & Benzaazoua, M. (2012). Static tests response on 5 Canadian hard rock mine tailings with low net acid-generating potentials. *Journal of Geochemical Exploration*, 114, 57-69. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.12.003>

- Plumlee, G. S. (1999). The Environmental Geology of Mineral Deposits. *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits*.
- Plumlee, G. S., & Nash, J. T. (1995). Geoenvironmental models of mineral deposits—fundamentals and applications. *US Geological Survey Open-file report*, 95-831.
- Price, W. A., & Kwong, Y. T. J. (1997). Waste rock weathering, sampling and analysis : Observations from the British Columbia Ministry of Employment and Investment database. *Proceedings of 4th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Vancouver*, 31-45.
- Shaw, S. C., Groat, L. A., Jambor, J. L., Blowes, D. W., Hanton-Fong, C. J., & Stuparyk, R. A. (1998). Mineralogical study of base metal tailings with various sulfide contents, oxidized in laboratory columns and field lysimeters. *Environmental Geology*, 33(2-3), 209-217. <https://doi.org/10.1007/s002540050239>
- Sherlock, E. J., Lawrence, R. W., & Poulin, R. (1995). *On the neutralization of acid rock drainage by carbonate and silicate minerals*. 12.
- Shields, Te. (2020, mai 26). *SDD vs. PIN Detector : Which One Do You Need for Handheld XRF?* <https://www.olympus-ims.com/en/insight/sdd-vs-pin-detector-which-one-do-you-need-for-handheld-xrf/>
- Steffen, Robertson, & Kristen. (1989). *Draft acid rock drainage technical guide*.
- Vermette, D. (2018). *Approche de caractérisation géoenvironnementale axée sur l'utilisation des concepts géométallurgiques* [Mémoire de maîtrise]. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- Villeneuve, M. (2015). *Équipement – FRX portatif Niton XL3t 900SHE*.
- Warne, S. S. J. (1962). A quick field or laboratory staining scheme for the differentiation of the major carbonate minerals. *Journal of Sedimentary Research*, 32(1), 29-38.
- Yergeau, D., Mercier-Langevin, P., Dubé, B., Jackson, S., Malo, M., Bernier, C., & Simard, P. (2015). *Synvolcanic Au-Ag±Cu-Zn-Pb massive sulphides, veins and disseminations of the Westwood deposit, Abitibi greenstone belt, Québec* (N° 7482; p. 7482). <https://doi.org/10.4095/293117>

ANNEXES

ANNEXE 8-1 DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES PARAMÈTRES A À E DE L'ARDI.....	124
ANNEXE 8-2 VUE PLANAIRE DES ZONES MINÉRALISÉES 4 4.1 ET 5 À 180M SOUS LA SURFACE DU PROJET LZ5 (D'APRÈS BOILY-AUCLAIR ET AL., 2020).....	129
ANNEXE 8-3 FICHE D'ÉCHANTILLONNAGE COMPARATIVE DU SITE LZ5	130
ANNEXE 8-4 : FICHE D'ÉCHANTILLONNAGE COMPARATIVE DU PROJET O'BRIEN	131
ANNEXE 8-5 : TABLEAU PÉRIODIQUE AVEC LES ÉNERGIES DE RAYONS X (BRUKER. 2020).....	132
ANNEXE 8-6 : TABLEAU DE CONVERSION DES ÉLÉMENTS EN OXYDES (ALSGLOBAL)	133
ANNEXE 8-7 : PRÉPARATION D'UNE SOLUTION DE DÉTECTION DES CARBONATES (MODIFIÉ D'APRÈS CSD, 2012).....	134
ANNEXE 8-8: DÉFINITION DES SOUS-OBJECTIFS DU PROJET MITACS	138
ANNEXE 8-9 : MACROSCOPIC ZOOM OF CERTAIN SAMPLES FROM SITE A (OBTAINED WITH AXIO ZOOM V16)	139
ANNEXE 8-10: MINERALS IDENTIFIED BY MINERAL SPECTROMETER BEFORE AND AFTER NUMERICAL TREATMENT.....	140
ANNEXE 8-11: MACROSCOPIC ZOOM OF CERTAIN SAMPLES FROM SITE B (OBTAINED WITH AXIO ZOOM V16)	141

Annexe 8-1 Description détaillée des paramètres A à E de l'ARDI (figure 1-7)

Paramètre A: Teneur en sulfures

Ce premier paramètre a pour but d'identifier le potentiel maximum d'acidité en faisant l'hypothèse que tous les sulfures (ferreux) présents sont réactifs. En fonction du pourcentage de sulfures estimé (pourcentage de la surface observée) dans la matrice, une valeur de 0 à 10 va être assignée à l'échantillon pour ce paramètre (Tableau 8-1).

Tableau 8-1 :Paramètre A de l'ARDI (mésos et microscales) (d'après Parbhakar-Fox,2012)

Contenu en sulfures de fer (%)	Valeur ARDI	Contenu en sulfures de fer (%)	Valeur ARDI
100	10	40	4
90	9	30	3
80	8	20	2
70	7	10	1
60	6	Pas de sulfures	0
50	5		

Paramètre B: L'altération des sulfures

Ce paramètre est dérivé de l'indice d'altération des sulfures développés par Blowes et Jambor (1990) prenant en compte les sulfures présents dans les résidus du complexe de Waite-Amulet en Abitibi, mais également des alternatives développées par Shaw et al. (1998) et Moncur et al. (2009) évaluant une plus grande variété de sulfures. La nouvelle approche de l'ARDI se base sur le comptage de grains évaluant la part des sulfures qui présente de l'altération, si le sulfure de fer est frais, le score est maximal (10) et diminue en fonction de la proportion de l'altération jusqu'aux scores faibles présentant la formation de minéraux secondaires (Figure 8-1). Ces observations vont être généralement réalisées grâce à une loupe binoculaire. Chaque grain de sulfure est identifié et analysé individuellement, les associations minéralogiques ne sont prises en compte que dans le

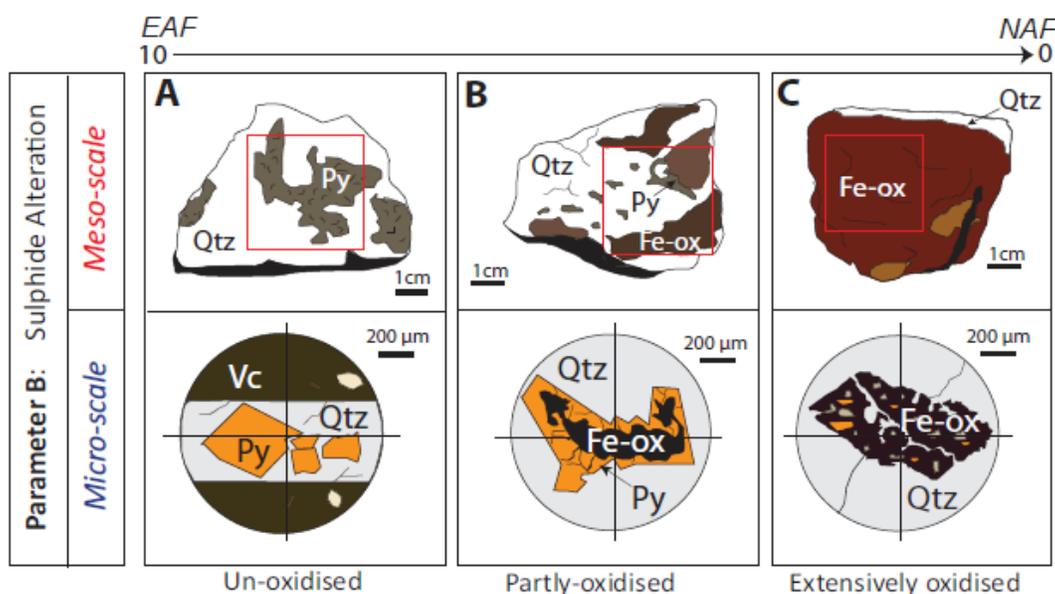


Figure 8-1 : Exemples de l'évaluation du paramètre B de l'ARDI selon le degré d'altération des sulfures de fer. D'après la Figure 2.7 (Parbhakar-Fox, 2012)

(A) Pyrite non altérée (10/10); (B) Pyrite partiellement altérée (5/10); (C) Pyrite presque totalement dissoute (1/10).

EAF: Échantillon entièrement dissout; NAF: Non entièrement dissout; dernier paramètre.

Paramètre C: La morphologie des sulfures

L'étude de la morphologie des sulfures est importante afin d'identifier le potentiel d'oxydation de ces derniers. En effet, plus la surface spécifique du grain est grande, plus il y a de surface disponible pour l'altération. Dans ce paramètre, la taille et la forme des grains est observée, plus le grain est gros plus le score va être faible et plus la morphologie va être complexe plus le score va être élevé. Par exemple, un grain de pyrite framboïdale va donner le score plus élevé (10) tandis qu'un cube automorphe de pyrite va

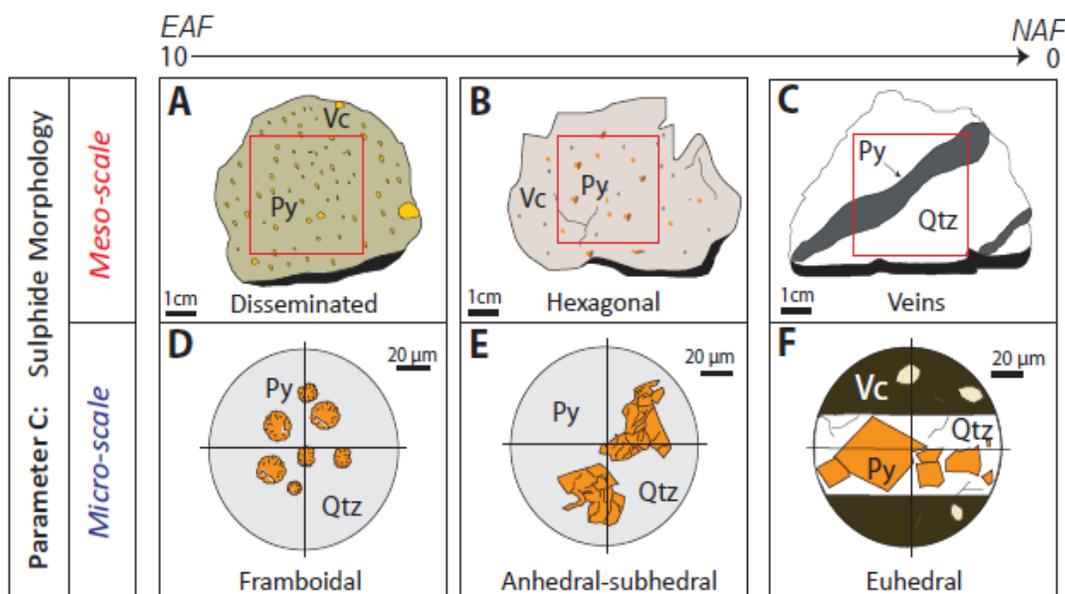


Figure 8-2 : Exemples du paramètre C de l'ARDI concernant l'analyse de la morphologie et la texture des sulfures. D'après la Figure 2.8 (Parbhakar-Fox, 2012)

(A) Sulfures disséminés (8/10); (B) Pyrite hexagonale (6/10); (C) Veine de sulfures (2/10); (D) Pyrite framboïdale (10/10); (E) Pyrite anèdre (6/10); (F) Pyrite non fracturée au sein d'une veine de quartz (1/10).

avoir le score le plus faible (1) (Figure 8-2).

Paramètre D: Teneur en neutralisant

Ce paramètre est probablement le plus complexe à déterminer, car il faut évaluer la minéralogie autour des grains de sulfures identifiés comme potentiellement générateurs d'acide (PGA). Si la zone autour du grain sélectionné est riche en sulfure, un score élevé relatif au pourcentage évalué est donné pour le paramètre D. Si la zone contient des minéraux considérés comme non neutralisants et non PGA un score nul est donné et enfin si des minéraux neutralisants sont présents alors le score peut atteindre une valeur négative de -5 si 100% de la zone est concernée. Si la zone comprend des sulfures et de la calcite par exemple une valeur ajustée est donnée au paramètre (80% sulfures et 20% calcite donnent un score de 7) (Figure 8-3). Afin d'identifier facilement les minéraux neutralisants dans l'échantillon, la coloration des carbonates peut être utilisée afin de

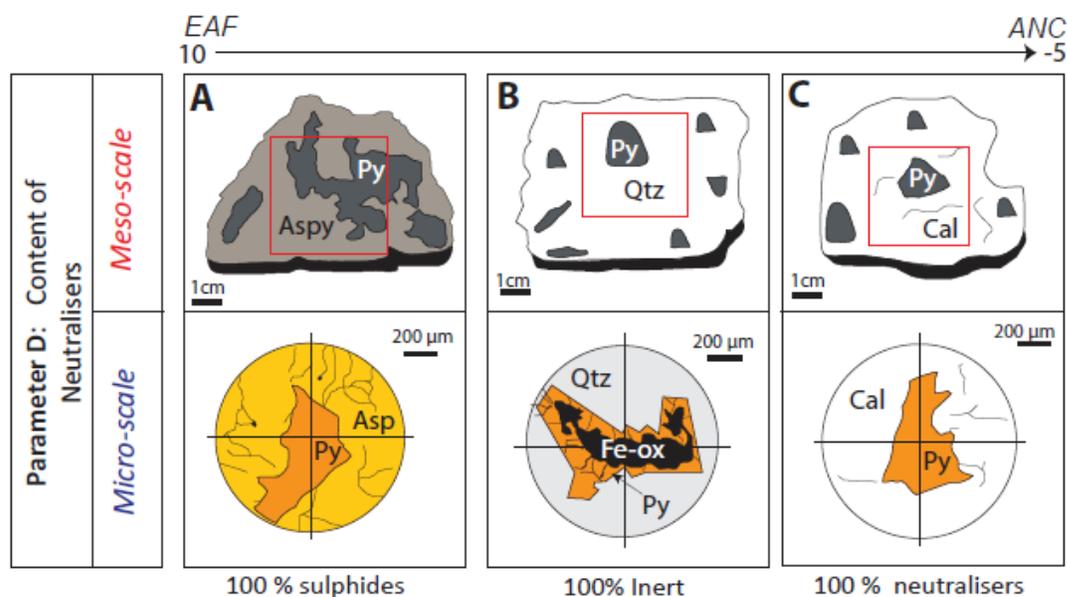


Figure 8-3 : Exemples du paramètre D de l'ARDI évaluant la minéralogie entourant les grains de sulfures. D'après la Figure 2.9 (Parbhakar-Fox, 2012)

(A) Pyrite entourée à 100% d'Asp (10/10); (B) Pyrite entourée à 100% de Qtz (0/10); (C) Pyrite entourée à 100% de calcite (-5/10)

faciliter cette démarche.

Paramètre E: Associations minéralogiques des sulfures

Observer les associations minéralogiques permet d'identifier les interactions galvaniques (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2011) entre les sulfures. Ces interactions vont avoir lieu lorsque les sulfures sont en contact direct avec d'autres sulfures, dans ce cas-là un score élevé va être donné au paramètre tandis que s'il est 100% en contact avec des minéraux neutralisants un score négatif de -5 va être assigné (Figure 8-4).

Lors de l'identification de ce paramètre, il est important de prendre en compte tous les types de sulfures même non ferreux afin d'identifier au mieux les interactions. Ce paramètre peut paraître redondant avec des informations du paramètre A et C, mais il permet de minimiser des erreurs d'interprétations des résultats individuels et confirme l'importance de conjuguer les résultats de chaque paramètre pour une meilleure évaluation du risque.

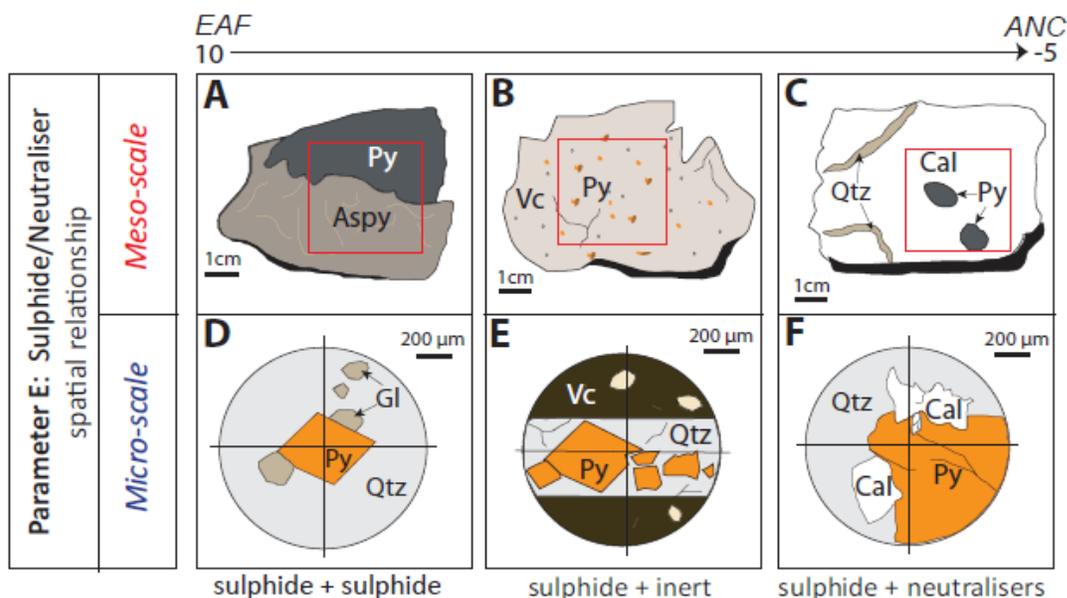
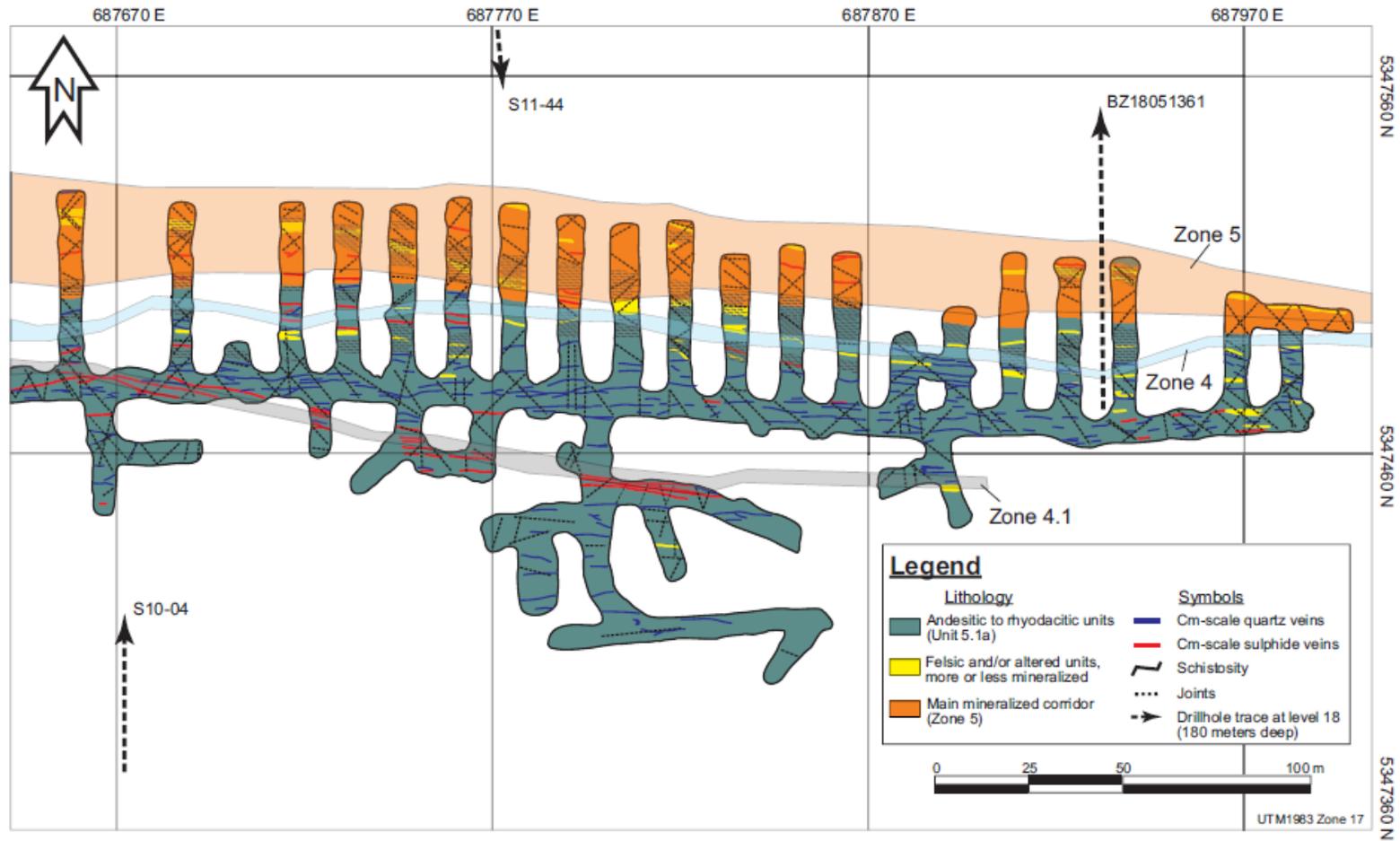


Figure 8-4 : Exemple du paramètre E de l'ARDI évaluant les associations minérales des grains de sulfures individuels. D'après la Figure 2.10 (Parbhakar-Fox, 2012)

(A) Pyrite associée à 100% d'Aspy (10/10); (B) Pyrite associée à 100% avec de la matrice volcanique altérée (0/10); (C) Pyrite associée à 100% de calcite (-5/10); (D) Pyrite associée à 20% avec galène et 80% de quartz (6/10); (E) Pyrite associée à 100% avec du quartz (0/10); (F) Pyrite associée avec 20% de calcite et 80% de quartz (-4/10).

Annexe 8-2 Vue planaire des zones minéralisées 4 4.1 et 5 à 180m sous la surface du projet LZ5 (D'après Boily-Auclair et al.,



2020)

Annexe 8-3 Fiche d'échantillonnage comparative du site LZ5 (S11-44)

Lithologie	De	À	Échantillon litho		Échantillon AD	De	À	
			AEM	De				À
2D, DIORITE	203,4	209	CALRD107372	207,5	207,7	2020_AD_LR_01	207,3	207,5
V6, ANDÉSITE	209	217,2	CALRD107373	211,9	212,1	2020_AD_LR_02	211,7	211,9
V9a SZ, TUF FELSIQUE ZONE DE SULFURE	217,2	235,9	CALRD107374	218,3	218,5	2020_AD_LR_03	218,1	218,3
			CALRD107375	218,5	218,7	2020_AD_LR_04	218,3	218,5
			CALRD107376	223,9	224,1	2020_AD_LR_05	223,7	223,9
			CALRD107377	227,7	227,9	2020_AD_LR_06	227,5	227,7
V6, ANDÉSITE	235,9	253,7	CALRD107378	243,2	243,4	2020_AD_LR_07	243	243,2
			CALRD107379	252,6	252,8	2020_AD_LR_08	252,4	252,6
V9a SZ, TUF FELSIQUE ZONE DE SULFURE	253,7	254,7						
V6, ANDÉSITE	254,7	274	CALRD107380	255,4	255,6	2020_AD_LR_09	255,2	255,4
			CALRD107381	264,6	264,8	2020_AD_LR_10	264,4	264,6
V9i LP BK, TUF INTERMÉDIAIRE LAPILLI-BLOC	274	285,6	CALRD107382	281	281,2	2020_AD_LR_11	280,8	281
V7, BASALTE	285,6	289,8	CALRD107383	287	287,2	2020_AD_LR_12	286,8	287
V9a LP BK, TUF FELSIQUE LAPILLI-BLOC	289,8	305,5	CALRD107384	291,8	292	2020_AD_LR_13	291,6	291,8
			CALRD107385	301,1	301,3	2020_AD_LR_14	300,9	301,1
V9i LP BK, TUF INTERMÉDIAIRE LAPILLI-BLOC	305,5	326,5	CALRD107386	309,6	309,9	2020_AD_LR_15	309,4	309,7
			CALRD107387	318,7	319	2020_AD_LR_16	318,5	318,8
			CALRD107388	317,7	317,9	2020_AD_LR_17	317,5	317,7
V6 SZ, V6 SZ (ANDÉSITE ZONE DE SULFURE)	326,5	337,2	CALRD107389	326,8	327	2020_AD_LR_18	326,6	326,8
			CALRD107390	329,6	329,8	2020_AD_LR_19	329,4	329,6
			CALRD107391	332,1	332,3	2020_AD_LR_20	331,9	332,1
			CALRD107392	334,6	334,9	2020_AD_LR_21	334,4	334,7
V6 SZ, V6 SZ (ANDÉSITE ZONE DE SULFURE)	337,2	365,4	CALRD107393	337,8	338	2020_AD_LR_22	337,6	337,8
			CALRD107394	345,1	345,3	2020_AD_LR_23	344,9	345,1
			CALRD107395	351,3	351,5	2020_AD_LR_24	351,1	351,3
			CALRD107396	355,8	356	2020_AD_LR_25	355,6	355,8
			CALRD107397	362,3	362,5	2020_AD_LR_26	362,1	362,3
			CALRD107398	364,4	364,7	2020_AD_LR_27	364,2	364,5
V6, ANDÉSITE	365,4	398,6	CALRD107399	371	371,2	2020_AD_LR_28	370,8	371
			CALRD107400	377,3	377,5	2020_AD_LR_29	377,1	377,3
			CALRD107401	383,9	384,1	2020_AD_LR_30	383,7	383,9
			CALRD107402	390,7	390,9	2020_AD_LR_31	390,5	390,7
			CALRD107403	394,5	394,7	2020_AD_LR_32	394,3	394,5
V9i LP BK, TUF INTERMÉDIAIRE LAPILLI-BLOC	398,6	413,8	CALRD107404	399	399,2	2020_AD_LR_33	398,8	399
			CALRD107405	409,6	409,8	2020_AD_LR_34	409,4	409,6
V6, ANDÉSITE	413,8	436,5	CALRD107406	416,2	416,4	2020_AD_LR_35	416	416,2
			CALRD107407	431,5	431,7	2020_AD_LR_36	431,3	431,5
V9i LP BK, TUF INTERMÉDIAIRE LAPILLI-BLOC	436,5	444,5	CALRD107408	443,6	443,8	2020_AD_LR_37	443,4	443,6
V9i LP BK, TUF INTERMÉDIAIRE LAPILLI-BLOC	444,5	459,5	CALRD107409	448,5	448,7	2020_AD_LR_38	448,3	448,5
V9i, TUF INTERMÉDIAIRE	459,5	481	CALRD107410	459,7	459,9	2020_AD_LR_39	459,5	459,7
			CALRD107411	467,3	467,5	2020_AD_LR_40	467,1	467,3
			CALRD107412	479	479,2	2020_AD_LR_41	478,8	479

Annexe 8-4 : Fiche d'échantillonnage comparative du projet O'Brien

Échantillon	Type	Lithologie	Zone
OB-17-22-01	Minerai	Basalte	mineral
OB-17-55-01	Minerai	Conglomerat	mineral
RM-11-03-01	Minerai	Andesite porphyrique	mineral
RM-11-15-01	Minerai	Basalte	mineral
RM-11-16-01	Minerai	Basalte	mineral
RM-11-16-02	Minerai	Andesite porphyrique	mineral
OB-17-28-02	Stérile	Greywacke	Rampe
OB-17-26-01	Stérile	Greywacke	Rampe
OB-17-28-01	Stérile	Greywacke	Rampe
OB-17-25-01	Stérile	Greywacke	Rampe
OB-16-20-02	Stérile	Basalte	Bulk
OB-17-68-01	Stérile	Greywacke	Bulk
OB-17-22-02	Stérile	Andesite porphyrique	Zone minéralisée
OB08-141-01	Minerai	Andesite porphyrique	mineral
OB07-124-01	Minerai	Conglomerat	mineral
OB95-49-01	Minerai	Conglomerat	mineral
OB08-135-02	Stérile	Andesite porphyrique	Bulk

Annexe 8-5 : Tableau périodique avec les énergies de rayons X (Bruker, 2020)

Z	Element	K α_1	K β_1	L α_1	L β_1	Z	Element	K α_1	K β_1	L α_1	L β_1	Z	Element	K α_1	K β_1	L α_1	L β_1	M α_1	M β_1
3	Li Lithium					34	Se Selenium	11.224	12.497	1.379	1.419	65	Tb Terbium	44.482	50.385	6.273	6.975	1.240	1.269
4	Be Beryllium	0.108				35	Br Bromine	11.924	13.292	1.481	1.526	66	Dy Dysprosium	45.999	52.113	6.498	7.248	1.293	1.325
5	B Boron	0.183				36	Kr Krypton	12.648	14.112	1.585	1.636	67	Ho Holmium	47.547	53.877	6.720	7.526	1.348	1.383
6	C Carbon	0.277				37	Rb Rubidium	13.396	14.961	1.692	1.751	68	Er Erbium	49.128	55.674	6.949	7.811	1.404	1.448
7	N Nitrogen	0.392				38	Sr Strontium	14.165	15.835	1.806	1.871	69	Tm Thulium	50.742	57.505	7.180	8.102	1.462	1.503
8	O Oxygen	0.525				39	Y Yttrium	14.958	16.739	1.924	1.998	70	Yb Ytterbium	52.388	59.382	7.416	8.402	1.526	1.573
9	F Fluorine	0.677				40	Zr Zirconium	15.775	17.668	2.044	2.126	71	Lu Lutetium	54.070	61.290	7.655	8.710	1.580	1.630
10	Ne Neon	0.849				41	Nb Niobium	16.615	18.625	2.169	2.260	72	Hf Hafnium	55.790	63.244	7.899	9.023	1.646	1.700
11	Na Sodium	1.040				42	Mo Molybdenum	17.480	19.606	2.292	2.394	73	Ta Tantalum	57.535	65.222	8.146	9.343	1.712	1.770
12	Mg Magnesium	1.254	1.302			43	Tc Technetium	18.367	20.626	2.423	2.535	74	W Tungsten	59.318	67.244	8.398	9.672	1.775	1.838
13	Al Aluminium	1.486	1.557			44	Ru Ruthenium	19.279	21.656	2.558	2.683	75	Re Rhenium	61.141	69.309	8.652	10.010	1.843	1.906
14	Si Silicon	1.740	1.837			45	Rh Rhodium	20.216	22.724	2.697	2.834	76	Os Osmium	63.000	71.414	8.911	10.354	1.907	1.978
15	P Phosphorus	2.010	2.139			46	Pd Palladium	21.177	23.818	2.838	2.990	77	Ir Iridium	64.896	73.560	9.175	10.708	1.980	2.052
16	S Sulfur	2.309	2.465			47	Ag Silver	22.163	24.941	2.983	3.150	78	Pt Platinum	66.831	75.750	9.442	11.071	2.050	2.127
17	Cl Chlorine	2.622	2.812			48	Cd Cadmium	23.173	26.093	3.133	3.315	79	Au Gold	68.806	77.982	9.713	11.443	2.123	2.203
18	Ar Argon	2.958	3.190			49	In Indium	24.210	27.275	3.286	3.487	80	Hg Mercury	70.818	80.255	9.989	11.824	2.195	2.281
19	K Potassium	3.314	3.590			50	Sn Tin	25.271	28.485	3.444	3.663	81	Tl Thallium	72.872	82.573	10.269	12.213	2.271	2.363
20	Ca Calcium	3.692	4.013	0.341	0.345	51	Sb Antimony	26.359	29.725	3.604	3.842	82	Pb Lead	74.970	84.939	10.551	12.614	2.342	2.444
21	Sc Scandium	4.093	4.464	0.395	0.400	52	Te Tellurium	27.473	30.993	3.768	4.029	83	Bi Bismuth	77.107	87.349	10.839	13.023	2.423	2.526
22	Ti Titanium	4.512	4.933	0.452	0.458	53	I Iodine	28.612	32.294	3.938	4.221	84	Po Polonium	79.291	89.803	11.131	13.446	2.499	2.614
23	V Vanadium	4.953	5.428	0.510	0.518	54	Xe Xenon	29.775	33.620	4.110	4.418	85	At Astatine	81.516	92.304	11.427	13.876	2.577	2.699
24	Cr Chromium	5.415	5.947	0.572	0.582	55	Cs Cesium	30.973	34.982	4.285	4.619	86	Rn Radon	83.785	94.866	11.727	14.315	2.654	2.784
25	Mn Manganese	5.900	6.492	0.637	0.648	56	Ba Barium	32.194	36.378	4.466	4.828	87	Fr Francium	86.106	97.474	12.031	14.771	2.732	2.868
26	Fe Iron	6.405	7.059	0.705	0.718	57	La Lanthanum	33.442	37.797	4.647	5.038	88	Ra Radium	88.478	100.130	12.339	15.236	2.806	2.949
27	Co Cobalt	6.931	7.649	0.775	0.790	58	Ce Cerium	34.720	39.256	4.839	5.262	89	Ac Actinium	90.884	102.846	12.652	15.713	2.900	3.051
28	Ni Nickel	7.480	8.267	0.849	0.866	59	Pr Praseodymium	36.027	40.749	5.035	5.492	90	Th Thorium	93.351	105.605	12.968	16.202	2.996	3.149
29	Cu Copper	8.046	8.904	0.928	0.947	60	Nd Neodymium	37.361	42.272	5.228	5.719	91	Pa Protactinium	95.868	108.427	13.291	16.703	3.082	3.240
30	Zn Zinc	8.637	9.570	1.012	1.035	61	Pm Promethium	38.725	43.827	5.432	5.961	92	U Uranium	98.440	111.303	13.614	17.220	3.171	3.336
31	Ga Gallium	9.251	10.267	1.098	1.125	62	Sm Samarium	40.118	45.414	5.633	6.201	93	Np Neptunium	101.059	114.234	13.946	17.751	3.250	3.435
32	Ge Germanium	9.886	10.982	1.188	1.218	63	Eu Europium	41.542	47.038	5.849	6.458	94	Pu Plutonium	103.734	117.228	14.282	18.296	3.339	3.534
33	As Arsenic	10.543	11.726	1.282	1.317	64	Gd Gadolinium	42.996	48.695	6.053	6.708	95	Am Americium	106.472	120.284	14.620	18.856	3.438	3.646

Annexe 8-6 : Tableau de conversion des éléments en oxydes (ALS Global, 2021)

ELEMENT TO OXIDE CONVERSION FACTORS					
Element	Oxide	Factor	Element	Oxide	Factor
Al	Al ₂ O ₃	1.889	Na	Na ₂ O	1.348
Ba	BaSO ₄	1.699	Nb	Nb ₂ O ₅	1.431
Ca	CaCO ₃	2.497	P	P ₂ O ₅	2.291
Ca	CaO	1.399	Si	SiO ₂	2.139
Cr	Cr ₂ O ₃	1.462	Sn	SnO ₂	1.270
F	CaF ₂	2.055	Sr	SrO	1.183
Fe	FeO	1.287	Ta	Ta ₂ O ₅	1.221
Fe	Fe ₂ O ₃	1.430	Th	ThO ₂	1.138
Fe	Fe ₃ O ₄	1.382	Ti	TiO ₂	1.668
K	K ₂ O	1.205	U	U ₃ O ₈	1.179
Mg	MgO	1.658	V	V ₂ O ₅	1.785
Mn	MnO	1.291	W	WO ₃	1.261
Mo	MoS ₂	1.668	Zr	ZrO ₂	1.351

Annexe 8-7 : Préparation d'une solution de détection des carbonates (modifié d'après CSD, 2012)

But

Le but est de produire des solutions chimiques pouvant servir à des géologues pour caractériser des minéraux de carbonate. Identifier les solutions « test carbonates PF ou test carbonates ARS ».

Responsable

Le technicien est responsable d'effectuer la préparation et l'entreposage de la solution.

Le métallurgiste est responsable de faire appliquer la procédure.

Équipements de sécurité

Soulier de sécurité
Douche d'urgence
Lunette de sécurité

Gants de caoutchouc
Hotte chimique
Chemise/Sarrau

Équipements

Balance précise au centigramme (0.01g)
Bécher de 1000 ml et 600 ml
Barre d'agitation magnétique
Plaque d'agitation magnétique
Erlenmeyer 1L
Petit Büchner

Papier filtre (grade 1)
Contenant de pesée
Spatule
Flacon laveur, eau embouteillée
Bouteilles ambrées HDPE (4 x 250 ml)
Étiquettes SIMDUT

Réactifs

Ferricyanure de potassium ($K_3Fe(CN)_6$)
Alizarine ($C_{14}H_8O_4$)
Acide chlorhydrique (HCl 38%)
Eau embouteillée

Prérequis

Prendre connaissance des fiches signalétiques des réactifs utilisés.

Lire la procédure de manipulation cyanures.

Lire la procédure Utilisation de matières corrosives.

Préparation de 1L de solution 0.5% HCL

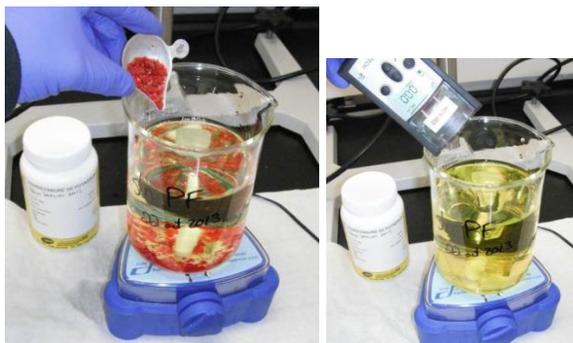
- Installer le ballon sous une hotte de ventilation.
- Ajouter une barre magnétique et placer sur une plaque agitatrice.
- Remplir à moitié le ballon volumétrique avec de l'eau embouteillée.
- Ajouter 13.0 ml de HCl à 38%.
- Agiter 5 minutes.
- Retire la barre magnétique à l'aide de la tige et jauger le ballon volumétrique.
- Laver la tige afin de récupérer tout le réactif.
- Mettre de côté cette solution.
- Bien identifier le ballon.



Ballon sur plaque agitatrice.

Préparation de la solution PF

- Installer le bécher sous une hotte de ventilation.
- Identifier un bécher de 600 ml.
- Ajouter une barre magnétique et placer sur une plaque agitatrice.
- Mesurer 400 ml de solution 0.5% HCl avec un cylindre gradué.
- Mettre 8.0 g ferricyanure de potassium ($K_3Fe(CN)_6$)



Ajout de $K_3Fe(CN)_6$ et agitation.

- Agiter 5 minutes.
- Retire la barre magnétique à l'aide de la tige.
- Entreposer dans les bouteilles ambrées HDPE bien identifiées.
- Bien identifier la composition et les risques sur l'étiquette de laboratoire.

Préparation de la solution Alizarine red S (ARS)

- Installer le bécher sous une hotte de ventilation.
- Identifier un bécher de 1L.
- Ajouter une barre magnétique et placer sur une plaque agitatrice.
- Mesurer 600 ml de solution de 0.5 % HCl avec un cylindre gradué.
- Ajouter 1.2 g alizarine ($C_{14}H_8O_4$).



Ajout d'alizarine et agitation.

- Agiter 5 minutes.
- Retire la barre magnétique à l'aide de la tige.
- Filtrer la solution (2 papiers 1001-150).
- Entreposer dans les bouteilles ambrées HDPE bien identifiées.



Filtration de la solution.

Détection des carbonates

- Vaporiser la solution PF sur la roche et selon la minéralogie des carbonates, il y aura une coloration (Voir Tableau 2-5: Identification des carbonates en fonction des réactifs utilisés (CSD, 2015))
- Vaporiser la solution ARS sur la roche et selon la minéralogie des carbonates, il y aura une coloration (Voir Tableau 2-5: Identification des carbonates en fonction des réactifs utilisés (CSD, 2015))
- Mélanger la solution ARS et PF en proportion égale dans une bouteille vaporisateur. Attendre 1 minute et vaporiser sur la roche et selon la minéralogie des carbonates, il y aura une coloration (Voir Tableau 2-5: Identification des carbonates en fonction des réactifs utilisés (CSD, 2015))

Annexe 8-8: Définition des sous-objectifs du projet MITACS

<i>Objectifs</i>	<i>Définition</i>
Géologie	
Minéralogie	Connaître la minéralogie, les associations minérales possibles
Lithologie	Identifier le type et la famille de roche
Identification élémentaire	Connaître la composition élémentaire, autant avoir la qualification qu'une quantification
Textures	Connaître la texture de la roche
Teneur en or	Avoir une estimation de l'or en présence
Minéralogie d'altération	Approcher le niveau d'altération de la roche, afin de préciser le modèle géologique
Métallurgie	
Tri du minerai	Obtenir de l'information sur les méthodes de tris de la roche (XRT, Mag, flottation...)
Détection des sulfures	Connaître la forme des sulfures afin d'optimiser le taux de récupération, minimiser les impacts...
Taille des grains	Essentiel pour la maille de libération, les étapes de broyage
Traitement du minerai	Avoir l'information relative au minerai afin de préparer au mieux le traitement du minerai (...)
Communion	Connaître les besoins de fragmentation des grains pour récupérer l'or
Modélisation	
Classification des données	Connaître l'arborescence des données
Types de données	Choix du format des données, le plus homogène possible pour transférer les données le plus facilement
Environnement	
Détermination du PGA /PN	Identification et quantification ndes carbonates et des sulfures afin de prédire le comportement hydrogéologique
Éléments délétères	Identification des éléments pouvant être problématiques, soit pour la métallurgie, soit pour l'environnement
Geotechnique	
RQD	Calcul du RQD de manière automatisée
Minéralogie d'altération	Connaître le taux d'altération de la roche, information sur la dureté du matériel
Informations sur les joints	Connaître les faiblesses dans la roche pouvant créer de l'instabilité
Dureté	S'informer sur la rhéologie de la roche
Fracturation / Structures	Connaître les faiblesses dans la roche pouvant créer de l'instabilité
Angles Alpha/Beta	Définition des sous-objectifs de l'information en 3 dimensions des structures en profondeurs

Annexe 8-9 : Zoom macroscopique de certains échantillons du site A (avec Axio zoom V16)



LR-11-03 Intermediate tuf
Pyrite cluster



LR-13-05 Felsic tuf
Quartz veine, chalcopyrite



LR-14-04 Felsic tuf
Felsic fragments



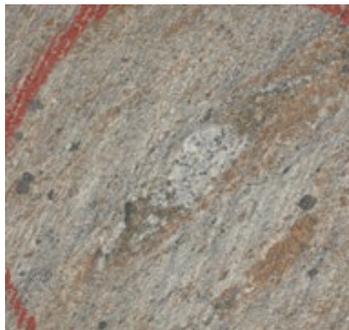
LR-17-03 Intermediate tuf
Ribbon chlorite



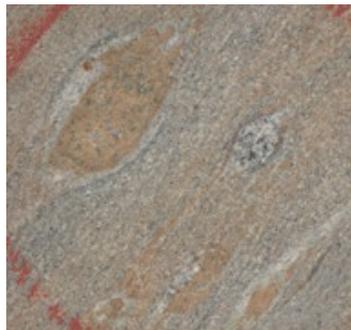
LR-20-04 Andesite (sulfide)
Pyrite – chalcopyrite – pyrrhotite



LR-23-04 Andesite (sulfide)
Amphiboles and pyrite



LR-29-03 Andesite
Felsic fragments



LR-31-03 Andesite
Felsic fragments with alteration



LR-33-02 Intermediate tuf
Ribbon fragments, chlorite

2000 μ m

Annexe 8-10: Minéraux identifiés par spectromètre minéral avant et après traitement numérique

Lithology	Spectrometer (before treatment)	AiSIRIS (after treatment)
Diorite	FeMgchlorite; phengite; dolomite; tourmaline; gypsum; VNIR - no match; kolinite; Mg-illite;	Chlorite; carbonate; white micas; kaolinite
Felsic tuf	Magnesite; biotite; tourmaline; gypsum; epidote; Mg-illite; FeMgchlorite; Fechlorite; muscovite; dolomite; clinozoisite; phlogopite; paragonite; VNIR - no match	Chlorite; white micas; carbonate; gypsum; kaolinite; water-silica
Andesite	Clinozoisite; FeMgchlorite; VNIR - no match; biotite; muscovite; tourmaline; dolomite; Fechlorite; SWIR - no match; magnesite; margarite; no match found; ferrihydrite; gypsum; smithsonite; brucite; strontianite; wavellite; calcite	Chlorite; white micas; carbonate; gypsum; kaolinite; biotite
Intermediate tuf	Muscovite; no match found; ferrihydrite; ankerite; margarite; k-illite; Mg-illite; epidote; clinozoisite; Fechlorite; gypsum; tourmaline; VNIR - no match; FeMgchlorite; biotite; calcite; dolomite; kaoliniteWX; smithsonite	White micas; biotite; chlorite; carbonate; gypsum; kaolinite
Basalt	Fechlorite; muscovite; clinozoisite; margarite; FeMgchlorite; magnesite; VNIR - no match	Chlorite; white micas; kaolinite; carbonate;
Andesite (sulfide)	Muscovite; margarite; Fechlorite; no match found; Ferrihydrite; FeMgchlorite; clinozoisite; gypsum; biotite; tourmaline; SWIR - no match; epidote; VNIR - no match; phengite	White micas; gypsum; chlorite; carbonate;

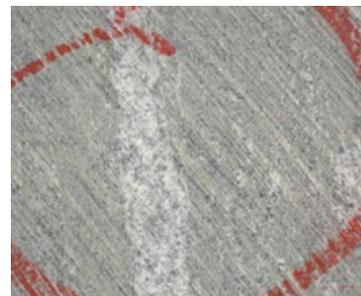
Annexe 8-11: Zoom macroscopique de certains échantillons du site B (avec Axio zoom V16)



RM-11-03-01-004 Andesite
Biotized and carbonate
pervasion



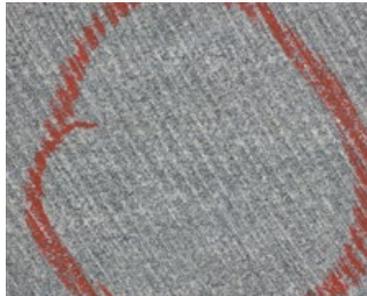
OB-08-135-02-003 Andesite
Quartz and carbonate with
biotite



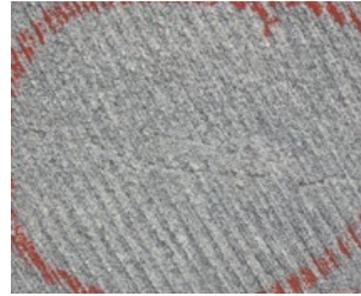
OB-16-20-02-003 Basalt
Chlorite and quartz vein



OB-17-22-01-001 Basalt
Sericite and biotite with
sulfides



OB-17-25-01-001 Greywacke
Carbonate and chlorite with
pyrite



OB-17-26-01-001 Greywacke
Chlorite and biotite with
pyrite



OB-95-49-01-001 Conglomerate
Biotite, chlorite and pyrite



OB-17-55-01-004 Conglomerate
Quartz carbonate vein

2000 μm