

UNIVERSITÉ DU QUEBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

ÉTUDE DE FAISABILITE SUR L'APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR LA
GESTION DES STÉRILES DE LA MINE CANADIAN MALARTIC

LOÏC BECANE

INSTITUT DE RECHERCHE EN MINES ET EN ENVIRONNEMENT

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCE APPLIQUÉES
(GÉNIE MINÉRAL)

OCTOBRE 2018

UNIVERSITÉ DU QUEBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ÉTUDE DE FAISABILITE SUR L'APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR LA GESTION
DES STÉRILES DE LA MINE CANADIAN MALARTIC

présenté par : BÉCANE Loïc,

en vue d'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. SIMON, Richard, Ph. D., président

Mme MORISSET, Caroline-Emmanuelle, Ph. D., membre

M. PLANTE, Benoît, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. GOÏTA, Kalifa, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

RÉSUMÉ

La télédétection est un ensemble de techniques qui consiste à obtenir de l'information d'un objet à distance pour en produire des images. Ses applications sont nombreuses et variées. Les premières applications de la télédétection furent d'abord dans le domaine militaire comme pour les avions espion américain U2. Les images prises étaient d'abord des images RGB (rouge, vert, bleu) puis le développement des capteurs spectraux et des satellites ont permis de multiplier les débouchés de la télédétection. Aujourd'hui elle est utilisée dans de nombreux domaines comme l'agriculture, la météo, le climat, l'urbanisme, la géologie, etc. Le but de cette étude est de déterminer la viabilité scientifique et technique d'une nouvelle méthode de gestion des stériles via l'apport de la télédétection pour la Mine Canadian Malartic. Ce projet est mené par une équipe pluridisciplinaire provenant de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), l'Université de Sherbrooke (UdeS), l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), Golder Associés et Mine Canadian-Malartic. Le projet est placé sous la direction conjointe de Kalifa Goïta pour l'Université de Sherbrooke, accompagné de Jérôme Théau et Mickaël Germain, et de Benoît Plante pour l'UQAT. Deux doctorants et une maîtrise participent au projet du côté de l'Université de Sherbrooke : Kévin Siebel, Etienne Clabaut et Javier Garcia sous la direction de Kalifa Goïta. Ce travail s'intègre au projet dans le cadre d'une maîtrise sous la direction de Benoît Plante.

L'objectif du projet vise à étudier la faisabilité scientifique et technique d'une nouvelle méthode de gestion des stériles via l'apport de la télédétection pour la Mine Canadian Malartic. Ce mémoire tente d'apporter des réponses sur certaines des problématiques du projet comme l'effet de la granulométrie, l'importance des particules les plus fines (de l'ordre de la centaine à dizaine de microns), ou la teneur en eau, sur la signature spectrale. Cette étude s'inscrit donc dans un projet plus large. A l'occasion de ce projet, des images hyperspectrales ont été prises sur le site en parallèle avec des acquisitions spectrales de terrain et une prise d'échantillons en vue d'effectuer des travaux et analyses de laboratoire.

Deux campagnes de terrains ont été effectuées pour échantillonner les roches dans la fosse ainsi que sur la halde à stériles. Les échantillons récupérés ont permis de caractériser les roches de la

Mine Canadian Malartic et commencer à appréhender les facteurs pouvant influencer la signature spectrale (granulométrie, chimie, minéralogie, etc.). Dans un second temps, des spectres de réflectance ont été acquis au laboratoire sur des échantillons de greywacke, de porphyre et sur des mélanges de minéraux purs, dont le but est de recréer un modèle simplifié de la minéralogie de la Mine Canadian Malartic pour déterminer le potentiel théorique et idéal de la méthode. Les échantillons récupérés lors des deux campagnes ont été préparés au laboratoire de l'UQAT. Les résultats montrent qu'il est possible de différencier le porphyre du greywacke avec un spectromètre de terrain en utilisant la méthode du *continuum removal*. Il n'a pas été possible de différencier le stérile du minerai, dans la mesure où la concentration en pyrite (où se trouve l'or en partie) est trop faible et très disséminée (<1 %). Les tests avec les minéraux purs ont cependant montré qu'il existe une voie pour commencer à quantifier la concentration en pyrite dans les mélanges en utilisant les intégrales des pics du Fe^{2+} correspondants à la pyrite, pour différentes concentrations de cette dernière. En effet il existe une relation logarithmique entre l'intégrale du pic Fe^{2+} et la concentration en pyrite dans l'échantillon. De plus, il existe une relation linéaire entre l'intégrale du pic C-O et la concentration en calcite. Les essais de teneur en eau montrent aussi une relation linéaire entre l'intégrale des pics d'absorption de l'eau et la teneur en eau de l'échantillon. Les résultats semblent aussi montrer que les particules fines peuvent, dans certains cas, masquer totalement la signature d'une roche sous-jacente, et ainsi potentiellement induire des erreurs de classification. Ces différents résultats montrent les déficits inhérents à la méthode de spectroscopie hyperspectrale en contexte minier et, plus particulièrement, dans le cas d'une fosse active. Cependant, les résultats montrent aussi que des pistes de caractérisation existent avec cette méthode et mériteraient d'être poursuivies pour tenter d'apporter des solutions plus opérationnelles à disposition de l'industrie minière.

Mots-clés

Téledétection, Drainage Minier Acide, Spectroscopie, Mine Canadian Malartic, Stériles Miniers

ABSTRACT

Remote sensing is a set of techniques that involves remotely obtaining information from an object to produce images. Its applications are wide and varied. The first applications of remote sensing was in the military field as for the american plane U2. The first's images were RGB (red, green, blue) and then the development of spectral sensors and satellites increased the opportunities for remote sensing. Today, those techniques are used in many fields such as agriculture, weather, climate, urbanism, geology, etc. The purpose of this study is to determine the scientific and technical viability of a new waste rock management method using remote sensing for the Canadian Malartic mine. A multidisciplinary team leads this project from the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), the Université de Sherbrooke (UdeS), the National Institute for Scientific Research (INRS), Golder Associate and Mine Canadian Malartic. The project is under the joint direction of Kalifa Goïta for UdeS and Benoît Plante for UQAT. The students Kévin Siebel, Etienne Clabaut (both PhDs) and Javier Garcia (MSc) took part in the project under the direction of Kalifa Goïta. This work take part of the project as a master's degree under the direction of Benoît Plante.

The objective of the project is to study the scientific and technical feasibility of a new method of waste rock management through remote sensing for the Canadian-Malartic mine. This study tries to resolve some potential issues related to this project such as the effect of grain size or the importance of fines particles (in the micron range). This study is therefore part of a larger project. In this project, some hyperspectral images were taken at the site in parallel with spectral field acquisitions and laboratory analysis.

The rock sampling has been carried out during two field campaigns, into the pit and on the waste rock piles. The collected rocks were used for characterization and to start to apprehend the factors influencing the spectral signatures (grain size, chemistry, mineralogy, etc.). Then, spectral measurement of greywacke and porphyry rocks were acquired at laboratories with mixtures of pure minerals produced with the aim of creating a simplified model of the Malartic mineralogy to determine the theoretical and ideal potential of the method. The samples collected were prepared at the UQAT laboratory for analysis. The results show that it is possible to differentiate greywacke vs porphyry with a field spectrometer using the *continuum removal* method. It was not possible to

differentiate the waste rock from the ore, as the concentration of pyrite (where the gold is partially enclosed) is too weak and highly disseminated (<1 %). Tests with pure minerals have shown that there is a way to start quantifying the pyrite concentration in the mixtures by studying different integrals of the peak corresponding to pyrite. Indeed, a logarithmic relation is shown between the peak integral of Fe^{2+} and the pyrite concentration in the sample. Furthermore, a linear relationship is shown between the peak integral of C-O and the calcite concentration. The moisture content tests also show a linear relationship between the integral of the water absorption peaks and the water content of the sample. The results also seem to show that fine particles can, in some cases, completely mask the signature of an underlying rock, and thus potentially induce misclassification. These different results show the inherent challenges of the hyperspectral spectroscopy method in the mining context and more particularly in the case of an active pit. However, the results also show that characterization tracks exist with this method and should be pursued to try to provide more operational solutions available to the mining industry.

Keywords

Remote sensing, Acid Mine Drainage, Spectroscopy, Canadian Malartic Mine, Waste rock

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon encadrant Benoît Plante pour m'avoir permis de prendre part à ce projet où j'ai beaucoup appris. C'était une expérience très enrichissante. J'ai beaucoup appris sur le travail en équipe et la gestion de projet.

Je remercie toutes les équipes de l'IRME et de l'URSTM pour leur accueil et leur bienveillance. Merci à Ann Gervais et Louise Labbé pour leur aide à mon arrivée et tout le long de ma maîtrise. Merci à Joël Beauregard, Tony Grondin, Annie Guimond-Rousson, Alain Perreault, Yvan Poirier, Mélinda Gervais et Patrick Bernèche pour leur aide et conseils pour les travaux de laboratoires. Merci aussi à Mathieu Villeneuve pour sa supervision et ses conseils techniques. Merci à Marc Paquin et Mohammed Edhabi pour leur expertise.

Je remercie nos partenaires industriels, Golder Associés, en la personne de Caroline-Emmanuelle Morisset et Mine Canadian Malartic en la personne de Christian Tessier et Sandra Pouliot.

Je remercie mes collègues de l'UdeS Kevin Siebel, Etienne Clabaut et Javier Garcia avec lesquels j'ai collaboré et travaillé sur le projet et notamment sur la mise en place de la deuxième campagne de terrain. Merci à Patrick Cliche pour son aide et ses conseils pour l'utilisation du *FieldSpec Pro 3*.

Je remercie enfin mes collègues et camarades de l'IRME avec lesquels j'ai partagé les bureaux (et les comptoirs de bars à l'occasion). Merci à Ibrahima Hane et Babacar Kandji de m'avoir accueilli à l'aéroport à mon arrivée. Merci à Mohammed Edahbi pour son aide et ses conseils précieux.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT	v
REMERCIEMENTS	vii
TABLE DES MATIÈRES	viii
CHAPITRE I - INTRODUCTION	1
CHAPITRE II – REVUE DE LITTÉRATURE	4
<u>2.1-Le Drainage Minier Acide (DMA)</u>	4
2.1.1-L'oxydation de la pyrite	4
2.1.2-Les minéraux secondaires et tertiaires	5
2.1.3-Détermination du PGA.....	7
2.1.3.a - Les tests statiques	8
2.1.3.b - Les essais cinétiques.....	10
<u>2.2-Canadian Malartic</u>	11
2.2.1-Contexte géologique.....	11
2.2.2-Minéralisation et altérations	14
<u>2.3-Téledétection</u>	17
2.3.1-Notion physique	17
2.3.2-Rôle de l'atmosphère.....	21
2.3.3-Les capteurs spectraux	22
2.3.3.a - Les capteurs aéroportés	23
2.3.3.b - Les satellites	25
2.3.3.c - Les spectromètres de terrain	27
2.3.4-Le traitement des images.....	28
2.3.4.a – Le prétraitement	28
2.3.4.b – L'amélioration	30
2.3.4.c – La classification	30
2.3.5-Application de la téledétection en géoscience.....	33
2.3.6-Cartographie géologique et d'exploration.....	36
2.3.7-Suivis environnemental	48
2.3.8-Exploitation	63
CHAPITRE III - MATÉRIEL ET MÉTHODES	68

<u>3.1-La Campagne préliminaire</u>	69
3.1.1-Acquisition des images.....	69
3.1.2- Échantillonnage des roches et des spectres	70
3.1.3- Préparation des échantillons	70
3.1.3.a – Séparation des classes	71
3.1.3.b – Récupération des fines et des granulats	72
3.1.3.c – Réduction des classes	73
<u>3.2-La Seconde campagne</u>	74
3.2.1-Acquisition des images.....	75
3.2.2- Échantillonnage des roches et des spectres	76
3.2.3- Préparation des blocs	77
3.2.4- Les assemblages de minéraux purs	78
<u>3.3- Techniques Analytiques</u>	79
3.3.1- Étude Granulométrique	79
3.3.1.a – WipFrag	79
3.3.1.b – Tamisage classique	80
3.3.1.c – Tamisage laser	81
3.3.2- Analyses Chimiques	82
3.3.2.a – La fluorescence X	82
3.3.2.b – ICP-AES	83
3.3.2.c – Analyses Soufre/Carbone	83
<i>Fonctionnement de l'appareil</i>	84
<i>Produits utilisés et étalons</i>	85
3.3.3- Étude minéralogiques	85
3.3.3.a – La Microscopie	86
<i>La microscopie optique</i>	86
<i>Le microscope électronique à balayage (MEB)</i>	86
<i>La diffraction des rayons X</i>	87
<i>La réconciliation des données minéralogiques</i>	87
3.3.4- Spectroscopie de réflectance	88
3.3.4.a – Fonctionnement de l'appareil	88
3.3.4.b – Protocole d'acquisition	90
<i>Campagne préliminaire</i>	90
<i>Deuxième campagne</i>	91

<i>ImageJ</i>	93
CHAPITRE IV - RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	99
<u>4.1- Résultats de la première campagne</u>	99
4.1.1- Étude granulométrique	99
4.1.1.a – Tamisage classique	99
4.1.1.b – Tamisage laser	100
4.1.2- Analyses S/C	100
4.1.3- Microscopie	102
4.1.4- Spectroscopie	102
4.1.4.a – La source lumineuse	103
<u>4.2- Résultats de la deuxième campagne</u>	108
4.2.1- La campagne de drone	108
4.2.2- Signatures spectrales des minéraux purs et des blocs	111
4.2.2.a – Signatures des blocs	111
4.2.2.b – Signatures des poudres	115
4.2.2.c – Signatures avec plaquette sous-jacente	119
4.2.3- Essai de teneur en eau	125
<u>4.3- Discussions</u>	126
CHAPITRE 5 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	128
5.1- Conclusions	128
5.2- Recommandations	130
RÉFÉRENCES	132
ANNEXES	136

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Diagramme de formation des minéraux secondaires. (Zabcic <i>et al.</i> , 2014).	7
Figure 2.2 : Diagramme de détermination du PGA en fonction du PNN ou bien du rapport PN/PA. (Bouzahzah <i>et al.</i> , 2013)	9
Figure 2.3 : Les différents systèmes statiques et cinétiques. (Villeneuve, 2004)	11
Figure 2.4 : Carte géologique simplifiée de la ceinture de roche verte d'Abitibi. (De Souza, 2015)	12
Figure 2.5 : La minéralisation de Canadian Malartic. (De Souza, 2015).	13
Figure 2.6 : Coupe NS dans la fosse. (De Souza, 2015).	15
Figure 2.7 : Le spectre électromagnétique. (Gopixgo.com)	18
Figure 2.8 : Courbes de réflectances classiques et capteurs spectraux associés. (Max Vidal).....	19
Figure 2.9 : Courbes de réflectances caractéristiques pour certaines phases minérales. (Zabcic <i>et al.</i> , 2014).....	19
Figure 2.10 : Spectre d'absorption atmosphérique. L'aire compris en haut de la courbe correspond à l'énergie absorbée. (Lillesand <i>et al.</i> , 2015).....	21
Figure 2.11 : Notion de cube spectrale. (Vane et Goetz, 1988)	23
Figure 2.12 : Le FieldSpec Pro 4. (ASD).....	27
Figure 2.13 : Les différentes techniques et algorithmes de traitements du signal. (Asadzadeh <i>et al.</i> , 2018)	32
Figure 2.14 : Les différents mélanges spectraux correspondants aux différentes lithologies, couvertures végétales et stériles. (Mars <i>et al.</i> , 2003)	34
Figure 2.15 : Cartographie spectrale des stériles	34
Figure 2.16 : Images ETM+ des granites de la région. La couleur magenta représente les zones d'altérations. (Shalaby <i>et al.</i> , 2010)	36
Figure 2.17 : Cartographie linéamentaire des granites. (Shalaby <i>et al.</i> , 2010)	37
Figure 2.18 : Les différentes étapes de calculs de la méthode ASA. (Pal <i>et al.</i> , 2011)	38
Figure 2.19 : Les différentes phases pures identifiées sur la scène étudiée. (Pal <i>et al.</i> , 2011)	39
Figure 2.20 : Cartographie minéralogique finale. (Pal <i>et al.</i> , 2011)	39

Figure 2.21 : Les différentes étapes de la classification par la méthode RCM. (Behnia <i>et al.</i> , 2012).....	41
Figure 2.22 : Cartes géologiques produite à l'aide de la méthode RCM. Image Landsat à gauche et SPOT à droite. (Behnia <i>et al.</i> , 2012)	41
Figure 2.23 : A gauche, les spectres purs déterminés à partir des mélanges spectraux de l'image. A droite, les quatre spectres de références ajoutées grâce aux connaissances du site. (Panteras <i>et al.</i> , 2013).....	43
Figure 2.24 : Cartographie minéralogique de l'île de Milos avec la méthode SAM. A gauche, carte avec uniquement les composantes pures déterminées par le logiciel. A droite, carte avec l'ajout des quatre spectres de références supplémentaire et caractéristique de la zone. (Panteras <i>et al.</i> , 2013).....	42
Figure 2.25 : Cartographie minéralogique de l'île de Milos avec la méthode MTMF. A gauche, carte avec uniquement les composantes pures	45
Figure 2.26 : Cartes d'altérations montrant en A une altération de type épithermale low-sulphidation au-dessus de 250 m et en B une altération argileuse avancé au-dessous de 250 m. (Ferrier <i>et al.</i> , 2016)	46
Figure 2.27 : Carte des altérations du district de Batu Hijau. (Neal <i>et al.</i> , 2018)	47
Figure 2.28 : Différents spectres de chlorites mis en relation avec le Mg#. (Neal <i>et al.</i> , 2018).....	48
Figure 2.29 : Spectres acquis sur les bords du bassin de rétention. (Riaza <i>et al.</i> , 2011)	50
Figure 2.30 : Spectres acquis sur le parc à résidus. (Riaza <i>et al.</i> , 2011)	50
Figure 2.31 : Spectres acquis sur des bancs de galets dans le cours d'eau. (Riaza <i>et al.</i> , 2011).....	51
Figure 2.32 : Images Hymap de la rivière Odiel. On distingue trois parties distinctes. La première dominée par les galets. La seconde par le sable. La dernière par la vase. (Riaza <i>et al.</i> , 2012)	52
Figure 2.33 : Les différentes compositions spectrales des 5 classes identifiées. (Riaza <i>et al.</i> , 2012).....	53
Figure 2.34 : Les variations spectrales des différentes classes en fonction de la portion du cours d'eau. (Riaza <i>et al.</i> , 2012)	54
Figure 2.35 : Les différentes signatures spectrales de l'eau le long du cours d'eau. Riaza <i>et al.</i> , 2012.....	56
Figure 2.36 : Relation entre l'intensité du pic d'absorption à 0,8 μm et la proportion de fer de l'échantillon. (Borisova <i>et al.</i> , 2013)	57

Figure 2.37 : Pourcentage de goethite pour différents assemblages minéralogiques. (Borisova <i>et al.</i> , 2013)	57
Figure 2.38 : Organigramme des étapes de traitement de l'image. (Quental <i>et al.</i> , 2013).....	58
Figure 2.39 : Les deux cartes des composantes pures produites avec les différents jeux de spectres. A ce stade les classes ne correspondent pas à des minéraux en particuliers. (Quental <i>et al.</i> , 2013)	59
Figure 2.40 : Carte minéralogiques finale provenant de la fusion des deux autres images. (Quental <i>et al.</i> , 2013))	59
Figure 2.41 : Site d'étude présentant et ses différentes composantes. (Buzzi <i>et al.</i> , 2014)	60
Figure 2.42 : Les différentes cartes produites pour les années 2005, 2008 et 2009. (Buzzi <i>et al.</i> , 2014).....	61
Figure 2.43 : Variation des signatures spectrales au sein du parc à boues de 2005 (A) à 2009 (C). Buzzi <i>et al.</i> , 2014	62
Figure 2.44 : Carte de pH du site minier de Sotiel basé sur les différents minéraux secondaires présents. (Zabcic <i>et al.</i> , 2014)	63
Figure 2.45 : Les différents pics d'absorption des carbonates dans le domaine du SWIR (A) et du TIR (B). (Fox <i>et al.</i> , 2016)	64
Figure 2.46 : Caractérisation des espèces de carbonates présents sur les deux sites. (Fox <i>et al.</i> , 2016)	65
Figure 2.47 : Fusion des données sur les carottes du site Mount Polley. (Fox <i>et al.</i> , 2016)	66
Figure 2.48 : Fusion des données sur les carottes du site Glen Lyell. (Fox <i>et al.</i> , 2016)	66
Figure 3.1 : Emplacement des échantillons prélevés lors de la campagne préliminaire. (Javier Garcia Serna, 2015)	68
Figure 3.2 : Schéma de la maille d'échantillonnage de 15 m	69
Figure 3.3 : Organigramme de préparation des chaudières	71
Figure 3.4 : Séparation des classes à l'aide de tamis et d'un baril	72
Figure 3.5 : Filtration des fines (A) et classification des granulats (B)	73
Figure 3.6 : Le concasseur à mâchoires à gauche et le broyeur à cône à droite	74

Figure 3.7 : La pulvérisette Fritsch (A), les échantillons finaux (B) et le matériel restant (C).	74
Figure 3.8 : Contraintes de vol du drone dans la fosse.	75
Figure 3.9 : Localisation détaillé des échantillons pris dans la fosse.	76
Figure 3.10 : De gauche à droite, le grand splitter, le splitter moyen et le petit splitter	77
Figure 3.11 : Courbe granulométrique des minéraux purs réduits en poudre	78
Figure 3.12 : Les différents mélanges de minéraux purs en fonction de %S et %C et le PNN associé	79
Figure 3.13 : La technique de fragmentation EDV (Edge Detection Variation). (Rossit, 2016).	80
Figure 3.14 : Exemple de courbe granulométrique cumulative.	81
Figure 3.15 : Schéma de fonctionnement de l'analyseur du Microtrac S3500. (URSTM).	81
Figure 3.16 : Mise en place des échantillons dans les placettes (A) et acquisition dans la chambre noire (B).	90
Figure 3.17 : Méthode d'acquisition des spectres avec la boîte de pétri	91
Figure 3.18 : Acquisition des poudres avec le bloc référence sous-jacent	93
Figure 3.19 : Montage pour l'acquisition des spectres du test d'humidité	94
Figure 3.20 : Présentation des différentes proportions de recouvrement du bloc référence par l'échantillon 16-ZFA-6 (B3). Proportion 1 (A), proportion 2 (B), proportion 3 (C).....	94
Figure 3.21 : Détourage de la zone d'étude pour l'échantillon 16-ZFA-6 (B3) P1.....	95
Figure 3.22 : Image binaire de l'échantillon 16-ZFA-6 (B3) P1.....	95
Figure 3.23 : Résultats obtenus avec ImageJ pour l'échantillon 16-ZFA-6 (B3) P1.....	96
Figure 3.24 : Procédure complète d'analyse avec ImageJ pour l'échantillon 16-ZFA-6 (B3) P2. Détourage (A), image binaire (B), résultats (C).....	96
Figure 3.25 : Procédure complète d'analyse avec ImageJ pour l'échantillon 16-ZFA-6 (B3) P3. Détourage (A), image binaire (B), résultats (C).....	97
Figure 3.26 : Procédure complète d'analyse avec ImageJ pour l'échantillon 16-ZFA-6 (B2) P2. Détourage (A), image binaire (B), résultats (C).....	97
Figure 4.1 : Courbe granulométrique des granulats des 10 chaudières.....	99
Figure 4.2 : Courbe granulométrique de l'échantillon 15-1500-2-A1	100

Figure 4.3 : Concentration en carbone des différentes fractions granulométriques pour les échantillons de la première campagne	101
Figure 4.4 : Concentration en soufre des différentes fractions granulométriques pour les échantillons de la première campagne	101
Figure 4.5 : Minéralogie des sulfures présent dans les échantillons de Canadian Malartic	102
Figure 4.6 : Comparaison de deux signatures du même échantillon avec le FieldSpec Pro 3.....	103
Figure 4.7 : Comparaison des spectres avant et après correction	104
Figure 4.8 : Effet de la correction pour les différents spectralon	105
Figure 4.9. : Dérive aléatoire de plusieurs signatures sur un même échantillon	106
Figure 4.10 : Signatures successifs d'un même échantillon après correction	106
Figure 4.11 : Signatures spectrales finales des échantillons de la première campagne	107
Figure 4.12 : Images RGB de la zone d'étude dans la fosse de Canadian Malartic	109
Figure 4.13 : Limites de l'image Pika II (Rouge) et la zone étudié (Bleu), à droite. (Javier Garcia, 2018)	109
Figure 4.14 : Images résultantes de la classification par SAM des images Pika de résolution spatiale originale et agrégées (10, 20, 30, 40, 60 et 120 cm). (Javier Garcia, 2018).....	110
Figure 4.15 : De haut en bas et de gauche à droite, Bande 10 des images Pika II de résolutions spatiales 10, 20, 30, 40, 60 et 120 cm (résolution spatiale originale et agrégées par la moyenne). (Javier Garcia, 2018)	111
Figure 4.16 : Images résultantes du démixage spectrale par MTMF des images Pika de résolution spatiale originale et agrégées (10, 20, 30, 40, 60 et 120 cm). (Javier Garcia, 2018)	111
Figure 4.17 : Le continuum removal. (Modifié d'après C.Verpoorter, 2009)	112
Figure 4.18 : Signatures spectrales brut des minéraux purs	113
Figure 4.19 : Signatures spectrales des minéraux purs après continuum removal	113
Figure 4.20 : Signatures spectrales des fractions du bloc 16-ZFA-6 (B2)	114
Figure 4.21 : Signatures spectrales des fractions du bloc 16-ZFA-6 (B3)	115
Figure 4.22 : Signatures spectrales de la série bas carbone	116
Figure 4.23 : Relation entre l'intégrale du pic du Fe ²⁺ et le %S pour la série bas carbone.....	117
Figure 4.24 : Signatures spectrales de la série haut carbone.	117

Figure 4.25 : Intégrale du pic du Fe ²⁺ et de C-O en fonction du %S et %	118
Figure 4.26 : Signatures spectrales de la série haut soufre	118
Figure 4.27 : Signatures spectrales de la série bas soufre	119
Figure 4.28 : Signature spectrale du bloc de greywacke de référence en poudre et en roche sous la forme d'une plaquette	119
Figure 4.29 : Signature spectrale du bloc 16-ZFA-6 B2 (greywacke) vs signature du bloc référence	120
Figure 4.30 : Signature spectrale du bloc 16-ZFA-6 B3 (porphyre) vs signature du bloc référence	121
Figure 4.31 : Résultat du pourcentage de recouvrement pour l'échantillon 16-ZFA-6 (B3) P2 avec ImageJ. Détourage (A), image binaire (B), résultats (C)	121
Figure 4.32 : Résultat du pourcentage de recouvrement pour l'échantillon 16-ZFA-6 (B3) P3 avec ImageJ. Détourage (A), image binaire (B), résultats (C)	122
Figure 4.33 : Signature spectrale de la poudre 1 %C, 8 %S vs signature du bloc référence	123
Figure 4.34 : Signature spectrale des poudres 3 %S, 1 %C et 1 %S, 8 %C vs signature du bloc référence	124
Figure 4.35 : Pics d'absorption de H ₂ O en fonction de la teneur en eau pour la poudre 1 %S, 8 %C	125
Figure 4.36 : Relation entre l'intégrale du pic de l'eau à 1900 nm et la teneur en eau	126

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Séquence paragenétique des lithologies principales et de l'hydrothermalisme associé. (Helt, 2012).	14
Tableau 2.2 : Tableau comparatif des modèles de gisements d'Au avec celui de la Mine Canadian Malartic. (Helt, 2012)	16
Tableau 2.3 : Comparaison des trois grands types de capteurs spectraux	23
Tableau 2.4 : Les différents capteurs aéroportés. (Lillesand <i>et al.</i> , 2015)	24
Tableau 2.5 : Les différents capteurs utilisés sur les satellites Landsat 1-7. (Lillesand <i>et al.</i> , 2015).....	24
Tableau 2.6 : Les différents capteurs utilisés sur les satellites SPOT 1-7. (Lillesand <i>et al.</i> , 2015) .	25
Tableau 2.7 : Caractéristique du satellite ASTER. (Lillesand <i>et al.</i> , 2015)	26
Tableau 3.1 : Etalons utilisé à l'UQAT pour la calibration du ELTRA CS-2000 Carbon/Sulfur Determinator. (Villeneuve, 2014)	85

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ASTM	American Society for Testing and Materials
AVIRIS	Airborne Visible – Infrared Imaging Spectrometer
BE	Binary Encoding
CH	Cellule Humides
DC	Dark Current
DMA	Drainage Minier Acide
DRX	X-Ray Diffraction
ETM	Enhanced Thematic Mapper
EDS	Energy Dispersive Spectrometry
EDV	Edge Detection Variation
ICP-AES	Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy
IPB	Iberian Pyrite Belt
IR	Infra-rouge
GPS	Global Positioning System
LLCZfZ	Larder Lake – Cadillac Fault Zone
MCA	Mini Cellules d'Altération
MEB	Microscope Électronique à Balayage
MTMF	Mixture – Tuned Matched Filtering
PA	Potentiel Acide
PGA	Potentiel de Génération d'Acide
PN	Potentiel Neutralisant

PNN	Potentiel Net de Neutralisation
RCM	Robust Classification Method
RGB	Red Green Blue
SAM	Spectral Angle Mapper
SDD	Silicon Drift Detector
SFF	Spectral Feature Fitting
SWIR	Short Wave Infrared
S/C	Soufre/Carbone
TSA	The Spectral Assistant
UAVs	Unmanned Aerial Vehicule
UdeS	Université de Sgerbrooke
UQAT	Université du Québec en Abitibi – Témiscamingue
URSTM	Unité de Recherche et de Service en Technologie Minérale
USGS	United-States Geological Survey
UV	Ultra-violet
VNIR	Visible and Near Infrared
WDS	Wavelength Dispersive Spectrometry
WV3	World View 3
WR	White Reference
WT%	Pourcentage poids

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 – Analyses DRX	136
Annexe 2 – Tableau préparatoire pour confectionner les assemblages de minéraux purs	140
Annexe 3 – Protocole de mesure des signatures spectrales	142
Annexe 4 – Protocole de mesure des intégrales de pics d'absorption	144

CHAPITRE 1 – INTRODUCTION

1.1 – Mise en contexte et problématique

Alors que l'essor de l'Humanité s'appuie sur l'utilisation et l'exploitation des ressources minérales depuis l'âge de pierre, et en particulier depuis l'âge du cuivre, il y a de ça près de 4000 ans avant notre ère, cela ne fait que quelques décennies que la recherche s'intéresse à leurs implications environnementales. La recherche en environnement minier est une science jeune et en plein essor. L'industrie des métaux a su accompagner et soutenir les grandes avancées comme la révolution industrielle ou numérique en développant l'exploitation de métaux aux propriétés de plus en plus variées et élargissant notre maîtrise de nouveaux éléments du tableau périodique. Ce développement s'est souvent fait au détriment de l'environnement. Aujourd'hui les mentalités et la législation évoluent, et une gestion intégrée de la dimension environnementale des projets miniers se développe. En effet, si l'exploitation minière est une activité indispensable au développement de nos sociétés et un business lucratif, elle génère aussi énormément de rejets polluants qui, s'ils ne sont pas gérés correctement, peuvent lourdement impacter l'environnement et nuire au développement de nouveaux projets miniers en dégradant l'acceptabilité sociale. L'acceptabilité sociale et la gestion environnementale sont des enjeux importants pour les sociétés minières ; si elles ne sont pas suffisamment prises en compte pour des questions de rentabilité, en bout de course leurs coûts dépassent ceux qu'il aurait fallu investir a priori. C'est dans ce contexte que ce projet prend part.

Aujourd'hui la science dispose d'outils récents susceptibles d'apporter de nouvelles solutions au secteur minier pour la gestion de ses rejets. La télédétection est un de ces outils. La télédétection est un ensemble de techniques qui consiste à obtenir de l'information d'un objet à distance pour en produire des images. Ses applications sont nombreuses et variées. Les premières applications de la télédétection furent d'abord dans le domaine militaire comme pour les avions espion américain U2. Les images prises étaient d'abord des images RGB (rouge, vert, bleu) puis le développement des capteurs spectraux et des satellites ont permis de multiplier les débouchés de la télédétection. Aujourd'hui, elle est utilisée dans de nombreux domaines comme l'agriculture, la météo, le climat, l'urbanisme, la géologie, etc. Les images produites peuvent être acquises par plusieurs types de capteurs : multispectraux, hyperspectraux, radar, thermique ou encore radiométrique. Ces capteurs

peuvent être montés à bord d'un satellite, d'un avion, ou d'un drone, par exemple. Il existe aussi des spectromètres de terrain utilisés en parallèle aux autres techniques afin de servir de référence de terrain. On peut donc acquérir des données à plusieurs échelles, chaque échelle ayant ses particularités et avantages. Bien que l'usage de la télédétection en géoscience, et notamment en exploration minière, soit une réalité depuis plusieurs années déjà, son utilisation en exploitation et en environnement n'en n'est qu'à ses débuts. Le principal défi de cette étude est d'explorer les opportunités offertes par la télédétection sur une opération minière et, notamment, son emploi dans une fosse active, celle de la mine Canadian Malartic.

1.2 – Objectifs de l'étude

Ce projet de maîtrise a pour cadre le projet FRQNT-Sherbrooke intitulé : Cartographie minéralogique par télédétection pour l'aide à l'optimisation de la gestion des roches stériles de la Mine Canadian Malartic. Plusieurs équipes universitaires ainsi que des partenaires industriels prennent part au projet. Ce projet met en collaboration des équipes de l'Université de Sherbrooke (UdeS), de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) et de l'UQAT pour les composantes académiques. Les partenaires industriels comptent Golder Associés en la personne de Caroline-Emmanuelle Morriset ainsi que la mine Canadian-Malartic avec Christian Tessier et Sandra Pouliot. L'équipe est constituée de Kevin Siebels et Etienne Clabaut (doctorants) et Javier Garcia (maîtrise) pour l'UdeS et de moi-même pour l'UQAT. Le projet est sous la direction de Kalifa Goïta pour l'UdeS et de Benoît Plante pour l'UQAT.

L'objectif du projet vise à étudier la faisabilité scientifique et technique d'une nouvelle méthode de gestion des stériles via l'apport de la télédétection pour la Mine Canadian Malartic. Des images multispectrales et hyperspectrales ont été prises sur le site en parallèle avec des acquisitions spectrales de terrain et une prise d'échantillons en vue d'effectuer des travaux et analyses de laboratoire. Pour ce travail, les objectifs étaient de caractériser les roches de la Mine Canadian Malartic et de connaître les différents paramètres qui influencent leurs signatures spectrales et quelles peuvent être les modalités et l'ampleur de ces paramètres. Les paramètres étudiés ont été la granulométrie des échantillons, leur chimie, leur minéralogie et leur teneur en eau. L'emphase a été mise sur l'impact de la granulométrie sur les spectres de réflectance et, en particulier, sur l'influence des particules les plus fines, à savoir celles inférieures à 2 mm et, notamment, celles de l'ordre du micron, sur les spectres obtenus. En effet, on sait qu'une granulométrie plus fine a

tendance à donner une meilleure résolution spectrale et ainsi des pics plus marqués. L'enjeu est alors de savoir quel est l'apport des fines vis-à-vis des spectres pris dans une fosse à ciel ouvert en activité. En effet, l'intégralité de la surface de la fosse est recouverte de particules fines dues aux sautages, aux excavations et au trafic des engins lourds. Il est donc important de connaître le poids des fines sur les images finales.

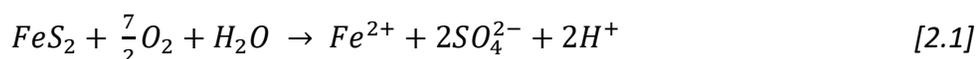
Le mémoire s'articulera de la façon suivante : tout d'abord, le chapitre I présentera la mise en contexte, la problématique, ainsi que l'objectif de l'étude. Le chapitre II présentera quant à lui la problématique du DMA et les moyens utilisés pour le caractériser et prédire son impact futur ; le contexte géologique de la Mine Canadian Malartic sera ensuite présenté, pour terminer avec un état de l'art sur la télédétection et les domaines d'application de la méthode ainsi que ses évolutions pour une meilleure compréhension des enjeux de la télédétection en géosciences. L'aspect matériel et méthode sera présenté dans le chapitre III, avec la description des travaux de terrain lors des deux campagnes ainsi que les travaux de laboratoire et les techniques analytiques utilisées. Les résultats pour les deux campagnes seront présentés et discutés au chapitre IV. Le Chapitre V conclura ce mémoire et des recommandations seront émises quant à la télédétection en contexte minier.

CHAPITRE 2 – REVUE DE LITTERATURE

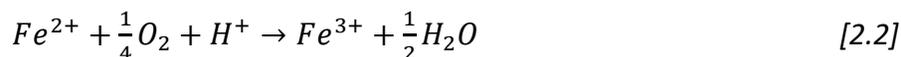
2.1 - Le Drainage Minier Acide (DMA)

2.1.1 - L'oxydation de la pyrite

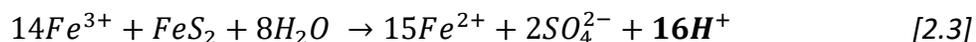
Les exploitations minières ont pour conséquences de mettre de grandes quantités de roches en contact avec l'air et l'eau. Ces dernières se retrouvent alors en déséquilibre chimique avec leur milieu. C'est ce déséquilibre qui est à la source du phénomène de drainage minier acide. L'oxydation de la pyrite est la plupart du temps utilisée comme modèle pour décrire ce phénomène (Équation 2.1). Les éléments de cette partie 2.1 seront principalement issus de Blowes *et al.*, 2015.



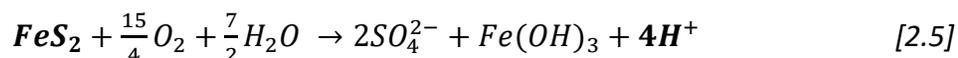
Lorsque de la pyrite se trouve en condition oxydante, ce qui est le cas dans les stériles miniers, l'association de l'eau et l'air permet son oxydation. Cela a pour conséquences la libération d'acidité, d'ions sulfates et de fer ferreux (Fe^{2+}). Le fer ferreux est ensuite oxydé en fer ferrique (Fe^{3+})(Équation 2.2).



Le fer ferrique ainsi produit peut à son tour servir d'oxydant pour oxyder la pyrite ou bien être hydrolysé pour précipiter de la ferrihydrite (Équation 2.3 et 2.4). Dans les deux cas, il y a production d'acidité.



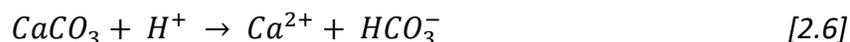
Si l'on fait un bilan de cette réaction, on constate que l'oxydation d'une mole de pyrite produit 4 moles de H^+ (Équation 2.5).



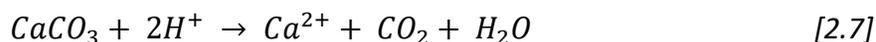
Pour des pH neutres, comme c'est le cas au début de l'oxydation, c'est le O_2 qui joue le rôle de l'oxydant. Au fur et à mesure que la pyrite s'oxyde le pH devient acide et c'est alors Fe^{3+} qui joue le rôle de l'oxydant. La cinétique d'oxydation du Fe^{3+} est plus rapide que celle du O_2 . Ce sont pour toutes ces raisons que l'oxydation de la pyrite et par extension le DMA est une réaction en chaîne qu'il est extrêmement difficile d'arrêter.

Les bactéries ont également une part importante dans la production du DMA. En effet, les bactéries chemolithotrophes se développent dans des environnements riches en sulfures et en oxygène. Ces bactéries, comme *A. ferroxidans*, sont capable d'utiliser le Fe^{2+} , S° ou bien des minéraux sulfurés pour leur activité métabolique. En l'absence de bactéries, le degré d'oxydation des sulfures se stabilise pour des $pH < 3,5$. Les produits de réactions enzymatiques favorisent l'oxydation du Fe^{2+} et S° en Fe^{3+} et sulfates. Les bactéries sont aussi capables d'oxyder de façon directe la pyrite en sulfate (Blowes et al., 2015).

Dans un contexte de DMA, l'encaissant, par sa nature alcaline, peut tamponner l'acidité produite et ainsi minimiser l'impact environnemental. Lorsque que l'on parle de potentiel de neutralisation, on utilise le plus souvent les carbonates, avec notamment la calcite, qui a un fort produit de solubilité dans les solutions acides et qui permet une neutralisation efficace tant qu'elle n'est pas limitante (Équation 2.6)



Pour des pH bas, une mole de calcite neutralise 2 protons (Équation 2.7).



Le produit de solubilité des carbonates diminue depuis la calcite vers la dolomite-ankérite et jusqu'à la sidérite. Lorsque les carbonates sont complètement dissous, ce sont les silicates d'alumines qui prennent le relais entre pH 4,5 et 4. Ce sont ensuite les oxy-hydroxydes de fer qui tamponnent le pH entre 3,5 et 2,5.

La production d'acidité n'est pas le seul problème lié au DMA. La dissolution de la pyrite et la plupart du temps d'autres sulfures tels que la chalcopyrite, l'arsénopyrite, la sphalérite ou la galène provoque la mise en solution de métaux de bases comme le Cu, As, Zn et Pb. Ces métaux se retrouvent dans les effluents miniers et participent activement à la pollution des milieux concernés.

2.1.2 - Les minéraux secondaires et tertiaires

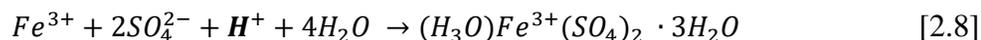
Comme cela a été vu, la dissolution des sulfures libère des métaux, lesquels sont susceptibles de reprécipiter en aval sous forme de nouvelles phases minérales. On parle alors de minéraux secondaires. De nouvelles phases minérales peuvent également précipiter par évaporation de l'effluent. On parle dans ce cas de minéraux tertiaires.

La couleur orange à rouge typique des DMA est due à la présence d'hydroxydes et oxy-hydroxydes de fer. La libération du fer provoque la précipitation de ferrihydrite $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ amorphe mais également de goethite $[\alpha\text{-FeOOH}]$. Selon la concentration en métaux dissous, d'autres oxydes peuvent aussi précipiter. En présence de Mn on constatera la présence d'oxydes de Mn comme la pyrolusite $[\text{MnO}_2]$. En présence d'arsénopyrite il se forme des arséniates secondaires comme la weilite $[\text{CaHAsO}_4]$. La galène formera pour sa part de l'anglésite $[\text{PbSO}_4]$. Certains sulfures reprécipitent comme la marcasite $[\text{FeS}_2]$ par pseudomorphose de la pyrrhotite lors de son oxydation ou la covellite $[\text{CuS}]$ par libération du Cu lors de l'altération de la chalcopyrite.

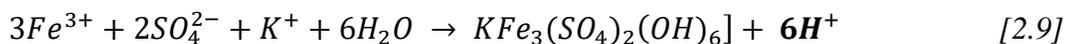
Il existe une myriade de minéraux, de sels ou de sulfates secondaires susceptibles d'être présents en aval de la zone d'oxydation. Des sels ferrifères divalents (Fe^{2+}) se formeront proche de la zone d'oxydation et seront progressivement de plus en plus trivalents vers l'aval (Nordstrom *et al.*, 2015). Par exemple on trouvera d'abord de la mélantérite $[\text{Fe}^{2+}\text{SO}_4]$ puis de la copiapite $[\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_4^{3+}(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}]$ et enfin de la fibroferrite $[\text{Fe}^{3+}(\text{SO}_4)(\text{OH}) \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$.

Certaines phases sont récurrentes comme le super-groupe de la jarosite $[\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$ ou la schwertmannite $[\text{Fe}_{16}^{3+}(\text{OH}, \text{SO}_4)_{12-13}\text{O}_{16} \cdot 10 - 12\text{H}_2\text{O}]$ qui est l'hydroxysulfate de fer le plus commun pour des pH entre 5,5 et 2,5 (Nordstrom *et al.*, 2015).

Les minéraux secondaires ont un rôle important sur l'évolution du pH et la concentration des métaux dans l'effluent. La cristallisation de certaines phases capte de l'acidité et des métaux tandis que d'autre participent à la baisse du pH. La cristallisation du rhomboclase, par exemple, permet de stocker de l'acidité (Équation 2.8).



Après une crue précédant une période sèche, le rhomboclase peut être remis en solution et ainsi reproduire de l'acidité. La cristallisation de la jarosite en revanche produit de l'acidité (Équation 2.9).



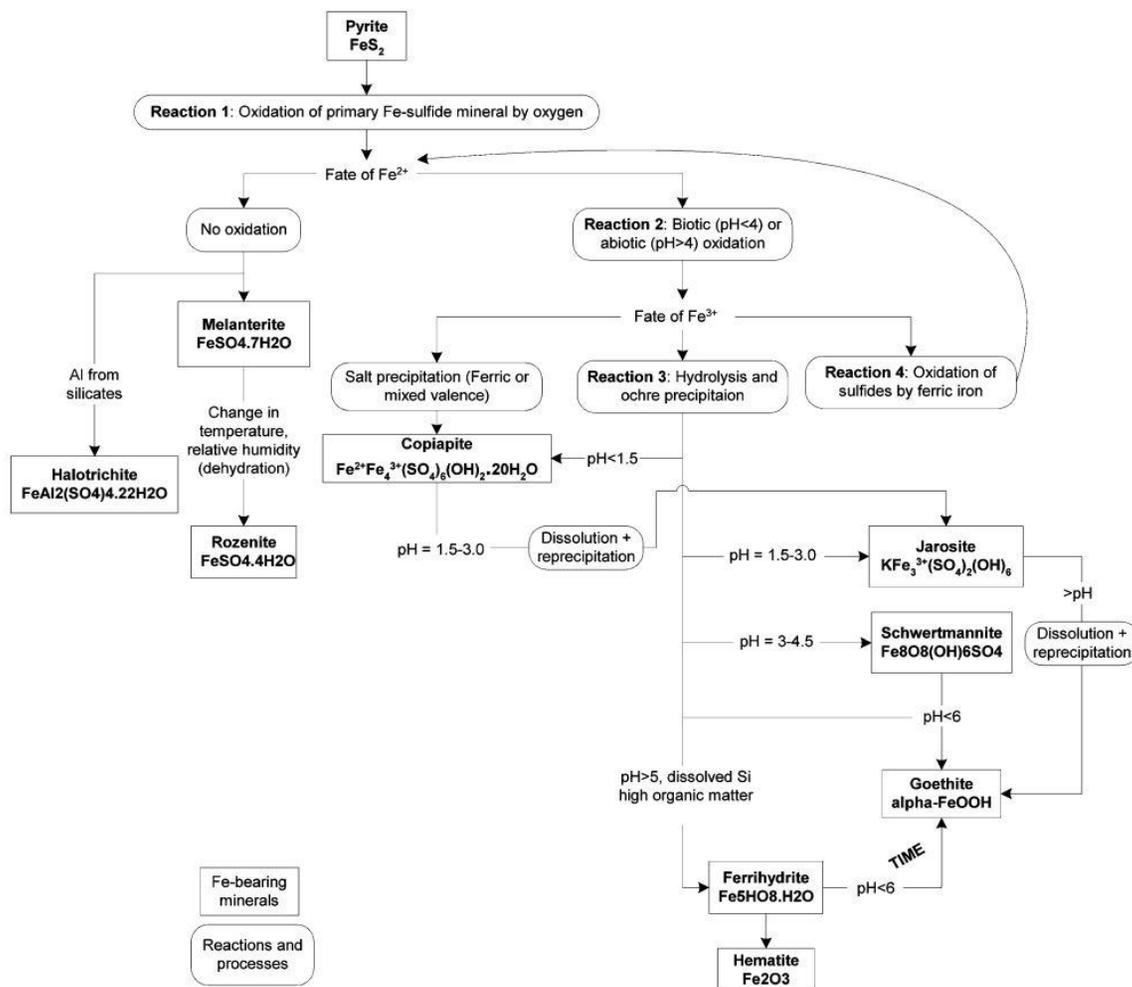


Figure 2.1 : Diagramme de formation des minéraux secondaires. (Zabcic *et al.*, 2014)

La présence des différents minéraux secondaires peut aussi permettre de contraindre le pH (Nordstrom *et al.*, 2015). La ferrihydrite domine à des pH > 5,5. La schwertmannite précipiterait entre pH 5,5 et 2,5. Enfin pour des pH < 2,5 la jarosite serait dominante. La précipitation des minéraux secondaires est un phénomène complexe et fonction de nombreux facteurs (Figure 2.1) (Zabcic *et al.*, 2014).

2.1.3 - Détermination du Potentiel de Génération d'Acide (PGA)

Compte tenu des éléments précités, il est nécessaire de devoir déterminer le potentiel de génération d'acide. Dès lors qu'une compagnie souhaite développer un permis d'exploration pour y exploiter une mine, elle doit prévoir un volet environnemental dans son étude de préfaisabilité. Le PGA peut être déterminé pour du minerai, du stérile ou bien des résidus de concentrateur. On calcule d'abord le potentiel d'acidité (PA) que l'on met en relation avec le potentiel de neutralisation (PN). La

comparaison du PA et du PN permet de déterminer si les échantillons considérés sont susceptibles de produire du DMA.

2.1.3.a - Les essais statiques

Les essais statiques permettent de caractériser la susceptibilité d'un échantillon de roche ou de sol à produire de l'acidité en conditions supergènes. Ces essais apportent une information au temps 't', d'où leur qualification de 'statique'. Ils n'informent en aucun cas sur l'évolution de l'altération de l'échantillon ou la nature des minéraux secondaires. L'essai statique est un premier aperçu du comportement de l'échantillon face au lessivage. Il est bon marché et simple à mettre en place. De ce fait, il est utilisé en premier recours et peut être effectué sur de nombreux échantillons. En contrepartie, il y a une grande plage d'incertitude sur les mesures. C'est pourquoi il arrive souvent que les résultats tombent dans le domaine d'incertitude. Dans ce cas, il est nécessaire de poursuivre avec des méthodes plus poussées comme les essais cinétiques. Si, à ce stade, ils sont considérés comme non générateurs, les investigations s'arrêtent là. Évidemment, s'ils sont déjà considérés à ce stade comme générateurs, il est impératif de poursuivre l'investigation pour savoir en quelle mesure.

Pour ce qui est de l'industrie minière les bases du concept ont été posées, entre autres, par Sobek *et al.*, en 1978 et remaniées ensuite par de nombreux auteurs comme Lawrence et Wang en 1997 ou Bouzahzah en 2015. C'est la version modifiée qui est largement utilisée. Il s'agissait tout d'abord de faire réagir une fraction de l'échantillon avec de l'HCl et d'observer le « *fizz rating* » c'est-à-dire l'effervescence produite. C'est ce *fizz rating* qui permettait de déterminer la concentration et le volume d'HCl nécessaire pour la digestion des minéraux neutralisant et le PN. Cette méthode avait tendance à surestimer le PN lorsque des carbonates de fer et de manganèse étaient présents. En effet, l'oxydation du fer et l'hydrolyse du manganèse produisent de l'acidité. De plus, « l'effervescence » est une variable très subjective et varie selon les opérateurs. La détermination du PA se faisait en tenant compte du soufre total et dépend aussi du *fizz rating*. Aujourd'hui seul le soufre lié au sulfure est pris en compte et le *fizz rating* est déterminé par le calcul en fonction de la minéralogie précise de l'échantillon.

Il existe aussi des essais statiques minéralogiques comme les tests de Paktunc (Paktunc *et al.*, 1999, 2001). Ce type de test considère le PN et PA en fonction de la somme des contributions individuelles de chaque minéral produisant de l'acidité ou susceptibles de la neutraliser et de leur

répartition, disponibilité et cinétique de dissolution. La quantité et la distribution des différents minéraux sont analysées pour déterminer la cinétique de production d'acidité dans un premier temps. Dans un second temps, la cinétique de neutralisation est déterminée afin de savoir si elle permettra ou non la neutralisation. Par exemple, si les sulfures sont représentés par de la pyrrhotite, la production d'acidité va être très rapide. Si le minéral neutralisant est de la dolomite sa dissolution peut être trop lente pour permettre la neutralisation.

Le potentiel neutralisant net (PNN) obtenu par différence du PN et du PA détermine la susceptibilité de l'échantillon à produire de l'acidité. Le PN est assimilé à la quantité de calcite par tonne nécessaire à la neutralisation :

- Si le PNN est supérieur à $+ 20 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$, l'échantillon est considéré comme non générateur d'acidité.
- Si le PNN est inférieur à $- 20 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$, l'échantillon est considéré comme générateur d'acidité.
- Si le PNN est compris entre -20 et $+ 20 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$, l'échantillon est dans la zone d'incertitude.

On peut aussi considérer le ratio PN/PA pour déterminer le PGA. (Figure 2.2).

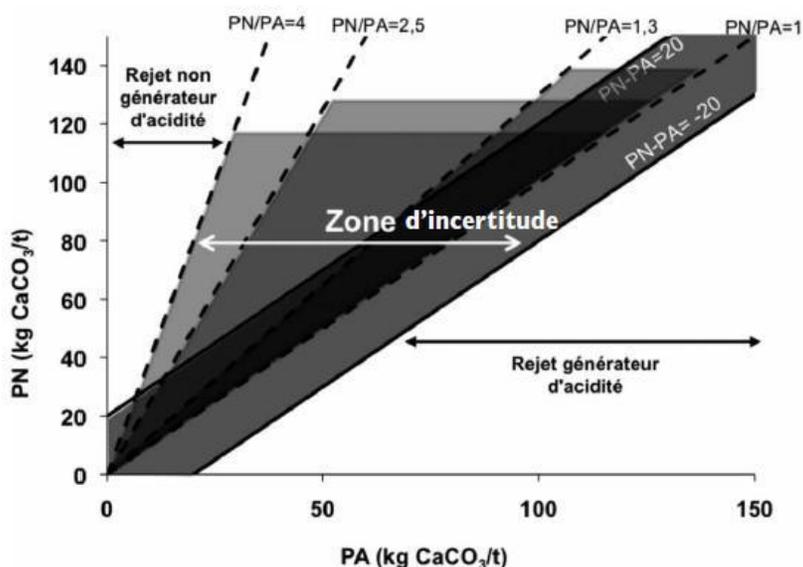


Figure 2.2 : Diagramme de détermination du PGA en fonction du PNN ou bien du rapport PN/PA. (Bouzahzah *et al.*, 2013)

2.1.3.b - Les essais cinétiques

Ils interviennent suite aux essais statiques indiquant un potentiel de DMA. Si les résultats se trouvaient dans la zone d'incertitude, il est également nécessaire de poursuivre avec des essais cinétiques pour comprendre le phénomène. Il s'agit donc d'exposer les échantillons à des cycles successifs de lessivage et de mesurer l'évolution des concentrations en métaux et de l'acidité. Ils permettent de préciser le potentiel générateur ainsi que la présence éventuelle de minéraux secondaires lors du démontage du dispositif. Ils simulent une altération naturelle plus ou moins accélérée en conditions contrôlées. À la différence des essais statiques, ils apportent une information sur l'évolution de la qualité des effluents.

Il existe plusieurs dispositifs. Les cellules humides (CH) correspondent à un protocole normé par l'ASTM (*American Society for Testing and Materials, ASTM D 5744-96,1998; 2007*). Il a été conçu pour être réalisé dans des conditions bien définies et fournir des résultats reproductibles. La quantité de matériel, les cycles et la granulométrie sont fixés. Environ 1kg d'échantillon est rincé par 500 ml ou 1 L d'eau déionisée par semaine. La granulométrie est tel quelle pour les résidus et < 6,3 mm pour maximiser la surface spécifique. Les cycles commencent par un rinçage de l'échantillon avec l'eau déionisée pendant 3 à 4h. Il se poursuit avec 3 jours secs et 3 jours humides entre 90 et 100 %. Le débit d'air est de 1 à 10 L/min. Au laboratoire de l'URSTM, le système a été automatisé par Bouzahzah en 2013. De l'air humide est envoyé en continu pour maintenir un degré optimal d'humidité entre 40 et 60 %. Ce dispositif permet de tester le pire scénario possible avec des concentrations en métaux et une acidité surestimé par rapport à la réalité. Il permet de comparer le comportement de différents échantillons quel que soit le contexte. Les mini-cellules d'altération (MCA) sont une version réduite des CH. Elles sont plus faciles à mettre en place et moins onéreuses et nécessitent moins de matériel (67 g), (Bouzahzah *et al.*, 2014). Enfin il existe les colonnes qui fonctionnent sur le même principe. Elles peuvent être de différents degrés de complexité. Elles ont été conçues pour tester des scénarios de réhabilitation mais peuvent être utiles pour étudier tout autre phénomène ou contexte particulier (Demers *et al.*, 2008). Elles sont par exemple constituées de résidus surmontés d'un prototype de recouvrement multi-couches pour en caractériser l'efficacité (Bussière *et al.*, 2003). L'effluent produit au cours de l'expérience, qui peut durer plusieurs années, est analysé régulièrement. Plusieurs paramètres peuvent ainsi être suivis. Il peut s'agir du pH, Eh, métaux dissous, acidité et alcalinité. Un réservoir d'eau est connecté à la base de

la colonne à l'aide d'un tube pour simuler la présence d'une nappe. La hauteur de ce réservoir par rapport à la base de la colonne permet de faire varier le phénomène de succion de la nappe. Plus la nappe est basse, plus la succion sera importante. Contrairement à leurs homologues elles permettent d'obtenir des résultats s'approchant des conditions réelles. La fiabilité et la répétabilité des données qu'elles procurent ont été démontrées (Demers *et al.*, 2010). Il faut cependant être rigoureux dans leur mise en place et avoir une méthodologie solide. Si l'on veut néanmoins se rapprocher encore plus de la réalité, il est aussi possible de faire des parcelles de terrain. Ce sont des modèles réduits, de halles à stériles par exemple. Ce sont des dispositifs naturellement bien plus coûteux et complexes à mettre en place et équipés de nombreux dispositifs de suivis. Pour qu'elles soient d'un réel intérêt il faut les maintenir sur plusieurs années et a fortiori le plus longtemps possible. (Figure 2.3)

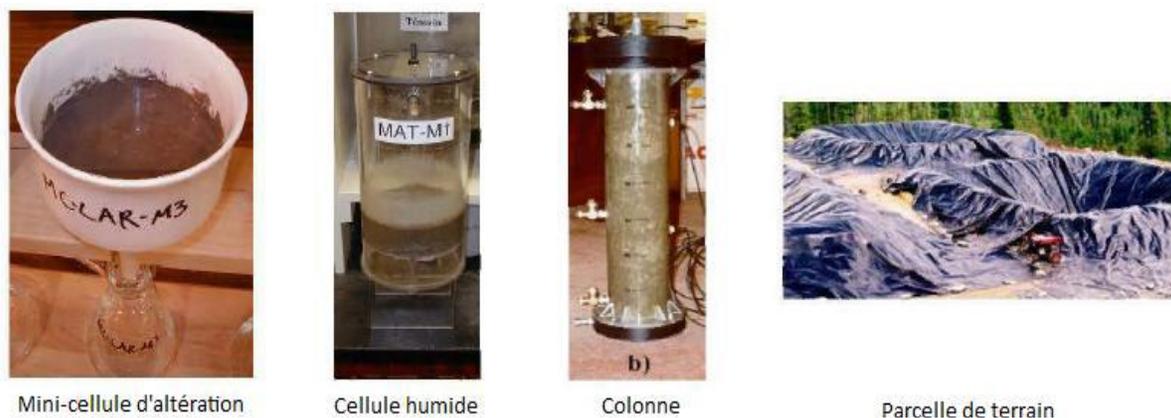


Figure 2.3 : Les différents systèmes statiques et cinétiques. (Villeneuve, 2004)

2.2 – Mine Canadian Malartic

2.2.1 - Contexte géologique

Les informations de cette partie sont essentiellement tirées de De Souza, 2015. Le district aurifère de Malartic se situe en Abitibi dans la Province du Supérieur au Québec (Figure 2.4). La propriété est localisée immédiatement au sud de la faille Cadillac-Larder Lake séparant le groupe du Pontiac au sud et la ceinture de roche verte de l'Abitibi au nord. Cette faille ductile-cassante est kilométrique, de profondeur crustale et sub-verticale. On retrouve le groupe du Piché au sein du couloir de faille. Au nord de la faille, les terrains sont métavolcaniques et métasédimentaires et au sud métasédimentaires. Au sein de la faille, on trouve des métavolcanites ultramafiques à felsique et d'affinité tholéitiques à calco-alcalins (Helt, 2012). La région a vu une activité volcanique entre

2747 et 2698 Ma suivie entre 2686 et 2677 Ma par des intrusions de diorite à tonalite-trondjémite. Cet épisode est accompagné d'une phase de déformation D1 compressive NW-SE. Elle a pour conséquence la production de matériel sédimentaire et la mise en place de plutons syntectoniques calco-alcalins et sub-alcalins à alcalins entre 2692 et 2675 Ma. La déformation D2 est compressive NS et évolue en transpression dextre le long du couloir de faille. Une dernière phase de déformation D3 produit une S3 NW. Chaque phase de déformation est accompagnée par des veines (V1, V2 et V3). Seules les veines V1, et plus particulièrement V2, sont associées à la minéralisation.

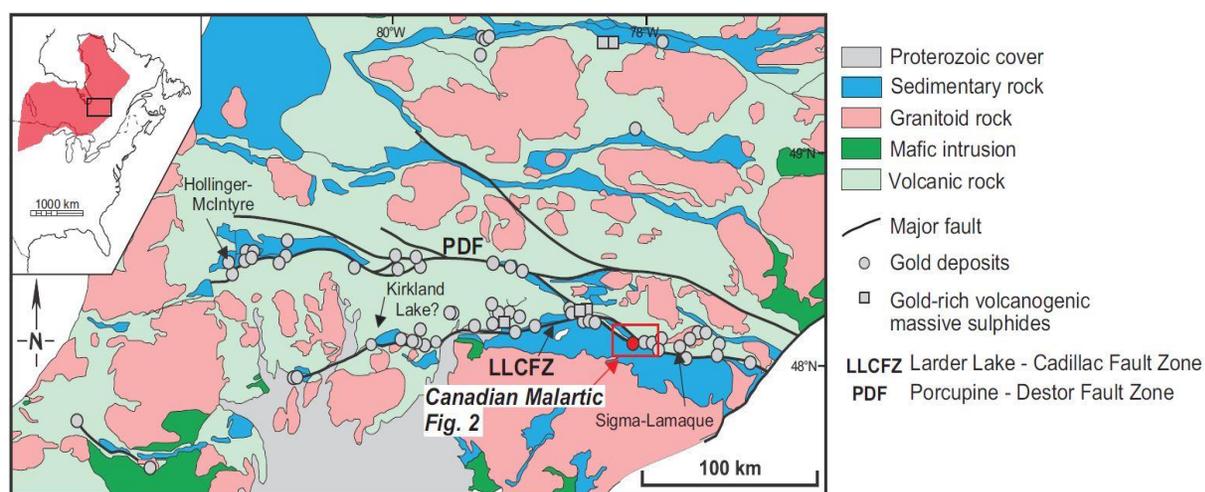


Figure 2.4 : Carte géologique simplifiée de la ceinture de roche verte d'Abitibi. (De Souza, 2015)

La minéralisation est à faible teneur et fort tonnage (*10,8 Moz Au, in 314,2 Mt @ 1,07 g/t Au; Agnico Eagle, 2014*). Elle se situe immédiatement au sud de la faille Cadillac-Larder Lake (LLCFZ), le long de la faille secondaire Sladen et partiellement dans le groupe du Piché avec la zone Barnat (Figure 2.5). Au nord de la LLCFZ on retrouve la sous-province de l'Abitibi représentée notamment par des roches ultramafiques, volcaniques et basaltiques. La minéralisation principale se trouve au sud au sein de la sous-province de Pontiac dans des séries de grauweekes turbiditiques et d'argilites parsemées d'intrusifs. La mine à ciel ouvert de Canadian-Malartic ouverte en 2011 fait suite à l'exploitation de la mine souterraine de 1935 à 1965 (Wares, 2013). Ce gisement a été mis au jour en 2004 à l'aide de la base de données SIGEOM du gouvernement Québécois. Le modèle de porphyre aurifère était la cible d'exploration malgré la croyance générale qui était que ce genre de gisement était hautement improbable dans la région. C'est l'exploitation de la base de données avec l'application d'un nouveau modèle et quelques forages préliminaires qui a permis de redécouvrir ce dépôt. Le gisement est invisible aux levés magnétiques,

électromagnétiques, de polarisation au sol ou à l'aide de géophysique aéroportée. Seul le halo d'altération potassique aurait pu être identifié. Cela n'a pas été possible à cause d'anciens parcs à résidus riches en potassium qui masquaient le signal.

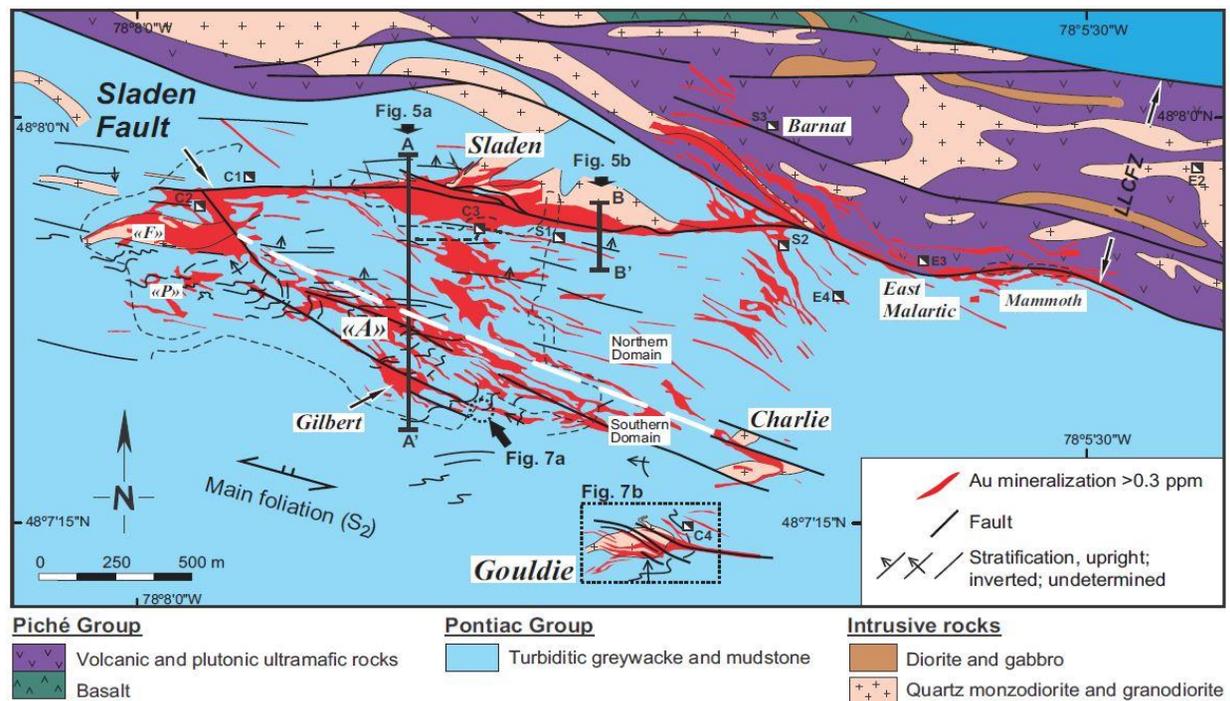


Figure 2.5 : La minéralisation de Canadian Malartic. (De Souza, 2015)

Tableau 2.1 : Séquence paragénétique des lithologies principale et de l'hydrothermalisme associé.
(Helt, 2012)

Mineral	Sedimentary Assemblage	Igneous Assemblage	Hydrothermal Assemblage		
			Pre-Ore	Ore	Post-Ore
			V1	V1&V2	V3
Plagioclase	██████████	██████████	██████████	██████████	
Quartz	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████
K-Feldspar	██████████	██████████	██████████	██████████	
Biotite	██████████	██████████	██████████	██████████	
Muscovite/sericite			██████████	██████████	
Calcite			██████████	██████████	
Pyrite			██████████	██████████	
Chlorite				██████████	
Magnetite	██████████	██████████			
Amphibole	██████████	██████████			
Monazite	██████████	██████████			
Apatite	██████████	██████████			
Zircon	██████████	██████████			
Allanite	██████████	██████████			
Epidote					██████████
Ankerite			██████████		
Hematite			██████████		
Pyrrhotite			██████████		
Ilmenite			██████████		
Barite			██████████		
Scheelite			██████████		
Titanite			██████████		
Chalcopyrite			██████████		
Galena			██████████		
Molybdenite			██████████		
Sphalerite			██████████		
Rutile			██████████		
Native Gold			██████████		
Electrum			██████████		
Calaverite				██████████	
Hessite				██████████	
Petzite				██████████	
Altaite				██████████	
Tellurobismuthite				██████████	

La région est marquée par un gradient métamorphique du nord vers le sud. On trouve des assemblages à biotite-chlorite le long de la bordure sud de la LLCFZ qui évoluent vers des assemblages à grenat-staurotide 2 km plus au sud. Au sein du gisement, la paragenèse métamorphique est à biotite, muscovite, oligoclase, chlorite, épidote. Sont présent en proportions variables : pyrite, pyrrhotite, ilménite, magnétite, monazite et apatite (Tableau 2.1).

2.2.2 - Minéralisation et altération

La fosse recoupe principalement les roches du Pontiac ($\approx 70\%$) ainsi qu'une monzodiorite quartzifère ($\approx 30\%$). Les datations entreprises sur l'intrusif ont montré des âges Témiscamingue (2678-2676 Ma) caractéristiques de nombreuses minéralisations Au-Cu dans la région (De Souza, 2015). En revanche, à la Mine Canadian Malartic, on observe un manque caractéristique de Cu, même par rapport à l'encaissant non altéré (Tableau 2.2). En effet, l'or est présent en grains libres $< 20\ \mu\text{m}$ et en inclusion dans la pyrite. La pyrite se distribue en *stockwerk*, en veines et largement disséminée dans les faciès altérés (Figure 2.6).

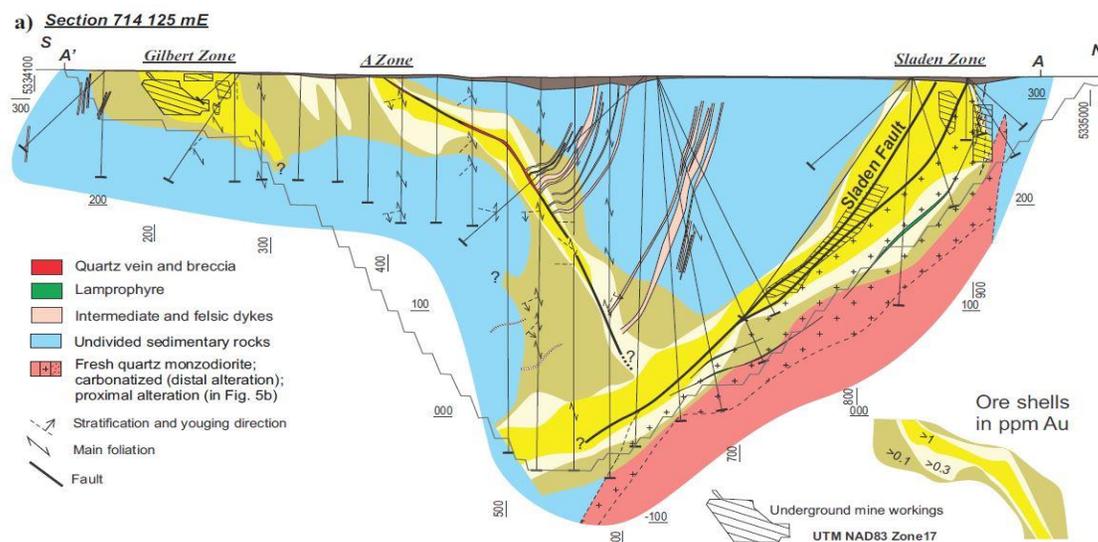


Figure 2.6 : Coupe NS dans la fosse. (De Souza, 2015)

Des études isotopiques entreprises sur l'oxygène et l'hydrogène permettent de soutenir deux hypothèses quant à l'origine du fluide minéralisateur. Il est interprété comme étant d'origine magmatique (Helt *et al.*, 2014) aussi bien que métamorphique (Beaudoin and Raskevicius, 2014). De la molybdénite contenue dans les sédiments minéralisés a permis de dater la minéralisation principale par Re-Os à 2664 Ma. Cela impliquerait un événement minéralisateur post-intrusion et vraisemblablement métamorphique. Il semble donc qu'il y ait eu superposition d'un premier événement magmatique pourvoyeur d'une minéralisation précoce à 2677 Ma, suivi de la phase principale métamorphique à 2664 Ma apportant l'essentiel de l'Au. Les veines V2, correspondantes la phase de déformations D2, sont contemporaines de la phase principale de minéralisation. Elles sont principalement composées de quartz avec, en proportions mineures pyrite, albite, calcite, galène, molybdénite, biotite et chlorite. On retrouve ces veines dans toutes les roches présentes sur le site.

On note deux types d'altérations principales : une carbonatation (calcite, dolomite ferreuse ± ankérite) et la sulfuration des sédiments et de l'intrusif. On trouve également une altération à biotite et feldspaths K. importante. L'albitisation est présente dans les sédiments et une silicification de l'intrusif (suite page 15).

Tableau 2.2 : Tableau comparatif des modèles de gisements d'Au avec celui de Canadian Malartic. (Helt, 2012)

	Canadian Malartic	Porphyry-Au	Non-Porphyry Type Intrusion-Related-Au Oxidized	Reduced	Orogenic-Au
Metal signature	Au-Te-Ag-Mo-Bi-Sb-(W-Pb); depletion in Cu	Au ± Cu-Ag ± Bi-Te	Au ± As-Te-Mo ± Bi	Au ± Bi-W-As-Mo-Te ± Sb and low concentrations of base metals	Au-Ag ± As-Bi-Hg-Sb-Te-W
Alteration	Pervasive biotite-K-feldspar; biotite-K-feldspar haloes around quartz-pyrite-carbonate veinlets	Pervasive biotite-K-feldspar; biotite-K-feldspar haloes around quartz-pyrite veinlets; common sericite-pyrite overprinting; distal propylitic alteration	Pervasive biotite-K-feldspar; sericite- carbonate; albite surrounding variably developed stockworks of quartz- carbonate ± K-feldspar veinlets	Pervasive albite and/or K-feldspar alteration; weak, fracture-controlled sericite-carbonate-feldspar haloes on quartz veinlets	Albite-Fe-Mg carbonate vein haloes
Ore mineral association	Pyrite + minor to trace tellurides and hematite	Chalcopyrite, bornite, molybdenite	Pyrite, arsenopyrite + trace hematite, tellurides, molybdenite, magnetite	Arsenopyrite, pyrrhotite, pyrite; lacks magnetite or hematite	Pyrite, pyrrhotite, trace scheelite
Fluids	Oxidizing, CO ₂ -H ₂ O-bearing	Oxidizing, H ₂ O-NaCl-bearing	Oxidizing, CO ₂ -H ₂ O-bearing	Reducing, CO ₂ -H ₂ O ± CH ₄ bearing,	Reducing, H ₂ O-CO ₂ ± CH ₄ ± N ₂ bearing
Intrusion	Sub-alkalic to alkalic, felsic to intermediate, porphyritic, magnetite series	Calc-alkalic, intermediate, porphyritic, magnetite series	Sub-alkalic to alkalic, felsic to intermediate, porphyritic, magnetite series	Sub-alkalic to alkalic, felsic to intermediate; typically ilmenite series	Spatial association with granitoids of a variety of compositions
Timing	Mineralization broadly contemporaneous with intrusion? – overprinted by regional deformation	Mineralization genetically related to intrusion	Mineralization broadly contemporaneous with intrusion – overprinted by regional deformation	Mineralization coeval (± 2 Ma) with intrusion – mineralization post- regional peak metamorphism	Mineralization syn-kinematic with at least one stage of penetrative deformation of the country rocks
Crustal level of emplacement	Unknown	0.5 to 2 km	Unknown	4 to 6 km	5 to 10 km
Geologic Setting	Accretionary orogen (Abitibi Greenstone Belt), at the boundary between contrasting lithological domains	Continental- and island-arc settings; subduction-related but commonly associated with extensional environments	Accretionary orogen, commonly at or near the boundaries between contrasting lithological domains	Back-arc, foreland fold-thrust, collisional, post-collisional proposed but accretionary to collisional, subduction-related favored	Deformed metamorphic terranes/greenstone belts; spatially associated with large scale compressional to transpressional structures in accretionary and collisional orogens
P-T Conditions	> 3 kbar?, ~475°C	0.3-1 kbar, 300-700°C	Unknown	0.5-1.5 kbar, 200-400°C	1-6 kbar, 250-700°C
Example	Canadian Malartic	Boddington	Holt-McDermott, Beattie, Douay	Fort Knox, Donlin Creek, Kidston	Sigma-Lamaque, Siscoe, Golden Mile
References	This study	Sinclair, 2007; Seedorf et al., 2005; Fraser 1993 ; Mason and Melnik, 1982; Roth et al., 1982; Sillitoe, 1979	This study; Robert, 2001; Cameron and Hattori, 1987	Lang and Baker, 2001; Hart and Goldfarb, 2005; Thompson and Newberry, 2000; Thompson et al., 1999; Goldfarb et al, 2000	Goldfarb et al., 2001; Groves et al., 1998; Groves et al., 2003; Ridley and Diamond, 2000

La carbonatation a pour conséquence la libération d'une grande quantité de silice ce qui expliquerait la formation de veines de quartz. La distribution de l'altération est principalement contrôlée par la faille Sladen et ses failles de second ordre associées.

Dans la monzodiorite, il y a peu d'altération distale à l'éponte des failles à mettre en relation avec de faibles teneurs en Au. L'altération proximale est plus intense avec K_2O + (+80 à 360 wt%), SiO_2 + (+30 à 250 wt%) et Na_2O - (-2 à 80 wt%). Pour les sédiments une intense altération se concentre dans les 2 m aux épontes. On y trouve : Na_2O + (+40 à 330 wt%), K_2O - (-15 à -40 wt%). Quel que soit l'encaissant, il existe une corrélation entre des teneurs de gisements en Au ($\geq 0,3$ ppm) et une forte carbonatation. Le wt% de CO_2 est fortement fonction de la nature de l'encaissant et sa capacité à réagir avec le fluide minéralisateur riche en CO_2 .

Le dépôt de Canadian Malartic se caractérise donc par un événement aurifère synchrone à la déformation D2 qui surimpose ou remobilise en partie une minéralisation précoce d'origine magmatique/hydrothermal en relation avec une intrusion porphyrique d'âges Témiscamingue mise en place à la faveur d'une zone de faille fertile. On retrouve des caractéristiques de dépôt orogénique Archéen avec une carbonatation étendue et un contenu faible en Cu, Bi, Zn et Pb en association avec une faille ductile-cassante.

2.3 – Télédétection

2.3.1 – Notions physiques

La télédétection est un ensemble de techniques qui consiste à obtenir de l'information d'un objet, d'une surface ou d'un phénomène de façon indirecte via l'étude des ondes électromagnétiques ou bien d'autres types de rayonnements. L'essentiel des références de cette partie provient de l'ouvrage Lillesand *et al.*, de 2015 (7^{ième} édition) qui constitue une référence en matière de Télédétection. Elle met en jeu des capteurs (satellites ou aéroportés) à même d'identifier ces ondes pour les traduire en images. Ces images sont ensuite analysées pour en tirer les informations qu'elles contiennent. Cela est rendu possible grâce aux interactions entre l'énergie lumineuse et la surface de la Terre (Équation 2.10).

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda) \quad [2.10]$$

E_I = énergie incidente

E_R = énergie réfléchie

E_A = énergie absorbée

E_T = énergie transmise

λ = longueur d'onde

La lumière visible n'est qu'une partie de cette énergie, il existe d'autres formes d'énergies électromagnétiques comme les ultraviolets ou les rayons X. Ce ne sont que des portions discrètes du spectre électromagnétique. Cette énergie se propage sous la forme d'une onde caractérisée par une fréquence et une longueur d'onde. En télédétection, les ondes électromagnétiques sont caractérisées par la position de leurs longueurs d'ondes sur le spectre. Dans ce cas, la longueur d'onde peut être exprimée en micromètre ou en nanomètre. Le spectre électromagnétique est arbitrairement divisé en plusieurs parties mais, en réalité, il constitue un ensemble continu (Figure 2.7). Des rayons X aux ondes radio, les longueurs d'ondes sont comprises entre 10^4 et 10^8 micromètre. Le visible, par comparaison, n'est lui compris qu'entre 0,4 et 0,7 μm . Le bleu se situe entre 0,4 et 0,5 μm , le vert entre 0,5 et 0,6 μm et le rouge entre 0,6 et 0,7 μm . Les ultraviolets (UV) se situent avant le bleu et les infra-rouges (IR) après le rouge. Les infra-rouges sont eux même subdivisés ainsi : le proche IR entre 0,7 et 1,3 μm , l'IR moyen entre 1,3 et 3 μm aussi appelé infra-rouge court (SWIR en anglais), et l'IR thermique entre 3 et 14 μm aussi appelé infra-rouge long. Plus loin entre 1 mm et 1 m on trouve les micro-ondes.

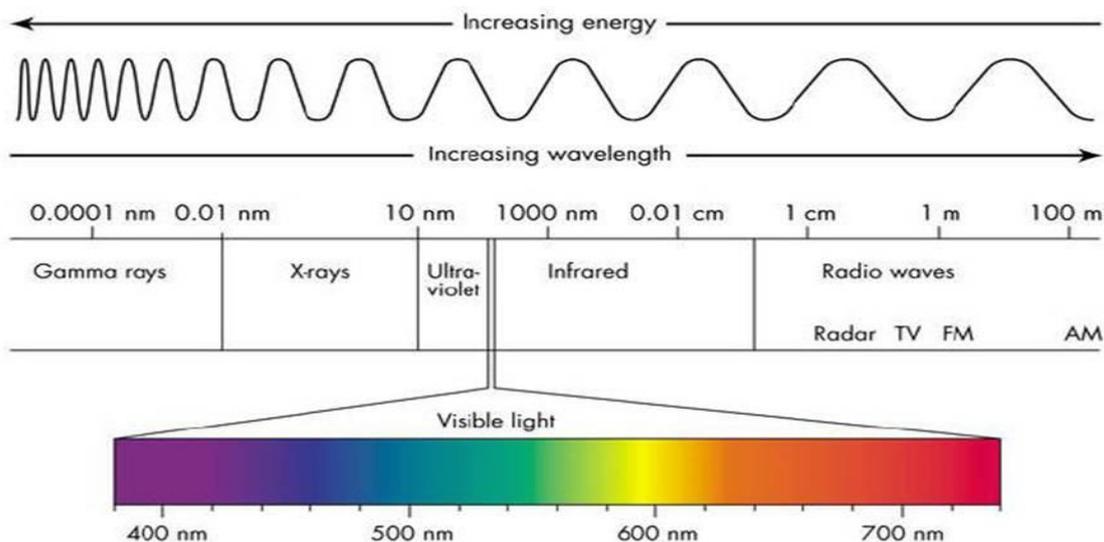


Figure 2.7 : Le spectre électromagnétique. (Gopixgo.com)

L'énergie provenant du soleil sous forme d'ondes électromagnétiques est réfléchiée par les surfaces terrestres en fonction de leur nature et de la longueur d'onde considérée. Les capteurs utilisés en télédétection ont pour but de capter ces spectres de réflectances (ρ_λ) et l'information qui les caractérisent (Équation 2.8).

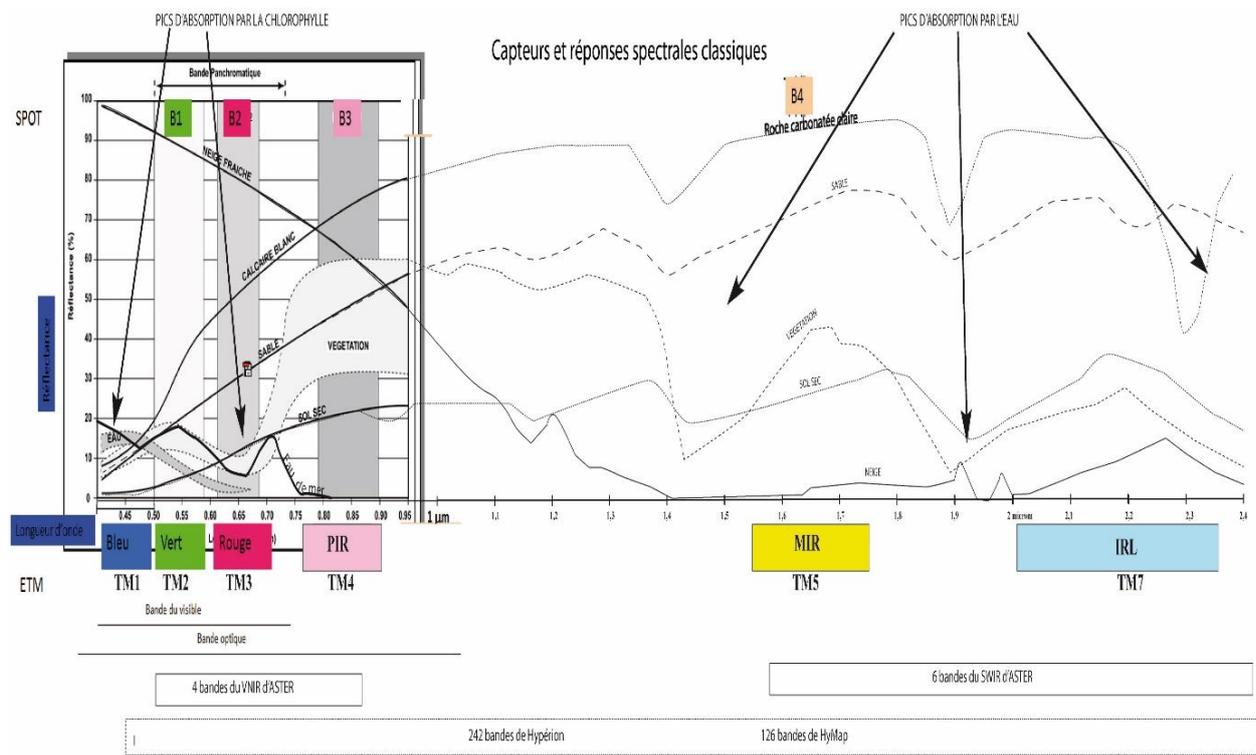


Figure 2.8 : Courbes de réflectances classiques et capteurs spectraux associés. (Vidal, 2013)

$$\rho_{\lambda} = \frac{E_R(\lambda)}{E_I(\lambda)} \quad [2.11]$$

Chaque objet à un spectre de réflectance particulier en fonction de la longueur d'onde émise. C'est ce que représentent les graphiques de courbes de réflectances (Figure 2.8). Par conséquent, le capteur spectral choisi est fonction de l'objet recherché comme une roche ou une phase minérale particulière dans notre cas. Chaque espèce considérée aura une signature spectrale caractéristique pour une ou plusieurs longueurs d'ondes (Figure 2.9).

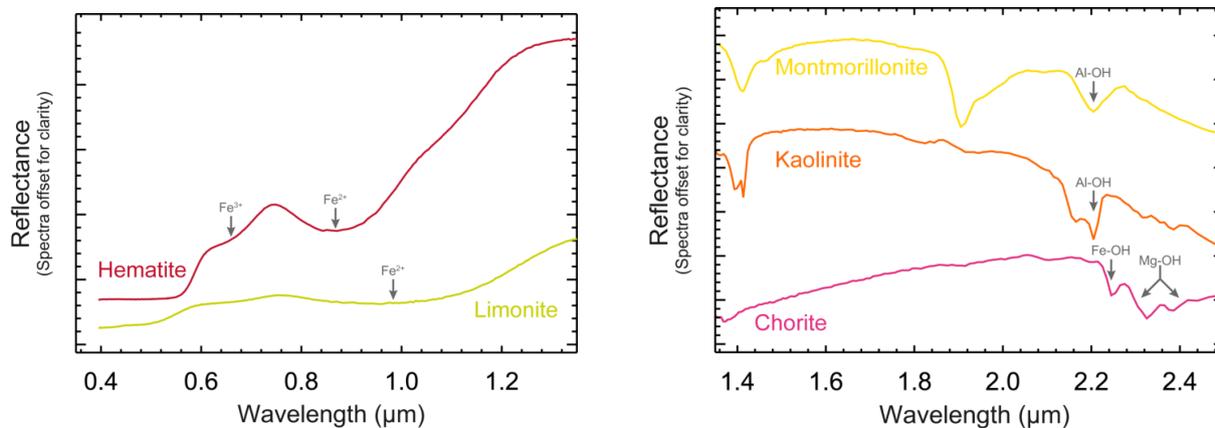


Figure 2.9 : Courbes de réflectances caractéristiques pour certaines phases minérales. (Zabcic et al., 2014)

Le spectre de réflectance typique d'une plante verte en bonne santé est caractérisé par deux pics d'absorption à 0,45 et 0,67 μm . Ces pics correspondent à la chlorophylle qui absorbe fortement les longueurs d'onde du bleu et du rouge. Ces plantes nous paraissent vertes car elles réfléchissent dans la longueur d'onde du vert. Lorsque les feuilles des arbres jaunissent en automne, cela se voit sur les spectres de réflectances. Les pics de la chlorophylle sont moins marqués. La télédétection peut ainsi être utilisée pour surveiller la santé des forêts. Il est également possible de différencier les différentes essences d'arbres en fonction du spectre qu'ils renvoient.

Dans le cas des sols, d'autres facteurs vont jouer sur les spectres de réflectances obtenus comme l'humidité, la matière organique, la texture (grossier ou fin), la rugosité de surface ou encore la présence d'oxyde de fer. L'humidité va absorber les bandes 1,4, 1,9 et 2,7 μm . La présence de groupes hydroxyles va absorber les bandes 1,4 et 2,2 μm . L'humidité du sol va dépendre de sa granulométrie. Un sol plus grossier aura tendance à bien se drainer comparé à un sol plus fin. Dans les mêmes conditions d'acquisition où sur les mêmes images, il est possible d'avoir une idée de la granulométrie relative de certains sols en fonction des différences de leur taux d'humidité. Un sable peut avoir plusieurs spectres de réflectances très différents en fonction de sa roche mère. Un sable calcaire typique des îles tropicales n'aura pas la même signature spectrale qu'un sable siliceux ou volcanique. Ici, c'est la composition minéralogique qui va jouer sur la réponse spectrale plus que la granulométrie par exemple.

La neige peut être aussi très bien caractérisée par télédétection. En général, elle réfléchit fortement dans le visible et le proche infra-rouge et absorbe plus d'énergie dans le moyen infra-rouge. Sa réflectance est fonction de la taille des cristaux, de la quantité de liquide ou bien de la présence d'impuretés sur la surface. De plus gros grains absorbent plus d'énergie, en particulier autour de 0,8 μm . La présence de poussière va réduire sa réflectance dans le domaine du visible. Ces poussières peuvent d'ailleurs elles-mêmes être identifiées. La télédétection peut être utilisée dans de nombreux domaines et pas seulement les géosciences.

Il est important de préciser que la signature spectrale d'un objet peut varier dans le temps en fonction des conditions de terrains au moment de l'acquisition. Les ombres varient en fonction du moment de la journée où les images sont prises. Les ombres ont pour effet de faire baisser la réflectance. Elles ne modifient pas la forme du spectre mais vont diminuer les pics d'absorption et ainsi rendre l'identification plus difficile. Il est préférable de prendre les acquisitions au zénith. Il faut en tenir compte au moment du traitement de l'image et de l'interprétation qui en résulte.

2.3.2 - Rôle de l'atmosphère

Les interactions entre les ondes électromagnétiques et l'atmosphère sont importantes et doivent impérativement être prises en compte quelle que soit la source d'acquisition (satellite ou aéroportée). Le premier effet est la diffusion. Comme son nom l'indique, ce phénomène va provoquer une diffusion versatiles de la radiation. La diffusion de Rayleigh intervient lorsqu'il y a interactions des radiations avec les molécules atmosphériques et autres particules fines et plus petites que la longueur d'onde considérée. Cet effet est inversement proportionnel à λ^4 , et affecte donc plus particulièrement les faibles longueurs d'ondes. La diffusion de Mie intervient lorsque la taille des particules est proche de celle de la longueur d'onde. Elle est moins courante que la diffusion de Rayleigh. Enfin, la diffusion non sélective se produit pour des particules plus grosses que la longueur d'onde. C'est le cas des gouttelettes d'eau dans les nuages qui provoquent la diffusion non sélective des longueurs d'onde du visible (bleu, vert et rouge), ce qui donne la teinte blanche des nuages et du brouillard.

Le second effet est l'absorption. Dans ce cas, et contrairement à la diffusion, il y a une perte de l'énergie radiative. Le phénomène d'absorption est principalement dû aux gaz atmosphériques comme la vapeur d'eau, le CO_2 ou l'ozone. Chaque gaz absorbe spécifiquement certaines longueurs d'ondes. Les plages de longueurs d'ondes où l'atmosphère est particulièrement transparente sont appelées fenêtres atmosphériques (Figure 2.7). Il est intéressant de noter que le pic énergétique des radiations solaires coïncide avec les longueurs d'ondes du visible et la fenêtre atmosphérique correspondante entre 0,4 et 0,7 μm .

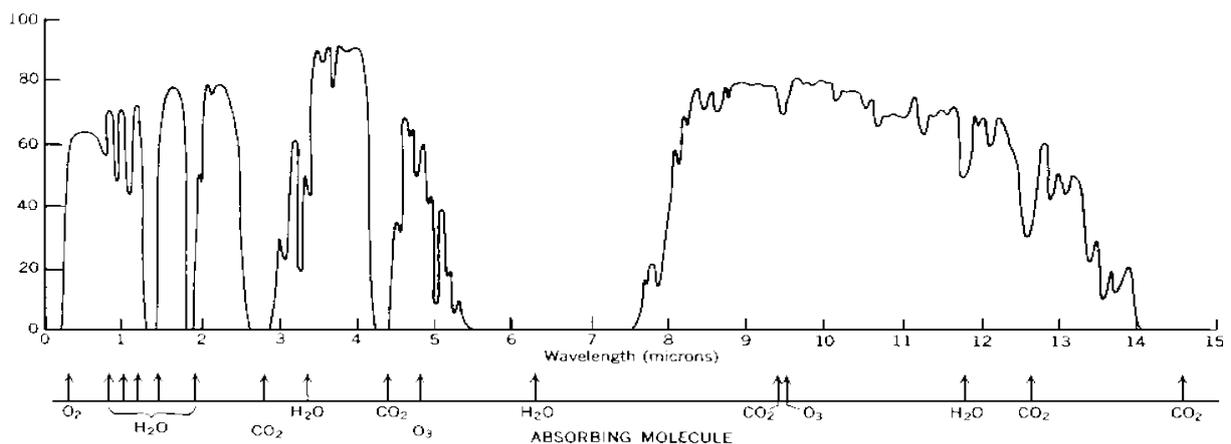


Figure 2.10 : Spectre d'absorption atmosphérique. L'aire comprise en haut de la courbe correspond à l'énergie absorbée. (Lillesand *et al.*, 2015)

De ce fait, il est important de choisir des plages horaires où le ciel est dégagé pour faire l'acquisition des images et pour minimiser au maximum les effets atmosphériques. Malgré tout,

il est à chaque fois nécessaire d'apporter des corrections même si le temps est sec et dégagé. Ces corrections se font systématiquement à l'étape du *postprocessing*. Il est aussi nécessaire de faire les acquisitions sur un sol sec. En effet, la pellicule d'eau va réémettre un spectre caractéristique de l'eau, dans le pire des cas, ou bien fortement atténuer les spectres au point où ils risquent d'être inutilisables. C'est pourquoi les zones arides sont des zones privilégiées pour la télédétection.

2.3.3 – Les capteurs spectraux

En télédétection, les images sont composées de plusieurs couches d'images prises pour chaque longueur d'onde. Généralement, ces images sont prises entre 0,4 et 2,5 μm du début du visible à un peu avant la fin de l'infra-rouge long (1,3-3 μm). Chaque pixel de l'image est composé comme un mille-feuille avec des valeurs de réflectance pour chaque longueur d'onde dépendant de la résolution du capteur, on parle de cube spectral (Figure 2.11). On peut aussi considérer que la même image est prise plusieurs fois mais selon des longueurs d'ondes différentes. Le nombre de ces "différentes" images est fonction de la résolution de l'appareil d'acquisition. Plus la résolution est importante, plus l'image sera composée en bandes spectrales fines. Une meilleure résolution spectrale permet donc de capter plus de variations spectrales et ainsi apporte des informations plus fines sur l'objet recherché. Certains pics d'absorptions caractéristiques peuvent être localisés sur une très faible bande spectrale de quelques dizaines de nanomètres. Pour avoir accès à l'information contenue dans ces bandes spectrales, il faut avoir une résolution spectrale suffisante. Il existe de nombreux type de capteurs, qu'ils soient aéroportés ou bien à bord d'un satellite. Cependant il existe 3 grandes familles de capteurs avec chacun leur résolution spectrale propre (Tableau 2.3). Ce sont les capteurs multispectraux, superspectraux et hyperspectraux. Les capteurs multispectraux ont jusqu'à 10 bandes spectrales, c'est-à-dire qu'une image multispectrales est une composition de 10 images. Les capteurs superspectraux vont jusqu'à 20 bandes. Les capteurs hyperspectraux, enfin, peuvent aller jusqu'à 500 bandes spectrales. Ils sont capables de capter de nombreuses bandes spectrales très fines formant ainsi un spectre continu sur de larges gammes de longueurs d'ondes. Ce sont ces derniers qui sont le plus utilisés aujourd'hui car ce sont eux qui permettent d'acquérir le maximum d'informations.

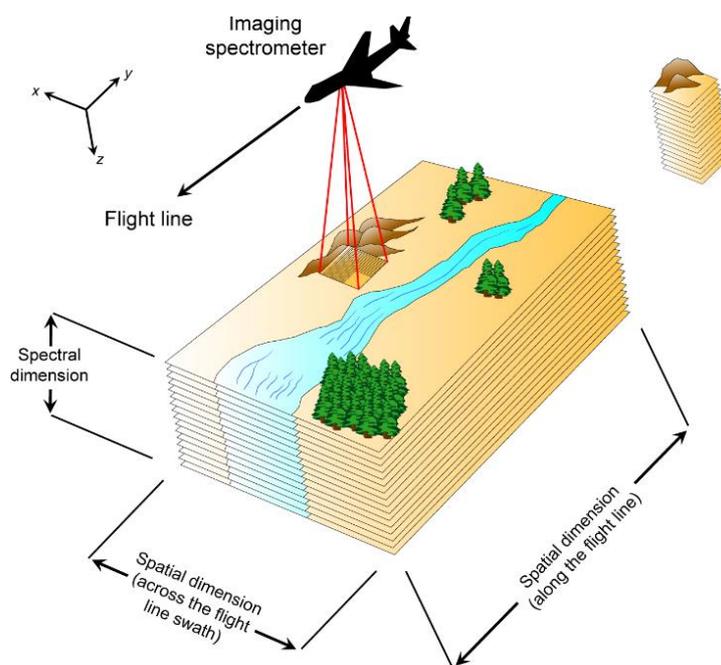


Figure 2.11 : Notion de cube spectral. (Vane et Goetz, 1988)

Tableau 2.3 : Comparaison des trois grands types de capteurs spectraux. (Lillesand *et al.*, 2015)

	Multispectral	Superspectral	Hyperspectral
Nombre de bandes	5 - 10	10 - 20	100 – 500 et +
Résolution spectrale	Largeur de bande ~ 50nm dans le visible	Largeur de bande ~ 20nm dans le visible	Largeur de bande ~ 5 à 10nm dans le visible

2.3.3.a – Les capteurs aéroportés

Les capteurs hyperspectraux sont essentiellement des capteurs aéroportés (Tableau 2.4). En effet, il est plus complexe d'équiper un satellite de ce type de capteurs. Les satellites les plus utilisés en télédétection sont pour la plupart en multispectral (Landsat, Spot, Aster) mais il en existe aussi en hyperspectral (Hypérior). Les capteurs aéroportés peuvent aussi bien être équipés à bord d'un avion ou bien sur un drone si leur poids le permet. En pratique ce type de capteur est utilisé après avoir acquis des images satellites. Les images satellites multispectrales permettent de couvrir de larges zones de plusieurs centaines de kilomètres carrés. Elles permettent d'avoir une première approximation de la zone étudiée et de voir les grandes tendances. Ensuite, de plus petites zones d'intérêts sont identifiées pour être acquises avec un capteur aéroporté. Ces images apportent alors une meilleure précision sur des zones plus réduites.

Tableau 2.4 : Les différents capteurs aéroportés. (Lillesand *et al.*, 2015)

Capteurs	Nombre de bandes spectrales	Définition spectrale (μm)	Résolution spatiale (nm)
CASIS 1500	288	0,365 – 1,05	1,9
SASI 600	100	0,95 – 2,45	15
MASI 600	64	3 - 5	32
TASI 600	32	8 – 11,5	250
AISA Eagle	488	0,4 – 0,97	3,3
AISA Eaglet	410	0,4 – 0,97	3,3
AISA Hawk	254	0,97 – 2,5	12
AISA Fenix	619	0,38 – 2,5	3,5 - 10
AISA Owl	100	7,6 – 12,5	100
Pika II	240	0,4 – 0,9	2,1
Pika NIR	145	0,9 – 1,7	5,5
NovaSol visNIR	120 - 180	0,38 - 1	3,3
NovaSol Alpha-vis	40 - 60	0,35 - 1	10
NovaSol SWIR 640C	170	0,85 – 1,70	5
NovaSol Alpha-SWIR	160	0,9 – 1,70	5
NovaSol Extra-SWIR	256	0,86 – 2,4	6
AVIRIS	224	0,4 – 2,5	10
HyMap	200	variable	variable
Probe-1	128	0,4 – 2,5	11 - 18

Tableau 2.5 : Les différents capteurs utilisés sur les satellites Landsat. (Lillesand *et al.*, 2015)

Capteurs	Mission	Définition spectrale (μm)	Résolution spatiale (m)
RBV	Landsat 1 et 2	0,475 – 0,575	80
		0,580 – 0,680	80
		0,690 – 0,830	80
		0,505 – 0,750	30
MSS	1 à 5	0,5 – 0,6	79/82
		0,6 – 0,7	79/82
		0,7 – 0,8	79/82
		0,8 – 1,1	79/82
		10,4 – 12,6	240
TM	4 et 5	0,45 – 0,52	30
		0,52 – 0,60	30
		0,63 – 0,69	30
		0,76 – 0,90	30
		1,55 – 1,75	30
		10,4 – 12,5	120
		2,08 – 2,35	30
ETM	6	Toutes les bandes Tm plus 0,5 – 0,9	30 (120 m thermique) 15
ETM+	7	Toutes les bandes Tm plus 0,5 – 0,9	30 (60 m thermique) 15

2.3.3.b – Les satellites

Il existe plusieurs satellites issus de plusieurs missions spatiales comme Landsat (US) ou SPOT (FR). Pour chacune de ces missions il existe plusieurs versions des satellites (Landsat 1-7) équipé de différents capteurs (Tableau 2.5 et 2.6).

Tableau 2.6 : Les différents capteurs utilisés sur les satellites SPOT 1-7. (Lillesand *et al.*, 2015)

Capteurs	Mission	Définition spectrale (μm)	Résolution spatiale (m)
2 HRVs	SPOT 1 à 3	0,43 – 0,47	10
		0,5 – 0,59	20
		0,61 – 0,68	20
		0,79 – 0,89	20
2 HRVIRs	4	0,43 – 0,47	10
		0,5 – 0,59	20
		0,61 – 0,68	20
		0,79 – 0,89	20
		1,58 – 1,75	20
2 HRGs	5	0,48 – 0,71	10
		0,49 – 0,69	10
		0,5 – 0,59	20
		0,61 – 0,68	20
		0,79 – 0,89	20
		1,58 – 1,75	20
Naomi	6 et 7	0,43 – 0,47	1,5
		0,5 – 0,59	6
		0,61 – 0,68	6
		0,79 – 0,89	6
		1,58 – 1,75	6

Tableau 2.7 : Caractéristique du satellite ASTER. (Lillesand *et al.*, 2015)

Capteurs	Définition spectrale (μm)	Résolution spatiale (m)
VNIR	0,52 – 0,6	15
	0,63 – 0,69	15
	0,76 – 0,86	15
SWIR (défectueux depuis 2008)	1,6 -1,7	30
	2,145 – 2,185	30
	2,185 – 2,225	30
	2,235 – 2,285	30
	2,295 – 2,365	30
	2,360 – 2,430	30
TIR	8,125 – 8,475	90
	8,475 -8,825	90
	8,925 – 9,275	90
	10,25 – 10,95	90
	10,95 – 11,65	90

Le satellite ASTER lancé en 1999 est un partenariat entre les Etats-Unis et le Japon. Il a été très utilisé est l'est encore aujourd'hui malgré un capteur défectueux depuis 2008. Le satellite fonctionne avec trois sous-systèmes : un pour le visible et proche IR (VNIR), un pour les IR courts (SWIR) et un pour l'IR thermique (TIR). Ce satellite était très utilisé car il bénéficiait d'une excellente résolution sur une large gamme spectrale pour l'époque (Tableau 2.7).

Le satellite WorldView-3 est un satellite superspectral à haute résolution. Il est doté de 8 bandes SWIR de 1,195 à 2,365 μm avec une résolution spatiale de 0,31 m, et 12 bandes CAVIS de 0,405 à 2,245 μm avec une résolution de 1,24 m pour faire les corrections dues aux nuages, aux aérosols, à la vapeur, la glace et la neige. Cela permet d'obtenir des images à très haute résolution sur peu de bandes spectrales. Il est très utilisé en géologie et en contexte minier.

Les satellites hyperspectraux sont plus rares car bien plus complexes à mettre au point et à envoyer sur orbite. Cependant, il en existe, notamment le capteur hyperspectral Hypériorion à bord du satellite EO-1, lancé en 2000. Il possède 242 bandes spectrales de 0,36 à 2,6 μm avec une résolution spectrale de 10 à 11 nm. Il possède deux capteurs, un premier de 70 bandes qui comprennent les UV, le visible et le proche IR et un autre avec 172 bandes pour le proche IR et l'IR moyen. Il possède une résolution de 30 m. Les données produites sont distribuées par l'USGS. Après 17 années de fonctionnement le satellite a finalement été désactivé le 30 mars 2017 alors qu'il ne devait au départ durer que 18 mois.

Ces dernières années, de nouveaux satellites ont été envoyés. C'est le cas de PRISMA de l'agence spatiale italienne (ASI) lancé en 2015. Il est doté d'un capteur pour le visible et le proche IR avec 66 bandes de 0,4 à 1,01 μm et d'un capteur SWIR avec 171 bandes de 0,92 à

2,5 μm . Le satellite EnMAP mis au point par l'agence spatiale allemande, envoyé lui aussi en 2015, possède 244 bandes spectrales de 0,42 à 2,45 μm . Il existe aussi deux projets futurs. Le satellite SHALOM mis au point par l'Italie et Israël. Il devrait avoir une résolution spatiale de 8 m de 0,4 à 1,01 μm et 10 m de 9,2 à 2,7 μm . Le second, HypIRI, est américain. Il comprendra 212 bandes de 0,38 à 2,5 μm pour une résolution spatiale de 60 m.

2.3.3.c – Les spectromètres de terrain

Lorsque des données d'imagerie spectrale sont prises, il est nécessaire de faire une calibration. Cette calibration se fait sur le terrain en prenant des spectres de références de roche ou minéraux connus et caractéristiques de la zone. Ces spectres de références vont servir à aider le traitement de l'image. Il permet de calibrer ce que voit le capteur spectral avec des points connus. On place une référence blanche de haute précision qui va permettre de caractériser l'ensoleillement et aider à corriger des effets de l'atmosphère. On peut citer le *FieldSpec*TM, appareil portable fabriqué par ASD (Figure 2.12). Il permet d'acquérir des spectres de réflectances de 0,35 à 2,5 μm avec une résolution spectrale de 3 nm. Son extrême précision et ses mesures *in situ* permettent d'obtenir des spectres idéaux pour certaines formations, roches ou minéraux présent dans la zone d'étude. Ces appareils fournissent ainsi une bibliothèque spectrale propre au terrain étudié. Ces données sont ensuite utilisées pour le traitement de l'image et le démixage des mélanges spectraux pour en connaître les composantes pures.



Figure 2.12 : Le FieldSpec Pro 4. (ASD)

2.3.4 – Le traitement des images

Les images sont encodées dans l'ordinateur comme une matrice avec des valeurs pour chaque pixel. De plus, chaque pixel contient des valeurs pour toutes les bandes spectrales acquises par le capteur. Seulement, ces données ne sont pas exploitables en l'état. Elles nécessitent de passer plusieurs étapes de traitement pour pouvoir être utilisées. Ces traitements se font à l'aide d'algorithmes et de calculs complexes. Des logiciels comme ENVI™ fournissent des outils pour effectuer ces opérations. On peut citer les principales étapes du traitement d'image. Le *preprocessing* a pour but de corriger les distorsions géométriques, éliminer le bruit, faire la calibration radiométrique. Ces sont des étapes de base qui sont habituellement déjà faites lorsque l'on télécharge des données auprès des fournisseurs comme l'USGS.

Une fois que ces étapes essentielles ont été faites, il faut améliorer l'image pour en faire ressortir le maximum de détails et d'informations. On peut pour cela, modifier les contrastes, segmenter les pixels pour des intervalles de valeurs choisies, augmenter la détection des bordures, etc. Une fois que le rendu de l'image est optimal, il est possible de passer à l'analyse de l'information contenue dans cette image : on parle de classification. Cette opération est la plus importante et la plus complexe. C'est elle qui comprend la plupart des méthodes de traitement. Cela consiste à organiser les données en ensembles cohérents en fonction du contexte. Par exemple, en géologie, il va être question d'attribuer certaines signatures spectrales comme faisant partie de la même formation géologique. C'est ici que les données prises sur le terrain sont pertinentes. On va alors chercher à différencier plusieurs ensembles et sous-ensembles à partir des spectres. Si certaines zones sont connues comme faisant partie d'une formation géologique particulière, toutes les signatures spectrales identiques à ces zones seront considérées comme faisant partie de la même formation. Cela permet de dresser des cartes géologiques.

On peut aussi, dans certains cas, comparer deux images identiques prises au même endroit avec un intervalle de temps. Cette opération est faite pour suivre des phénomènes qui évoluent comme un *bloom* planctonique ou bien l'effet des saisons sur la végétation. En géologie, cette étape est rarement pertinente. On peut enfin faire de la fusion de données en superposant d'autre type de données comme une analyse linéaire des failles ou bien la topographie. La mise en relation de ces différentes données permet d'en apprendre plus.

2.3.4.a – Le prétraitement

L'élimination du bruit est une étape essentielle. Ce sont des interférences qui peuvent être causées par des vibrations ou un dysfonctionnement ponctuel du capteur. Il peut y avoir des

interférences entre les différents composants du capteur. Il peut aussi y avoir des perturbations dans la transmission du signal dans le cas des images prises depuis un satellite. Le bruit peut totalement masquer les informations contenues dans l'image. La méthode de correction varie selon si le bruit est périodique, aléatoire ou bien une combinaison des deux. Le bruit peut aussi se distribuer sur toute l'image comme une constellation de pixels avec une valeur de 0 ou bien une absence de données : on parle de neige numérique. Pour corriger ce problème, on applique aux pixels manquants une valeur moyenne de celles des autres pixels qui les entourent. Des erreurs dans la transmission des données se traduisent par des grosses différences de valeurs d'un pixel à son pixel voisin. Pour corriger ce problème on balaye l'image avec une fenêtre de 3 X 3 ou 5 X 5 pixels pour identifier de forts contrastes de valeurs. Un seuil critique est défini par l'opérateur. Si la différence entre deux pixels adjacents est supérieure au seuil critique, alors il faut faire une correction en moyennant avec les pixels alentours.

Il faut également faire des corrections radiométriques. En effet, si deux images d'une même scène sont prises avec un intervalle de temps, il va falloir corriger les différences d'ensoleillement pour comparer les deux images. Il faut prendre en compte la position du soleil par rapport à l'horizon et sa distance par rapport à la Terre. Il faut aussi prendre en compte les perturbations atmosphériques. Pour cela, il faut des informations atmosphériques sur le lieu et l'heure de l'acquisition de l'image. Les satellites météos sont à même de fournir ces informations.

Il faut aussi prendre en compte les problèmes de distorsions géométriques. Elles peuvent être de plusieurs natures. Lors d'une acquisition aéroportée, le plan de vol est prévu pour que les différentes lignes d'acquisition se recoupent pour pouvoir assembler les différentes sous-images. Il peut aussi y avoir des distorsions dues à des variations d'altitudes ou de vitesse. Dans le cas des satellites, il existe une distorsion systématique à cause de la rotation vers l'est de la Terre. Cela a pour conséquence de faire dériver vers l'ouest l'acquisition. Il existe aussi d'autres sources de distorsions, aléatoires cette fois-ci. Pour cela, on utilise des points de référence connus pour déterminer la correction à apporter à l'image. En fonction des différences de positionnement des points de références par rapport à leur position exacte, il est possible de caractériser et donc corriger la distorsion qui en est la cause. Il existe de nombreuses méthodes de calcul plus ou moins complexes pour corriger toute sortes de distorsion comme l'interpolation bilinéaire, l'interpolation bi-cubique ou encore la convolution cubique.

2.3.4.b – L'amélioration

Les méthodes d'amélioration de la qualité de l'image vont dépendre des informations que l'on cherche à avoir. Il est possible de faire plusieurs versions améliorées d'une image pour explorer différents aspects. On peut choisir d'optimiser l'image pour certaines longueurs d'ondes au détriment d'autres. Ces manipulations ont pour but de mieux caractériser les objets ou figures présentés dans l'image. On peut, par exemple, chercher à identifier des réseaux de failles. Pour cela, il faut faire ressortir des segments plus ou moins linéaires. On peut chercher à mieux définir un trait de côte. Pour cela on peut passer l'image en nuances de gris et définir un seuil pour séparer l'océan du continent. On parle alors de masques binaires. Ils sont utilisés pour segmenter l'image en deux classes, ici océan et continent. On peut aussi choisir d'afficher l'image en quelques nuances de gris pour des intervalles de valeurs. Cette méthode est utilisée pour les images thermiques ; on peut ensuite ajouter des couleurs pour plus facilement identifier des zones plus chaudes ou plus froides. Dans certains cas, les images sont prises en 8-bits, c'est-à-dire avec des valeurs comprises entre 0 et 255. Seulement, le capteur n'a peut-être récupéré de l'information que des valeurs 60 à 150. Dans ce cas, il peut être nécessaire de corriger ces valeurs pour les ramener à des variations de valeurs entre 0 et 255. Dans ce cas, les pixels clairs paraîtront plus clairs et les pixels sombres plus sombres. C'est une manière d'augmenter les contrastes. Dans le cas d'une étude géologique, il est possible de supprimer la végétation en utilisant un filtre adéquat. Un tel filtre va masquer les bandes caractéristiques de la végétation pour alléger l'image. Les pixels correspondant à la végétation ne sont donc plus pris en compte. Si, au contraire, on cherche à caractériser la végétation on peut mettre l'emphase sur ces bandes spectrales. Là aussi, il existe de nombreuses méthodes faisant appel à des algorithmes ou des calculs plus ou moins complexes.

2.3.4.c – La classification

Cette étape a pour but de classer tous les pixels de l'image selon différents thèmes. La classification se fait en fonction de la signature spectrale des différents pixels. Les mesures spectrales prises sur le terrain vont servir de base de référence pour la classification. Lorsque que des spectres correspondant à un thème donné (type de roche, végétation, occupation du territoire, etc.) sont pris sur le terrain, il s'agit de rechercher tous les autres pixels identiques pour leur attribuer la même valeur. On peut, par exemple pour une forêt, faire différents ensembles en fonction des différentes espèces d'arbres. La classification peut se faire de manière supervisée. Dans ce cas, l'opérateur choisit lui-même les critères qu'il souhaite appliquer pour classer les pixels. Utiliser les spectres de terrains, ce que l'on appelle la vérité

de terrain, est une manière de faire. Dans le cas de la géologie, le logiciel (ENVI) va alors comparer la signature spectrale de l'image avec celles des minéraux susceptibles de s'y trouver. On peut utiliser des spectres acquis sur le terrain de minéraux connus. On considère qu'un spectre de réflectance peut être considéré comme un vecteur dans un espace multidimensionnel. Le logiciel va mesurer la différence d'angle entre les deux spectres pour déterminer s'ils sont identiques ou non. Le seuil d'angle à partir duquel les deux spectres sont considérés comme identiques est défini par l'opérateur. Cette technique est largement utilisée, on parle de la technique *spectral angle mapping* (SAM). On peut aussi utiliser une manière non supervisée. Dans ce cas-ci, les thèmes sont définis par le logiciel, qui va analyser lui-même les spectres et regrouper ceux qui sont les plus similaires. Cette méthode peut aboutir à des thèmes qui n'ont pas de signification véritable. La plupart du temps, la classification se fait de façon mixte, certains aspects sont supervisés pour garder une cohérence avec la réalité, ensuite une fois que des grands ensembles logiques ont été définis, il est possible d'automatiser la classification. Il reste toujours quelques pixels non classés dans certaines zones. C'est là que l'expérience de l'opérateur et surtout la bonne connaissance du terrain prend son sens.

L'analyse des mélanges spectraux est une des tâches les plus essentielles et complexes. Il s'agit de déterminer les composantes pures d'un mélange spectral. Par exemple, en géologie, chaque pixel aura une signature spectrale caractéristique du mélange des roches et minéraux présent sur la surface à laquelle le pixel correspond. Souvent, on cherche à identifier des populations minérales pour, par exemple, mettre en évidence des halos d'altérations susceptibles d'indiquer la présence d'un gisement. Pour chaque pixel, il faut démixer le mélange spectral pour connaître la composition minéralogique. Pour ce faire, le logiciel utilise une base de données minéralogiques fournie par l'USGS. On peut aussi prendre sur le terrain des spectres de réflectance des différents minéraux que l'on souhaite identifier sur l'image. Le logiciel va donc essayer de déterminer quel est le mélange spectral de minéraux connus le plus fidèle à la signature spectrale acquise. Il existe pour cela de nombreuses techniques et algorithmes (Figure 2.13). C'est sur cet aspect que de nombreux chercheurs travaillent pour améliorer les capacités d'identification minéralogique (Buzzi *et al.*, 2014). Pour certains mélanges spectraux, il est très difficile de retrouver les composantes pures. Régulièrement, de nouvelles méthodes de calculs ou bien de nouveaux algorithmes voient le jour pour améliorer l'identification minéralogique.

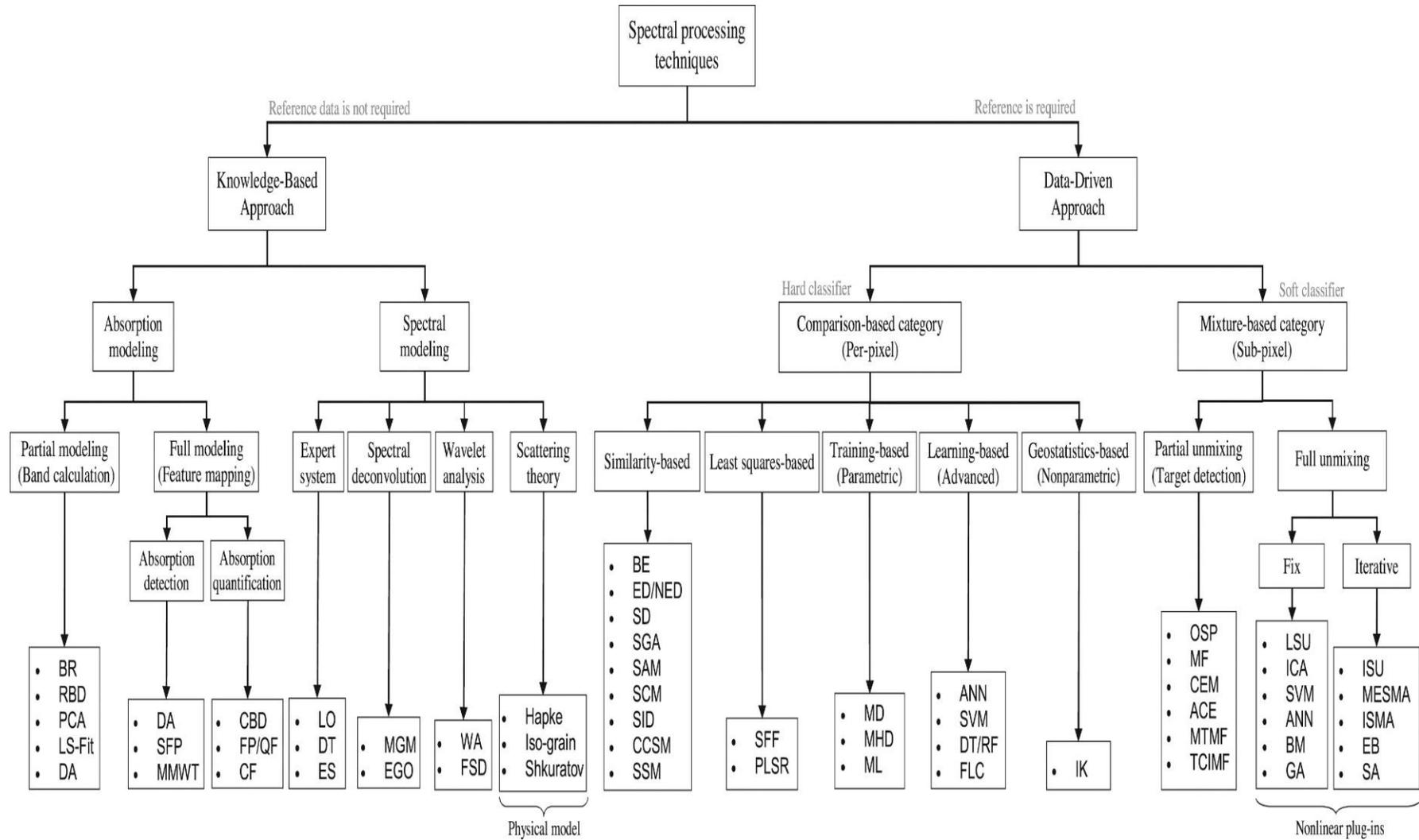


Figure 2.13 : Les différentes techniques et algorithmes de traitements du signal. (Asadzadeh *et al.*, 2018)

2.3.5 - Application de la télédétection en géosciences

Depuis une dizaine d'années, les progrès techniques en matière de capteurs spectraux aéroportés ou satellites ont permis le développement de nouvelles applications à la télédétection. Elle est de plus en plus utilisée pour la cartographie géologique mais aussi en contexte minier, pour faire du suivi environnemental ou bien de l'exploration. Cette partie présente différentes applications de la télédétection en géologie minière.

Au début des années 2000, il était difficile d'identifier des espèces minérales particulières. Les études se concentraient sur la reconnaissance de mélanges spectraux. Une étude de Mars *et al.*, en 2003 consistait à cartographier des stériles en Idaho. Dans cette étude, des images multispectrales aéroportées AVIRIS (*Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer*) ont été prises pour tenter de cartographier des stériles issues d'une mine de phosphate. Pour ces études, des sites caractéristiques correspondant aux principales lithologies et couvertures végétales ont été sélectionnés sur le terrain. Différentes mesures ont été prises pour chacun des thèmes. Elles ont ensuite été moyennées pour obtenir des spectres de références. Ces spectres sont alors un mélange spectral de plusieurs signatures spectrales. Ici, ces mélanges spectraux n'ont pas pu être démixés, ils sont alors utilisés tels quels pour tenter de cartographier la zone d'étude. Une fois ces thèmes de mélanges spectraux caractérisés, la cartographie a pour but d'identifier toutes les zones similaires sur la zone d'étude. Ces mesures ont pu définir 5 lithologies principales, 5 types de couvert végétaux et 2 signatures pour les stériles vierges ou recouvert de végétation (Figure 2.14). Le logiciel va comparer les signatures spectrales acquises sur le terrain pour cartographier les stériles miniers (Figure 2.15).

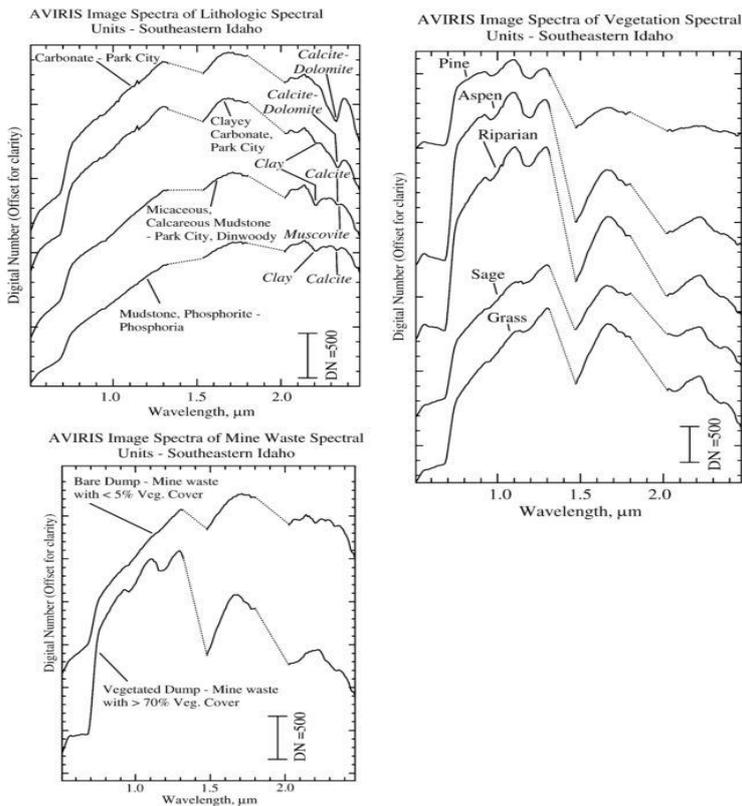


Figure 2.14 : Les différents mélanges spectraux correspondants aux différentes lithologies, couvertures végétales et stériles. (Mars *et al.*, 2003)

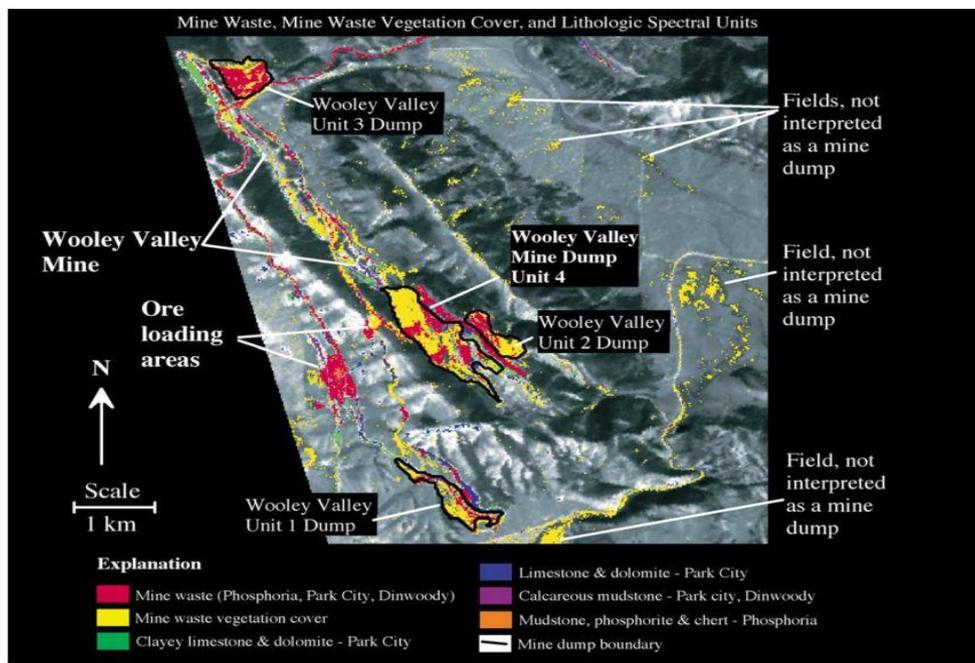


Figure 2.15 : Cartographie spectrale des stériles. (Mars *et al.*, 2003)

On voit qu'ici les lithologies étaient connues. Les spectres non pas servi pour identifier des formations géologiques ou des minéraux inconnus. Les spectres de références composés d'un mélange spectral ont été utilisés pour identifier les stériles qui avaient la même signature.

La plupart du temps, la couverture végétale pose un problème. Ici les images ont été prises en Idaho dans une zone relativement sèche et dépourvue d'une végétation dense. Le grand nord Canadien où la végétation est quasi inexistante et les roches affleurant facilement devrait constituer un terrain favorable pour l'application de télédétection, notamment pour l'exploration. Cependant, dans ces régions, les roches sont très souvent recouvertes de lichens. Les roches ainsi recouvertes auront une signature de végétation. Pour pallier à ce problème une étude a été mis en place pour tenter de contourner le problème (Rogge *et al.*, 2010). C'est une étude de la ceinture de roches vertes de Cape Smith au nord du Québec (Nunavik). Les images ont été prises avec un capteur hyperspectral aéroporté AISA. La région présente des minéralisations en Ni-Cu-PGE dans des roches ultramafiques recouvertes de lichens. L'enjeu de cette étude est d'arriver à cartographier les massifs malgré la présence de lichens à la surface des roches.

Le site présente des roches ultramafiques et mafiques : péridotite, pyroxénite et basalte, gabbros. Les minéralisations ont tendance à se trouver à l'interface péridotite/pyroxénite. Les spectres des lichens présentent une augmentation de réflectance vers 1380 nm et un pic d'absorption autour de 1445 nm à cause de l'eau. Deux autres pics d'absorptions sont présents à 2100 nm et 2300 nm à cause de la cellulose. La péridotite et la pyroxénite contiennent tous deux de l'antigorite et du clinochlore, entre autres. Le basalte et le gabbro ne contiennent pas d'antigorite. Il est donc en principe possible de différencier la péridotite/pyroxénite du basalte/gabbro en identifiant la présence ou non d'antigorite ou de clinochlore. De plus, les pics d'absorptions caractéristiques de l'antigorite se trouvent à 2285 et 2325 nm, celui du clinochlore à 2345 nm. Ces pics d'absorptions se trouvent dans des portions où il n'y a pas de pics d'absorptions pour les lichens. Il est donc possible d'identifier ces minéraux malgré la présence de lichens. Cette méthode permet de différencier deux ensembles lithologiques que sont la péridotite/pyroxénite et le basalte/gabbro. Ici, la présence de lichens et les compositions minéralogiques quasi identiques de ces 4 formations ne permettent pas de les discerner. Malgré tout il est possible de définir des zones de forte probabilité de présence de minéralisation pour les zones identifiées comme étant de la péridotite/pyroxénite étant donné que les minéralisations se trouvent à leur interface. L'apport de l'hyperspectral dans cette étude a permis de discerner certains minéraux comme l'antigorite et le clinochlore malgré la présence de lichens. Il existe

d'autres minéraux susceptibles d'être identifiés pour différencier la péridotite de la pyroxénite et le basalte du gabbro. Seulement, les bandes spectrales permettant de les identifier étaient masquées par les lichens.

2.3.6 – Cartographie géologique et d'exploration

Les géologues, ont très vite été intéressés par la télédétection pour dresser des cartes géologiques de zone particulièrement difficile d'accès ou bien dans des zones dangereuses. Ces cartes peuvent aussi servir de guide d'exploration à grande ou plus petite échelle en fonction de la taille et résolution des images.

En 2010, Shalaby *et al.*, ont tenté de cartographier une province d'Egypte connue pour ses gisements d'uranium. Les images ont été prises par le satellite Landsat-7 avec le capteur ETM+. Dans la région, les minéralisations en uranium sont associées avec des dykes aplitiques et des veines siliceuses jasperoïdes au sein des massifs granitiques. Les minéraux d'altérations caractéristiques de ces zones ont pu être déterminés. Le ratio des bandes 5/7 permet d'identifier les minéraux hydroxylés et hydratés comme l'alunite ou la jarosite. Le ratio des bandes 3/1 informe sur la présence d'oxydes de fer comme l'hématite ou la goethite (Figure 2.16).

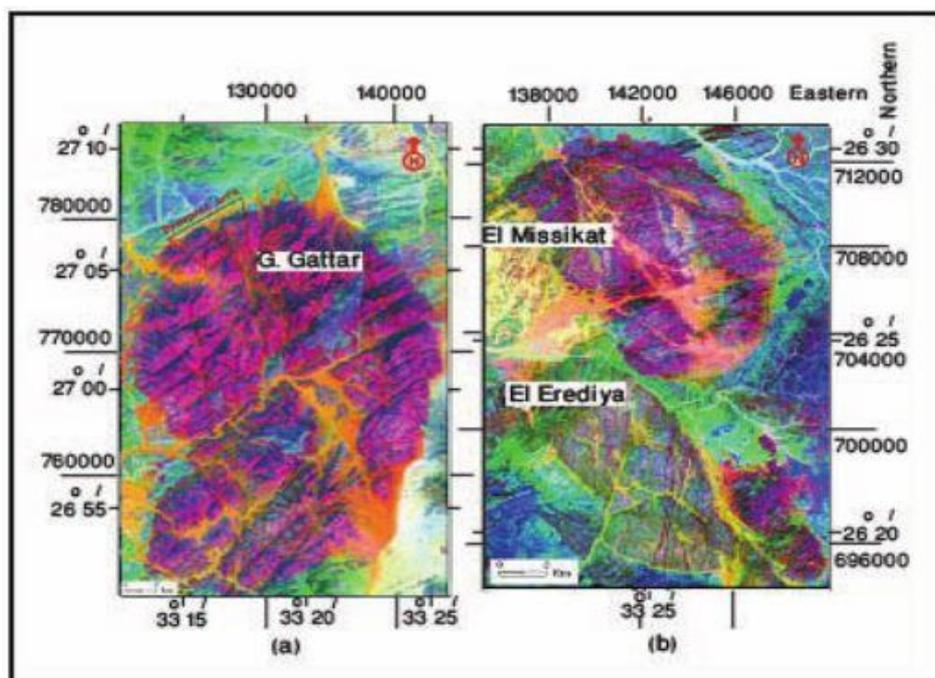


Figure 2.16 : Images ETM+ des granites de la région. La couleur magenta représente les zones d'altérations. (Shalaby *et al.*, 2010)

Les zones d'altérations ainsi identifiées correspondent avec le réseau de failles et de veines dans les massifs granitiques. C'est pourquoi une cartographie des linéaments a aussi été entreprise. Elle a permis d'identifier des failles principalement NE-SW (Figure 2.17).

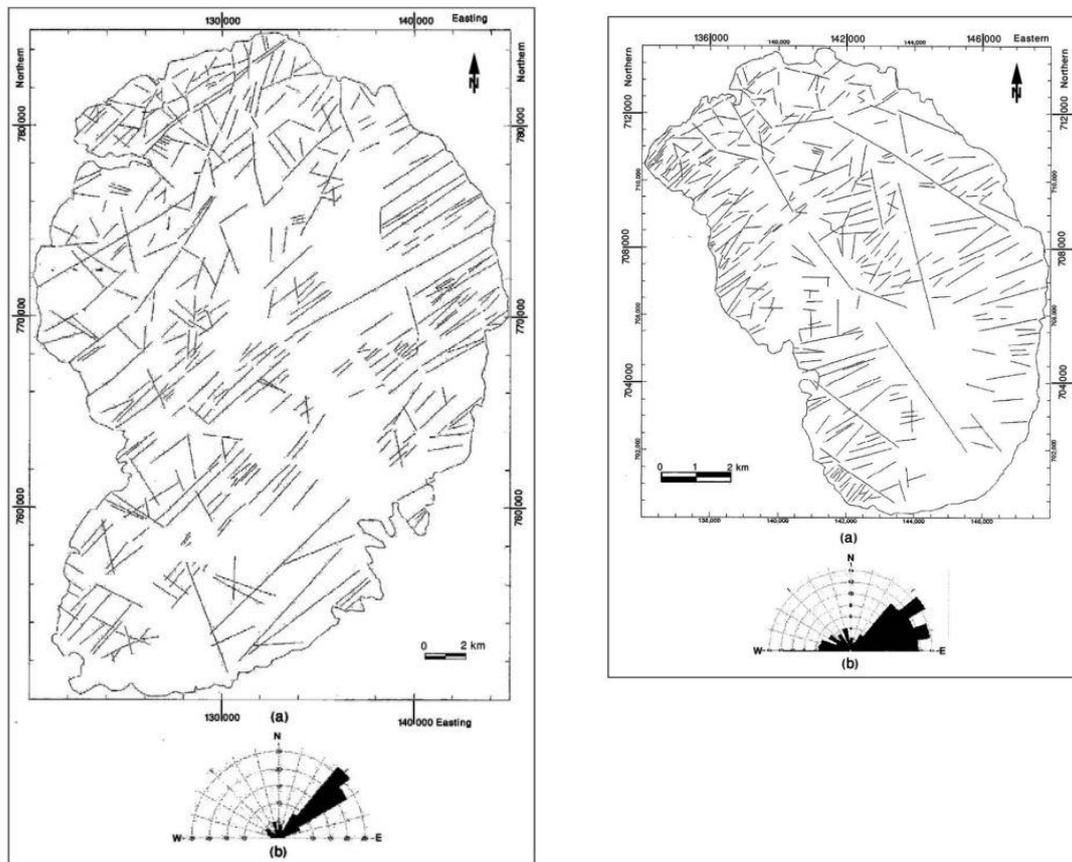


Figure 2.17 : Images ETM+ des granites de la région. La couleur magenta représente les zones d'altérations. (Shalaby *et al.*, 2010)

Une campagne de terrain a été effectuée dans ces zones pour récupérer des échantillons et faire des mesures radiométriques. Quatre zones ont pu être identifiées comme étant de bons indices de minéralisation, étant toutes en relation avec des veines siliceuses jaspéroïdes généralement NE-SW. Dans trois de ces zones, un minéral d'uranium a pu être identifié : l'uranophane $[\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{SiO}_3)_2(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$. Il est accompagné d'autres minéraux d'altérations comme l'hématite ou la chlorite. Ici, ce sont des mesures multispectrales qui ont été mises en œuvre (ETM+). De telles mesures ne permettent pas de discerner des espèces minérales particulières, mais des groupes de minéraux en fonction des signatures typiques, comme les groupements hydroxyles, par exemple. Il aurait également été possible de faire une acquisition radiométrique aéroportée pour déterminer les zones présentant des taux anormaux de radionucléides. Cela n'a pas été fait ici.

A l'aide du même satellite Landsat-7 et du capteur ETM+ une équipe indienne a travaillé à cartographier la minéralogie d'une zone de 2250 km² (Pal *et al.*, 2011). Pour cette étude, chaque pixel faisait 30 m X 30 m et s'est vu attribuer une phase minérale. La région présente une géologie relativement variée avec des granites, des conglomérats, des pélites, des laves et des roches ultramafiques. La région présente plusieurs gisements de Cu et d'apatite. La particularité de cette étude est la méthode d'analyse spectrale utilisée : la méthode ASA. C'est une méta-méthode complexe qui regroupe plusieurs phases utilisant plusieurs algorithmes (MNF, PPI, n-D, SAM, SFF, BE, etc.) (Figure 2.18).

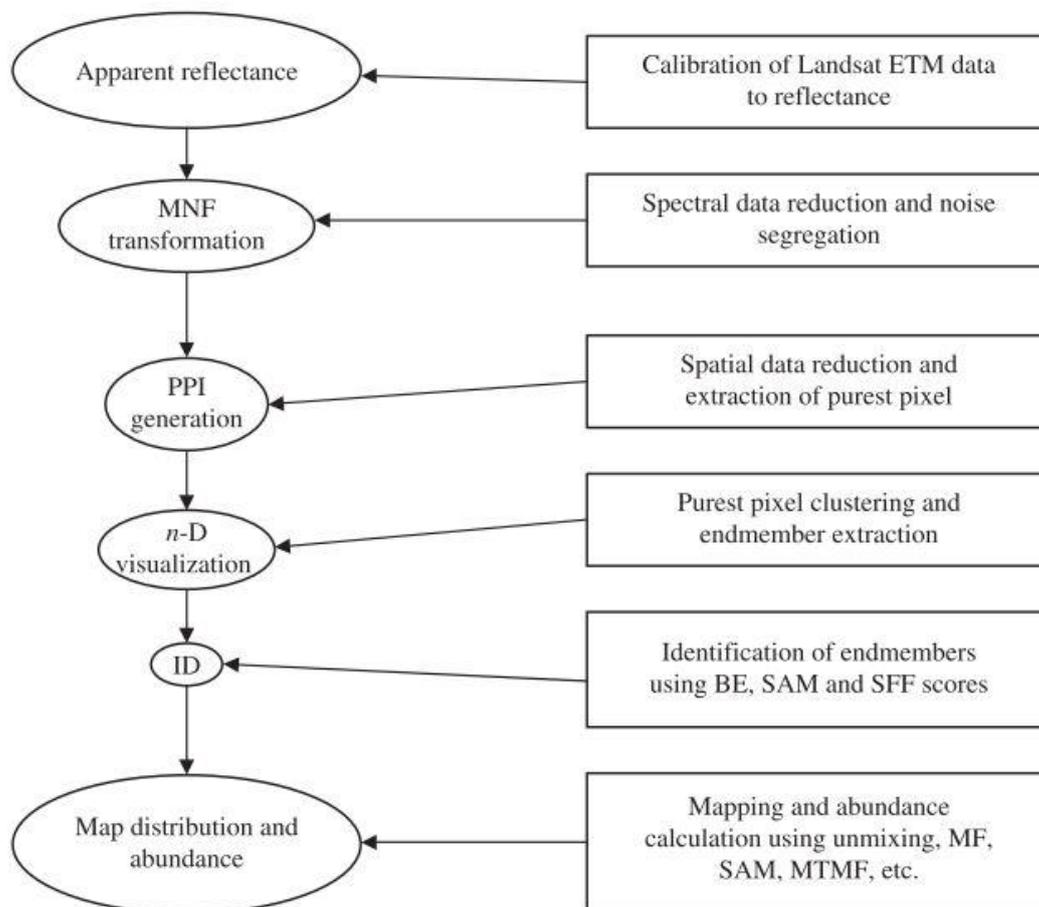


Figure 2.18 : Les différentes étapes de calculs de la méthode ASA. (Pal *et al.*, 2011)

La méthode permet en fait de décomposer la signature spectrale (pour chaque pixel) en un mélange de plusieurs composantes spectrales pures. Ces composantes pures sont alors comparées aux bibliothèques spectrales pour déterminer les minéraux auxquelles elles doivent correspondre. Cette méthode a permis d'identifier 6 phases principales pour toute la scène (magnétite, pyrite, kaolin, cuprite/chalcopyrite, sodalite et apatite) (Figure 2.19). La carte finale obtenue est la suivante (Figure 2.20).

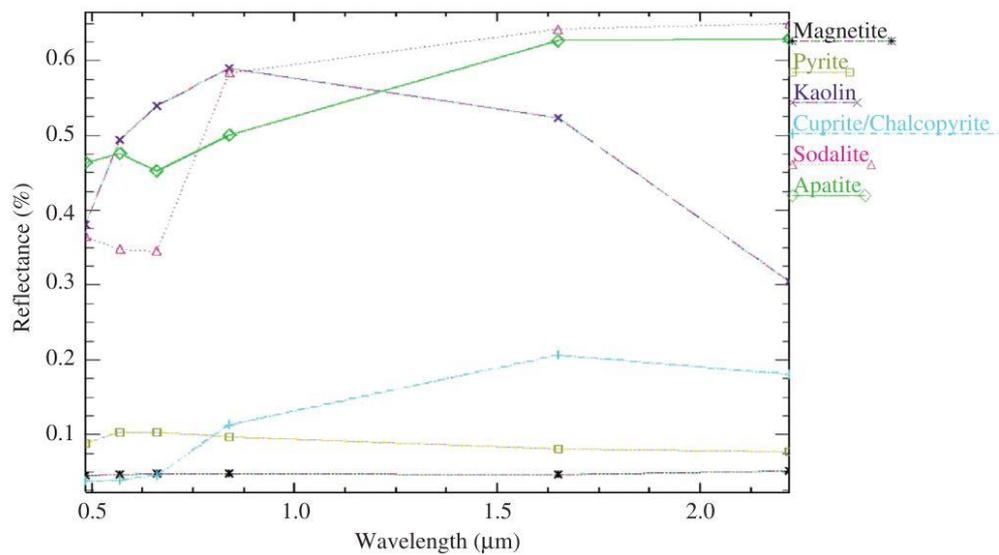


Figure 2.19 : Les différentes phases pures identifiées sur la scène étudiée. (Pal *et al.*, 2011)

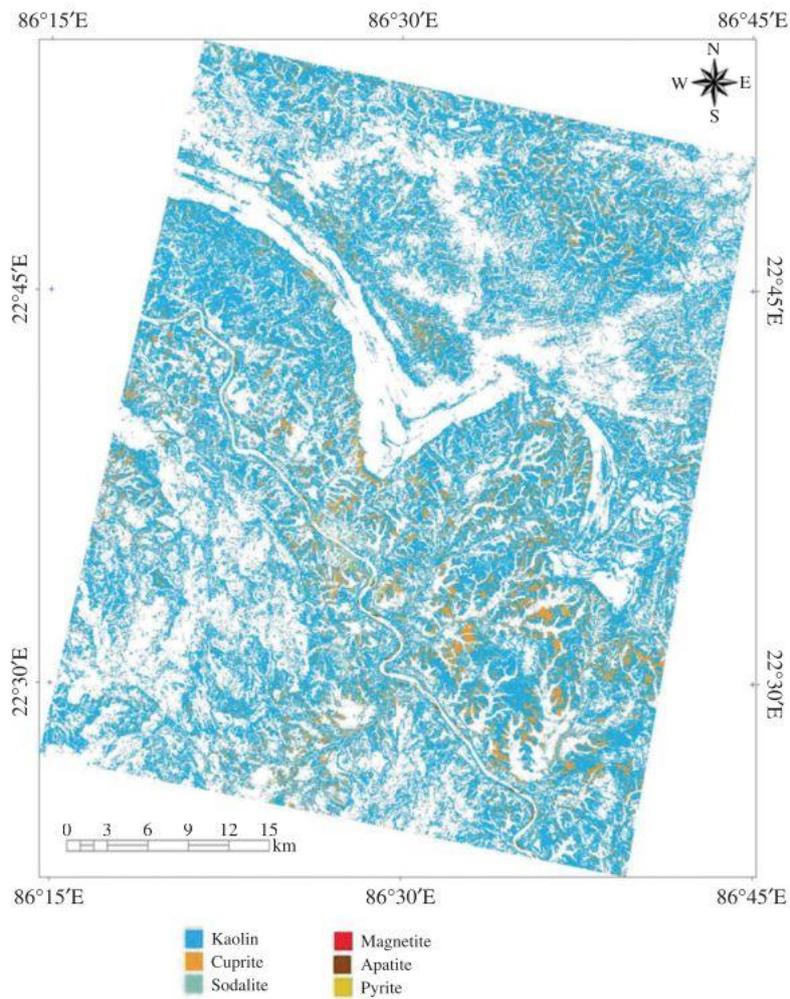


Figure 2.20 : Cartographie minéralogique finale. (Pal *et al.*, 2011)

Les zones présentées comme étant de la cuprite correspondent bien à des zones où l'on trouve des gisements de cuivre. Les gisements d'apatite sont néanmoins invisibles. De plus, la quasi-totalité des pixels sont cartographiés comme étant du kaolin, alors que cela est hautement improbable. Le kaolin se forme essentiellement par altération des feldspaths dans les massifs granitiques très évolués comme les leucogranites. La région présente de nombreux granites soumis ici à un climat propice à la formation de kaolin. Seulement, la cartographie aurait donc dû identifier le kaolin en surimposition des granites. Il semble que la signature des kaolins soit en réalité un mélange spectral bien plus complexe qu'il n'y paraît. La méthode ASA associée avec un capteur multispectral ne permet pas de faire des cartes minéralogiques précises. La carte nous dit seulement que deux minéraux, qui n'ont génétiquement rien en commun, composent l'essentiel de la scène. De plus, une des six composantes pures est censée être de la pyrite alors que même avec des capteurs hyperspectraux il est impossible de l'identifier. Elle présente un spectre quasi horizontal totalement masqué par la présence d'autres minéraux. Cette étude est un peu trop ambitieuse compte tenu des moyens utilisés. La carte finalement obtenue ne correspond pas à la réalité. Le fait qu'aucuns spectres de terrain n'ont été pris en est sûrement en partie la cause. La méthode de calcul lors du traitement des spectres est aussi très importante pour avoir de bons résultats. Pour chaque cas, il existe une méthode optimale. Il n'existe pas de solutions miracle.

C'est d'ailleurs ce que montrent Benhia *et al.*, dans leur étude l'année suivante (2012). Cette étude prévoyait de cartographier une zone dans la partie ouest du Minto Inlier sur l'île Victoria dans le Passage du Nord-Ouest. Contrairement à l'étude précédente, celle-ci se basait sur une méthode de classification supervisée à l'aide de nombreux spectres de terrains pris sur les différentes lithologies présentes. Les échantillons de références comprennent 314 échantillons de gabbro/diorite, 249 de carbonates de la formation de Wynniatt, 101 d'évaporites, 40 de carbonates Paléozoïques, 34 de basaltes et 5 échantillons de quartz-arénite de la formation de Kuujjua. Les images ont été prises avec le satellite Landsat-7 et SPOT-5. La méthode de classification utilise l'algorithme RCM (*Robust Classification Method*) (Figure 2.21). Cette méthode consiste à faire plusieurs itérations de classification à l'aide des spectres de références du terrain. Chaque pixel se voit attribuer une classe en fonction de sa probabilité de correspondre à un des spectres de références (basalte, carbonate, évaporite, etc.) Plus il y a d'itérations, plus la cartographie est précise et se rapproche de la réalité.

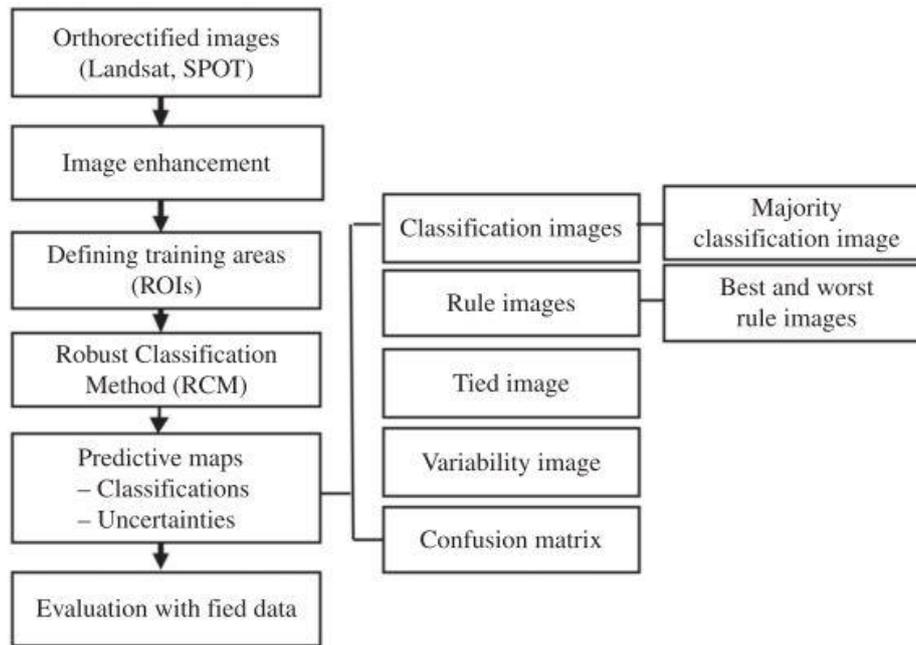


Figure 2.21 : Les différentes étapes de la classification par la méthode RCM. (Behnia *et al.*, 2012)

Pour que cette méthode fonctionne correctement, les différentes classes de références basées sur les spectres de terrains doivent être suffisamment discernables les unes des autres pour éviter des erreurs de classification. Ici, le grand nombre d'échantillons spectraux échantillonnés a permis de bien caractériser chaque classe. Les spectres les plus similaires sont considérés comme appartenant à la même classe. Cette méthode a ainsi permis de cartographier la zone avec les images de Landsat et de SPOT en produisant deux cartes similaires (Figure 2.22).

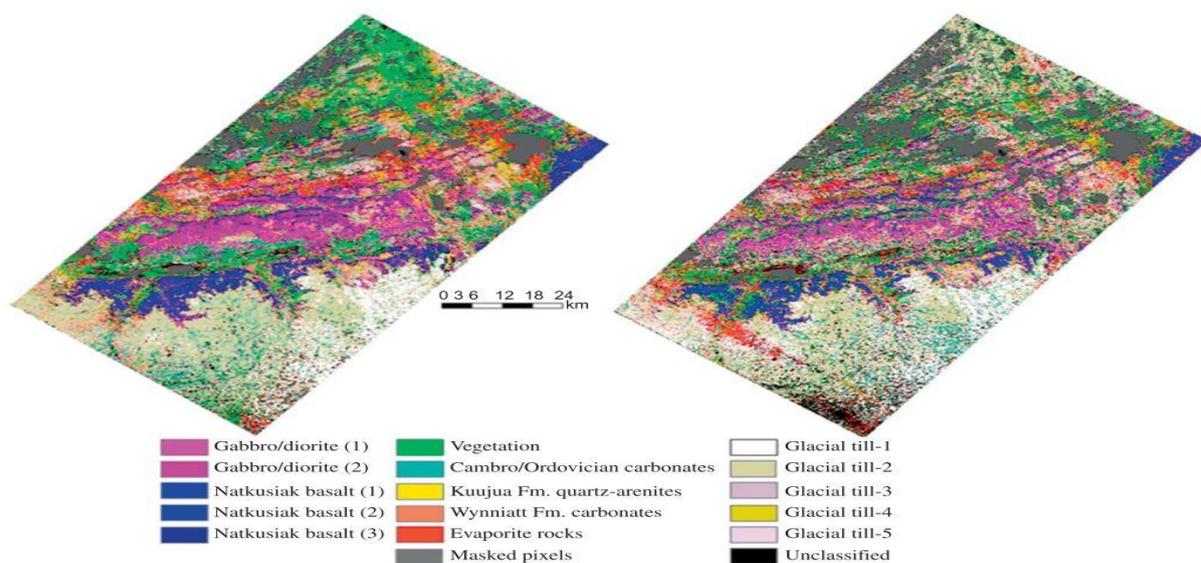


Figure 2.22 : Cartes géologiques produites à l'aide de la méthode RCM. Image Landsat à gauche et SPOT à droite. (Behnia *et al.*, 2012)

Les images Landsat ont permis une meilleure classification. Cela s'explique en partie par la plus faible résolution spectrale de Landsat. La meilleure résolution de SPOT a compliqué la classification en cartographiant plus de pixels entremêlés comme appartenant à des classes différentes. La moins bonne résolution de Landsat a permis de lisser la classification et ainsi améliorer le rendu final. Au final les images Landsat ont 87 % de précision contre 71 % pour SPOT. Seul le gabbro a mieux été cartographié sur les images SPOT.

On voit ici qu'avec le même satellite (Landsat-7), cette étude a permis une bien meilleure cartographie que l'étude précédente. Cela s'explique par la méthode de classification. Dans l'étude de Pal *et al.*, de 2011, la classification est automatique sans utiliser de références spectrales de terrain. Ils se sont uniquement basés sur des bibliothèques spectrales. Celles-ci sont bien moins précises que des spectres pris *in situ*. Ces derniers apportent une vérité de terrain permettant de construire de meilleures classifications. Il existe, de plus, de nombreux calculs et algorithmes de classification et il est important de choisir la bonne méthode pour le problème considéré. Dans certains cas, il faut même mettre au point une méthode nouvelle plus adaptée à l'objectif voulu.

Le développement de l'hyperspectral a permis de produire des cartes de meilleure qualité en bénéficiant d'une meilleure résolution spectrale mais au prix de plus de traitement numérique. Panteras *et al.*, en 2013 ont tenté de cartographier l'île grecque de Milos avec le capteur hyperspectral Hypérion à bord du satellite EO-I. L'étude prévoyait de cartographier la zone en n'utilisant pas de spectres de terrain. Le démixage spectral ne se fait qu'avec des spectres de références provenant de bibliothèques spectrales. Quatre spectres de références ont été ajoutés en plus car ils correspondent à des minéraux présents sur la zone d'après les connaissances des auteurs. Ces spectres supplémentaires permettent de comparer les cartes obtenues avec ou sans leur ajout (Figure 2.23).

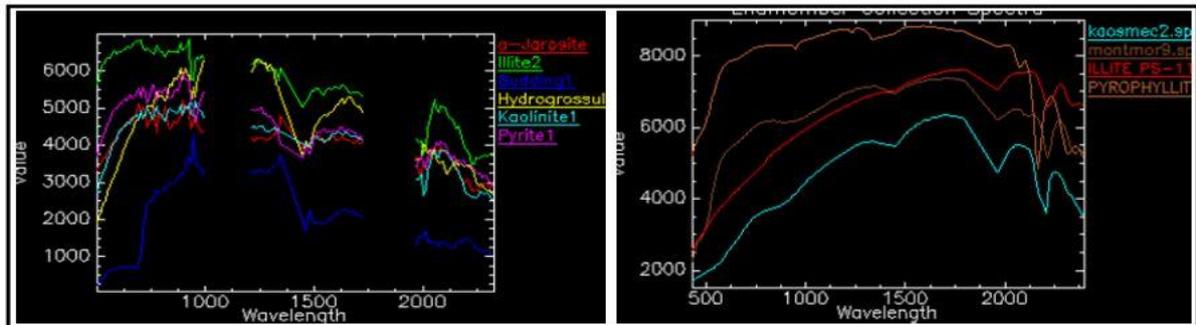


Figure 2.23 : A gauche, les spectres purs déterminés à partir des mélanges spectraux de l'image. À droite, les quatre spectres de références ajoutées grâce aux connaissances du site.

(Panteras *et al.*, 2013)

La classification des différents pixels est maintenant faite avec et sans les quatre spectres de références et avec différentes méthodes (SAM et MTMF). La méthode SAM est pertinente en utilisant des spectres de références pris *in situ* pour les comparer avec le mélange spectral et trouver les composantes pures. Dans le cas de la méthode MTMF, il n'est pas nécessaire d'avoir des spectres de terrains. Les deux méthodes sont ensuite comparées pour déterminer la plus efficace dans le cas présent. La méthode SAM ne devrait pas être idéale sachant qu'il n'y a pas de spectres de références pris directement sur le terrain mais uniquement des bibliothèques spectrales (Figure 2.24).

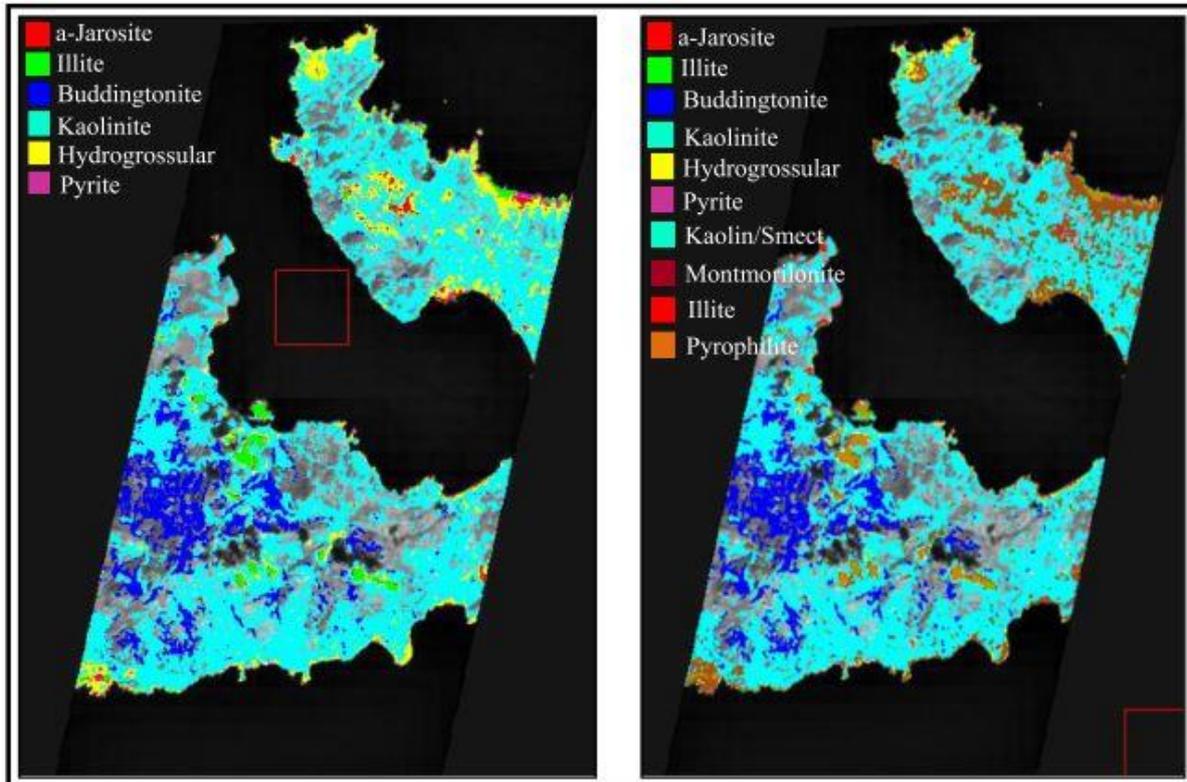


Figure 2.24 : Cartographie minéralogique de l'île de Milos avec la méthode SAM. À gauche, carte avec uniquement les composantes pures déterminées par le logiciel. À droite, carte avec l'ajout des quatre spectres de référence supplémentaires et caractéristiques de la zone.

(Panteras *et al.*, 2013)

Globalement, l'ajout des 4 spectres supplémentaires ne change pas significativement les résultats. On observe néanmoins que la signature de la pyrophyllite, qui est un mica, recoupe les signatures de l'illite et de l'hydrogrossulaire en partie, qui sont des micas également. De plus, on observe sur les deux cartes une exagération de l'identification de la kaolinite. C'est une erreur récurrente car la signature de la kaolinite peut être facilement confondue avec d'autres micas.

Pour la méthode MTMF, les résultats sont bien plus réalistes. De nombreux pixels n'ont pas été cartographiés mais ceux qui le sont, sont mieux définis. Il y a beaucoup moins de faux positifs (Figure 2.25).

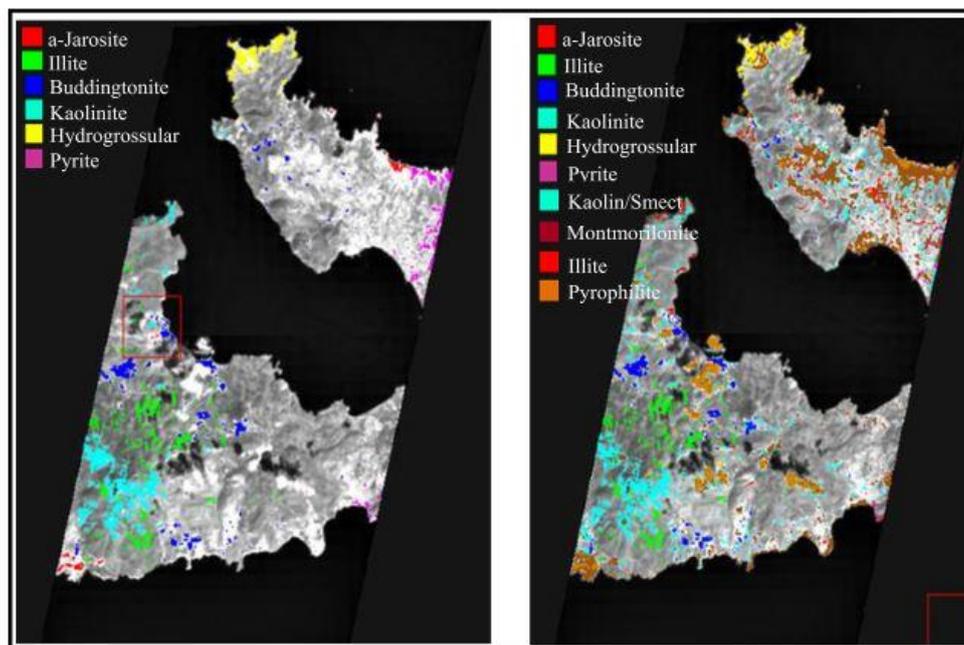


Figure 2.25 : Cartographie minéralogique de l'île de Milos avec la méthode MTMF. À gauche, carte avec uniquement les composantes pures déterminées par le logiciel. À droite, carte avec l'ajout des quatre spectres de référence supplémentaires et caractéristiques de la zone. (Panteras *et al.*, 2013)

Cette méthode donne de meilleurs résultats, plus proches de la réalité, malgré une faible quantité de pixels classifiés. On voit ici que la pyrophyllite recoupe moins les autres classes, en particulier dans la zone sud. L'ajout des spectres a permis de cartographier plus de pixels cette fois-ci. On remarque aussi que pour les deux méthodes (SAM et MTMF), il reste une zone cartographiée comme étant de l'hydrogrossulaire dans la pointe nord de l'île. Celle-ci n'est pas remplacée par la pyrophyllite, ce qui tend à montrer que cette zone correspond bien à de l'hydrogrossulaire. Or, il est connu par les auteurs que cette zone présente des mines de perlites. La perlite est un verre volcanique amorphe, donc non cristallisé, et hydraté. Le grossulaire est lui un silicate non hydraté (grenat). Le verre volcanique ne possède pas de plans cristallins puisqu'il est amorphe. Il n'y a pas de cristaux, bien que ce soit du matériel minéral, donc sa signature n'existe pas dans les bibliothèques spectrales. La perlite a donc été interprétée à tort comme de l'hydrogrossulaire. Cet exemple illustre encore une fois l'importance de bien connaître à *minima* la zone d'étude ou bien au mieux d'avoir pris des spectres de références sur le terrain.

Trois ans plus tard, une autre équipe est venue cartographier l'île pour, cette fois, tenter de cartographier les altérations présentes dans la partie ouest (Ferrier *et al.*, 2016). Pour cette étude,

des images multispectrales ont été acquise avec le satellite AVIRIS. Des spectres de terrains et de bibliothèques spectrales ont aussi été utilisés. Les algorithmes utilisés sont CEM, MNF et PPI. La topographie a également été prise en compte pour cartographier les différentes altérations (Figure 2.26).

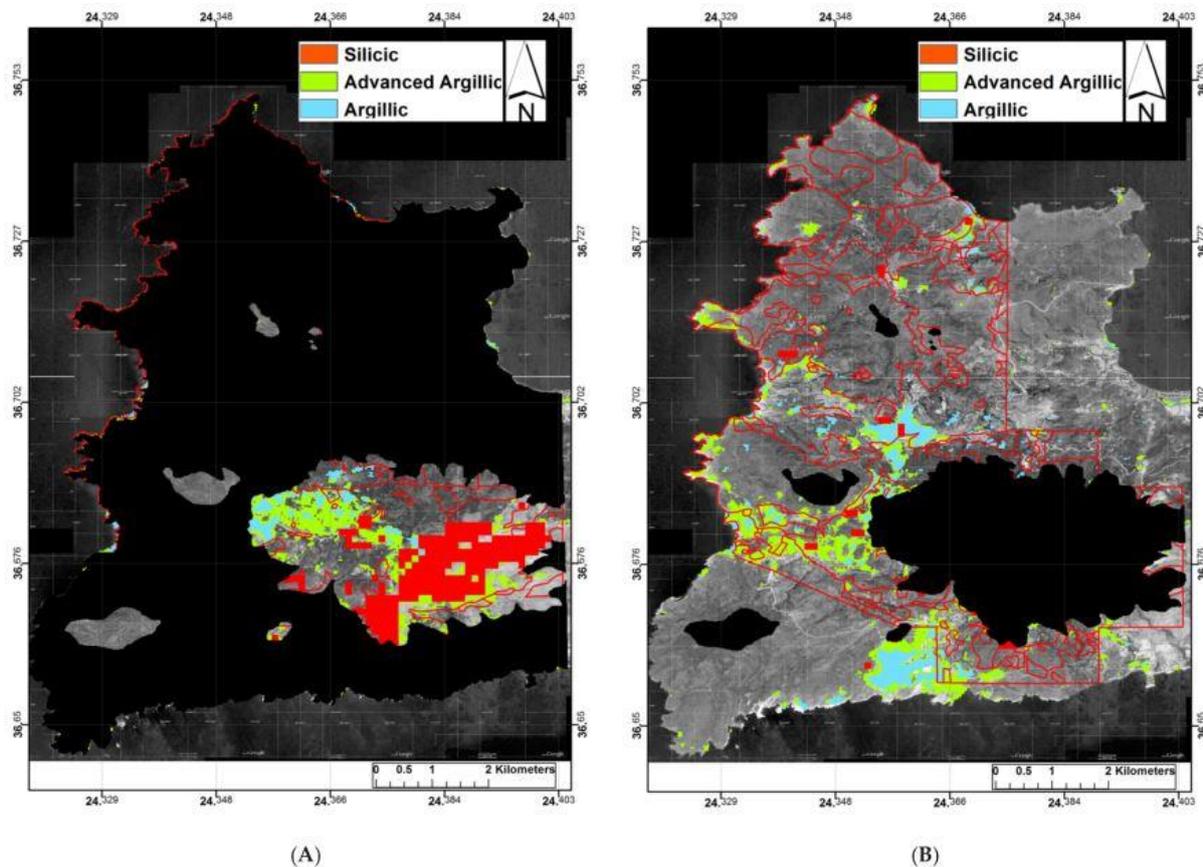


Figure 2.26 : Cartes d'altérations montrant en A une altération de type épithermale *low-sulphidation* au-dessus de 250 m et en B une altération argileuse avancé au-dessous de 250 m. (Ferrier *et al.*, 2016)

Ces images ont une meilleure précision que celles de l'étude de Panteras *et al.*, de 2013, alors que ces dernières avaient été prises avec un capteur hyperspectral. C'est encore une fois la méthode de traitement et d'analyse de l'image, appuyée par des spectres de terrain, qui ont permis une meilleure définition minéralogique et la possibilité de caractériser les altérations.

Il est aussi possible d'étudier les halos d'altérations en se concentrant sur certaines phases minérales particulières. C'est le cas de l'étude de Neal *et al.*, en 2018. Cette étude s'intéresse à l'exploration des porphyres cuprifère via leur étude de son halo d'altération et, en particulier, de la signature spectrale de la chlorite. En effet, la chlorite est une phase discriminante de la zone propylitique du halo d'altération entourant un porphyre cuprifère. Cette zone d'altération

est intéressante en télédétection car c'est la zone la plus distale au gisement qui peut être détectée sur de larges surfaces kilométriques même loin de la source hydrothermale. La zone d'étude se trouve sur l'île de Sumbawa dans l'archipel de Java en Indonésie. Cette île porte le gisement en exploitation de type porphyre cuprifère de Batu Hijau (Figure 2.27).

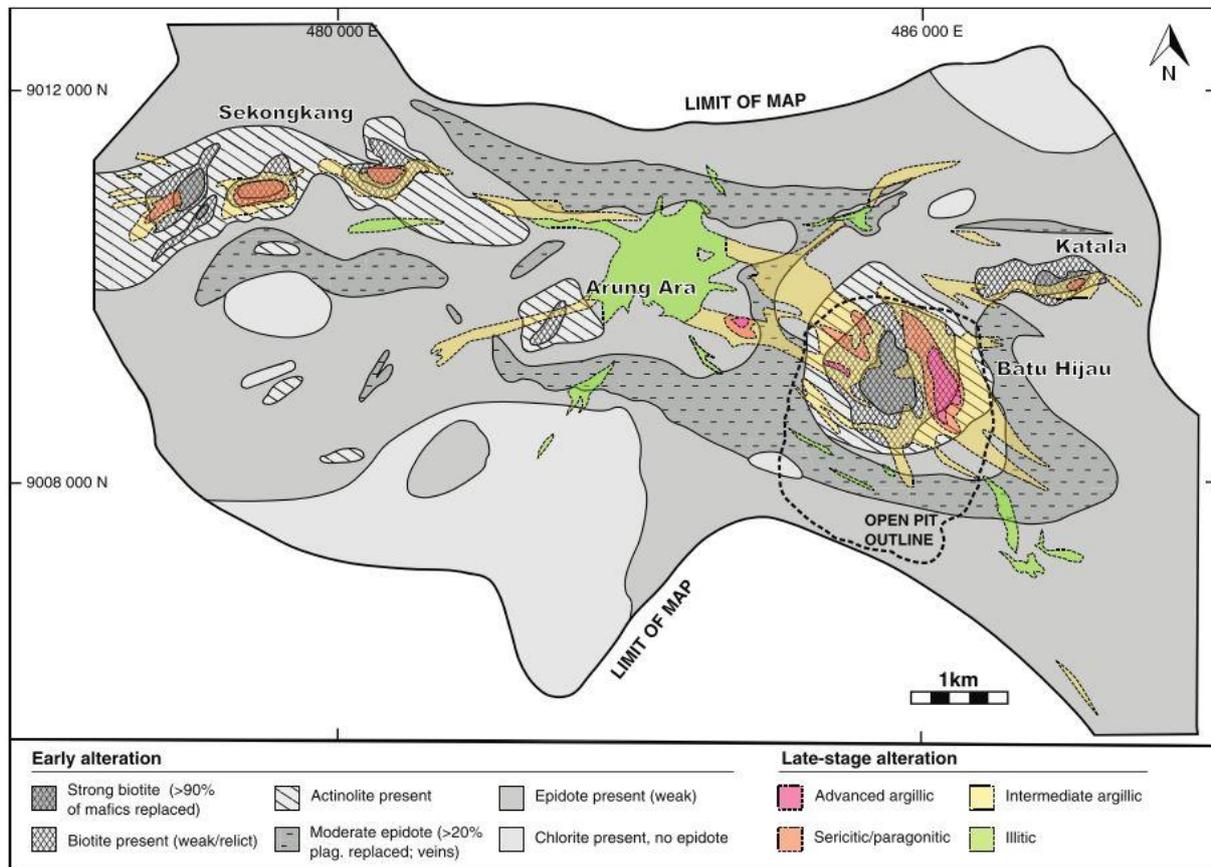


Figure 2.27 : Carte des altérations du district de Batu Hijau. (Neal *et al.*, 2018)

Cette étude consistait en l'étude de multiples signatures spectrales acquise sur le terrain à l'aide d'un spectromètre de terrain de type *ASD TerraSpec 4™*. À cette fin, 90 échantillons spectraux ont été échantillonnés et analysés à l'aide des logiciels d'identification minéralogique TSG (*The Spectral Geologist*) et TSA (*The Spectral Assistant*). Il est montré que dans cette région, mais possiblement ailleurs également, la chimie de la chlorite varie au sein de la zone propylitique. La proportion de Fe et Mg montre une corrélation inverse, l'un se substituant à l'autre. Le ratio $Mg/(Mg+Fe)$ varie de 0,78 à 0,52 sur l'ensemble des échantillons. De plus, ces variations ont été mises en lien avec des variations de signature spectrale de la chlorite. Il y a donc un lien entre ce contraste de chimie et les spectres correspondant. Pour des chlorites riches en Mg, deux pics caractéristiques de la chlorite (2250 nm et 2340 nm) sont légèrement décalés vers des

longueurs d'ondes plus faible. De plus l'enrichissement en Fe augmenterait ces pics d'absorption (Figure 2.28).

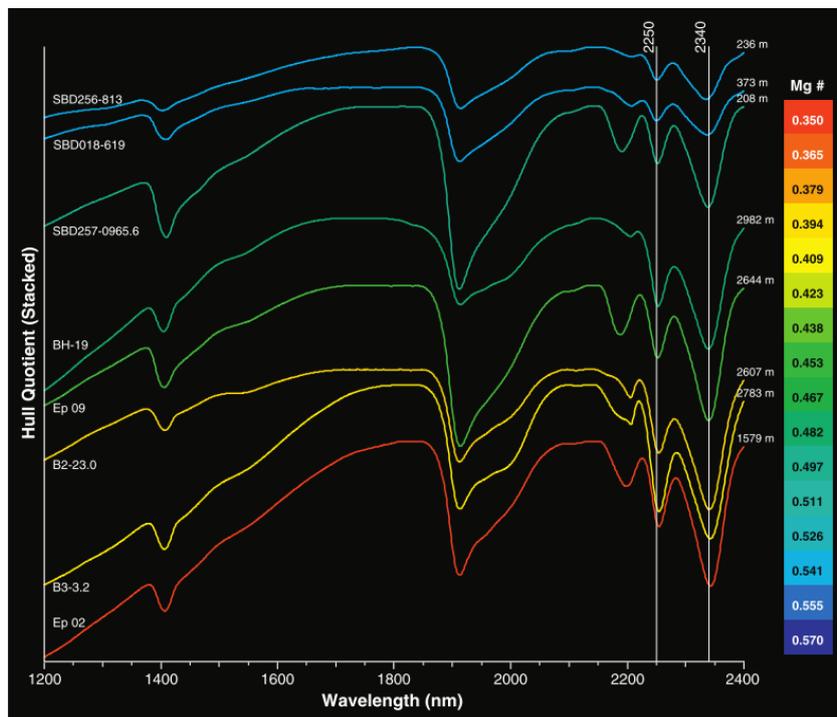


Figure 2.28 : Différents spectres de chlorites mis en relation avec le Mg number. (Neal *et al.*, 2018)

Il a été enfin montré que ces variations sont fonction de la distance avec le gisement. En se rapprochant de 1,6 km à 500 m du gisement, le pic à 2254 nm se déplace vers 2249 nm et le pic à 2343 nm vers 2332 nm. De la même façon, en se rapprochant du gisement, la profondeur des pics d'absorption diminue de 35 % à 5 %. Cela permet donc de faire le lien entre une variation de chimie de la chlorite révélatrice de sa proximité avec un dépôt cuprifère en étudiant sa signature spectrale. Cela en fait un outil très utile en exploration. Il faut toutefois préciser que de telles variations ont été mises en évidence à partir de spectres acquis avec un spectromètre de terrain. Si ces spectres avaient été acquis par satellite, la résolution spectrale n'aurait pas permis de mettre en évidence de léger déplacement des pics d'absorption à 2250 nm et 2340 nm. Par contre, il est possible d'identifier la variation de profondeur de ces mêmes pics via des capteurs satellites. Cette étude apporte donc bien un nouvel outil de prospection des gisements de porphyres cuprifères via l'étude de la zone d'altération propylitique.

2.3.7 – Suivis environnementaux

La possibilité qu'offre la télédétection en matière d'identification minéralogiques est aussi un outil puissant en environnement. Il est alors possible de cartographier des sites pollués et tenter de caractériser la source et la nature de la pollution. La télédétection a particulièrement été utilisée dans les contextes de drainage minier acide (Riaza *et al.*, 2011). Un des enjeux majeurs est donc de pouvoir identifier les minéraux secondaires associés au DMA. C'est à ce problème que l'étude de Riaza *et al.*, en 2011 a tenté de répondre. Cette étude avait pour but de prendre des spectres de terrain sur un ancien site minier de l'IPB (*Iberic Pyrite Belt*) en Espagne pour caractériser les différents minéraux secondaires. L'IPB est une région d'Espagne très polluée par plusieurs siècles d'exploitation de la pyrite. Des échantillons d'encroûtements et de minéraux efflorescents ont été récupérés en juin et laissés à l'extérieur jusqu'en septembre pour s'oxyder naturellement. Des spectres ont été pris au mois de juillet, août et septembre pour voir s'il y avait un changement de minéralogie avec le développement de l'oxydation.

Les échantillons spectraux et rocheux ont été prélevés à trois endroits différents : sur un parc à résidus, sur les bords d'un bassin de rétention d'eau et le long d'un segment de cours d'eau contaminé. Les spectres ont donc été pris une fois sur le terrain en juillet, puis sur des échantillons représentatifs pendant les mois de juillet, août et septembre. Cette méthode permet de suivre l'évolution minéralogique en fonction du temps et du climat. Les mesures sont faites en été à la période où les encroûtements se forment à cause de l'évaporation et de la sursaturation des métaux dans l'eau. L'identification des minéraux à partir des spectres a été réalisée avec plusieurs méthodes de calculs : SAM (*Spectral Angle Mapper*), SFF (*Spectral Feature Fitting*) et BE (*Binary Encoding*). La bibliothèque spectrale de l'USGS a été utilisée comme référence.

Pour le parc à résidus, trois signatures possibles ont été identifiées : schwertmannite-jarosite-goethite, gypse-copiapite-mélanterite et copiapite-halotrichite-mélanterite. L'échantillon pris sur cette zone a vu sa signature spectrale légèrement évoluer depuis une signature de gypse-copiapite-mélanterite en juillet puis gypse-copiapite-jarosite en août et enfin schwertmannite-jarosite-goethite en septembre (Figure 2.29). La signature du gypse a tendance à s'estomper en se déshydratant. À la fin de l'été, le gypse n'est plus identifié. On observe une gradation de l'oxydation de juillet à septembre avec une phase précoce comme la mélanterite en juillet et la présence de goethite en septembre.

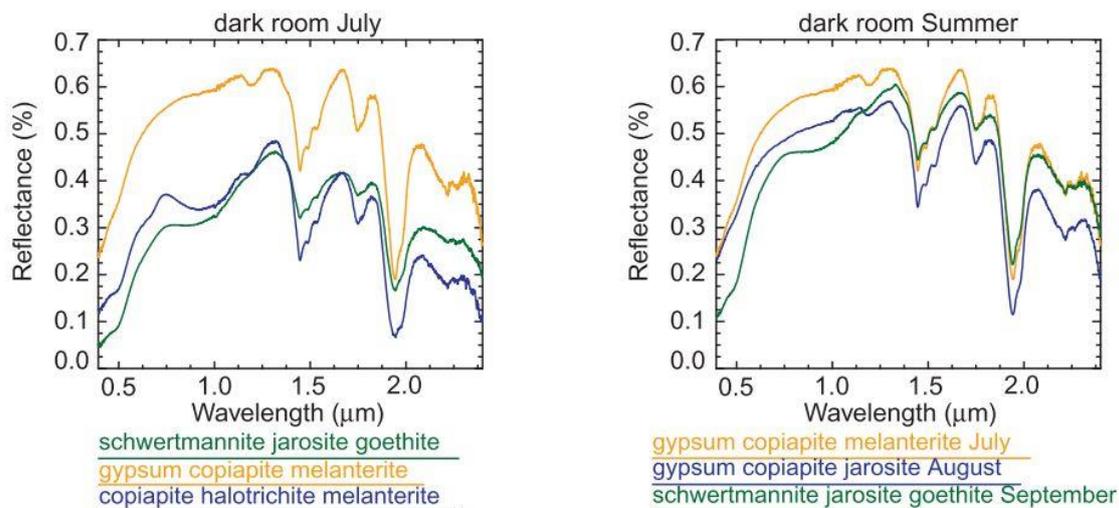


Figure 2.29 : Spectres acquis sur les bords du bassin de rétention. (Riaza *et al.*, 2011)

Pour les murs du bassin de rétention, on observe le même phénomène. Les phases les plus proches de la surface de l'eau sont des phases précoces (copiapite, ferricopiapite) vers des espèces plus oxydées comme la ferrihydrite et la goéthite. On observe une gradation de la couleur depuis un jaune pâle proche de l'eau vers le brun rouge (Figure 2.30).

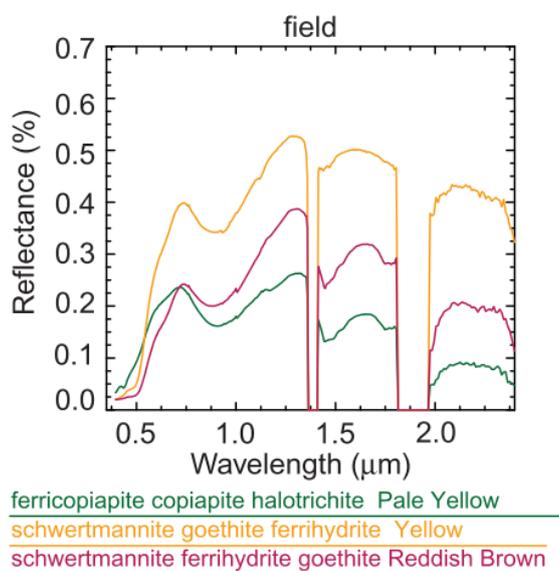


Figure 2.30 : Spectres acquis sur le parc à résidus. (Riaza *et al.*, 2011)

Dans le cours d'eau, des mesures ont été prises le long d'un transect dans un banc de galet. Le banc présente différentes couleurs indiquant la baisse progressive du niveau de l'eau par certains minéraux. Deux bandes de couleurs ont été identifiées : une jaune pâle et une brun rouge. Les spectres et échantillons ont été prélevés sur ces bancs. De la même façon, on passe d'une signature à jarosite-schwertmannite-goéthite pour la bande jaune pâle à une signature

légèrement plus oxydée de schwertmannite-goethite-jarosite pour la bande brun rouge. Ces deux bandes ont aussi été échantillonnées pour les laisser s'oxyder pendant l'été. Là aussi on observe une progression de l'oxydation au sein des deux bancs (Figure 2.31). On passe d'une signature à jarosite-schwertmannite-goethite pour la bande jaune pâle en juillet à goethite-schwertmannite-jarosite en août. Pour la bande brun rouge, on passe de schwertmannite-goethite-jarosite en juillet à goethite-schwertmannite-ferrhydrite en septembre.

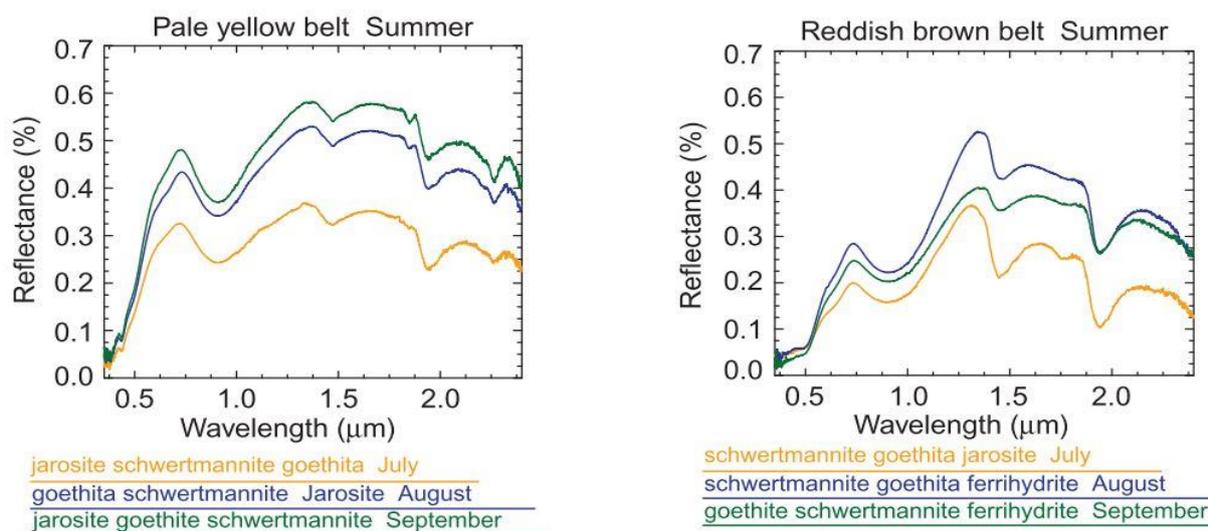


Figure 2.31 : Spectres acquis sur des bancs de galets dans le cours d'eau. (Riaza *et al.*, 2011)

Ces mesures spectrales de terrain ont permis d'observer, à l'échelle du site, le passage de phases hydratées relativement peu oxydées (copiapite, ferricopiapite) vers des phases moins hydratées et plus oxydées (goethite, ferrhydrite). Pour l'identification minéralogique, c'est la méthode de calcul SAM qui est la plus efficace, les autres méthodes (SSF et BE) n'ont pas permis de discerner les assemblages minéralogiques.

Il est donc possible d'identifier les minéraux marqueurs du DMA, et même d'observer les changements minéralogiques en fonction du degré d'oxydation. La même équipe a ensuite essayé d'appliquer ces résultats au cas d'un cours d'eau contaminé dans la même région (Riaza *et al.*, 2012). Cette étude visait à cartographier un cours d'eau contaminé par du DMA depuis l'amont jusqu'à son mélange avec l'eau de mer dans l'estuaire en aval. La rivière étudiée était la rivière Odiel dans le sud de l'Espagne, là aussi au sein de l'IPB. Dans la région, les précipitations ont lieu en automne et de façon courte et intense. Durant cette période, les sites miniers sont lessivés et cela provoque une baisse du pH dans les cours d'eau. Le reste de l'année est sec, l'oxydation se prolonge de l'hiver à l'été. Le pH du cours d'eau étudié est de 3,5.

Les images ont été prises par un capteur hyperspectral aéroporté Hymap. Il possède 128 bandes de 0,45 à 2,5 μm avec une résolution spectrale de 15 à 20 nm et une résolution de terrain de 4 m. De plus, de très nombreux spectres de terrain (500) ont été acquis sur le site d'étude. Ces spectres vont permettre d'améliorer la classification de l'image en apportant une vérité de terrain. La réponse spectrale d'Hymap est fonction de la taille des grains. On peut distinguer sur l'image des bancs de galets, des bancs de sables et de la vase (Figure 2.32). Les cinq classes présentées sont basées sur la signature spectrale des produits d'oxydation de la pyrite (Figure 2.33).

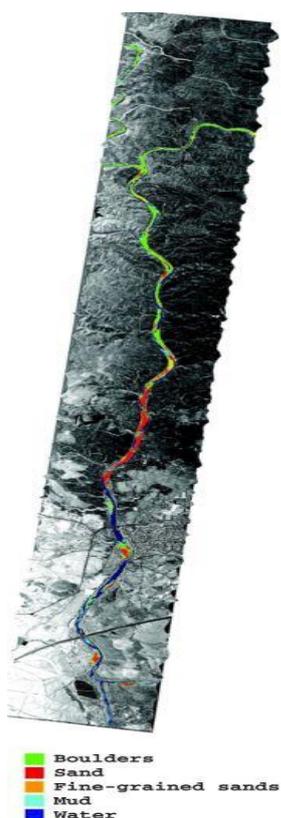


Figure 2.32 : Images Hymap de la rivière Odiel. On distingue trois parties distinctes. La première dominée par les galets, la seconde par le sable et la dernière par la vase. (Riaza *et al.*, 2012)

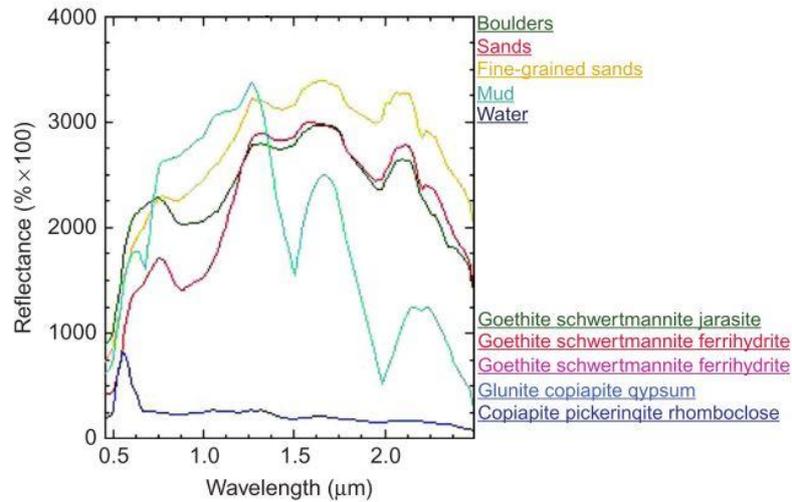


Figure 2.33 : Les différentes compositions spectrales des 5 classes identifiées. (Riaza *et al.*, 2012)

Les bancs sont caractérisés par la présence de goethite qui tapisse une bonne partie du cours d'eau. La vase est identifiée par les sulfates de fer hydratés (copiapite). La signature de l'eau est similaire à celle de la vase avec Hymap. Ce n'est qu'avec l'aide des spectres de terrain qu'il est possible de les différencier. Cette image permet d'identifier 3 portions distinctes de granulométrie décroissante dans le cours d'eau. La première partie la plus en amont est caractérisée par la présence de bancs de galets. La seconde, intermédiaire, présente des bancs de sables. La dernière partie la plus en aval et qui se jette dans l'estuaire est constituée de vase principalement. À mesure que le débit diminue en allant vers l'aval, la granulométrie de la charge sédimentaire diminue également. Pour chacune de ces sections, les spectres de terrain, ont été utilisés pour redéfinir les 5 classes. En effet, les signatures spectrales de ces 5 ensembles varient le long du cours d'eau. Pour harmoniser les réponses spectrales, il faut redéfinir les 5 classes pour les 3 sections (Figure 2.34).

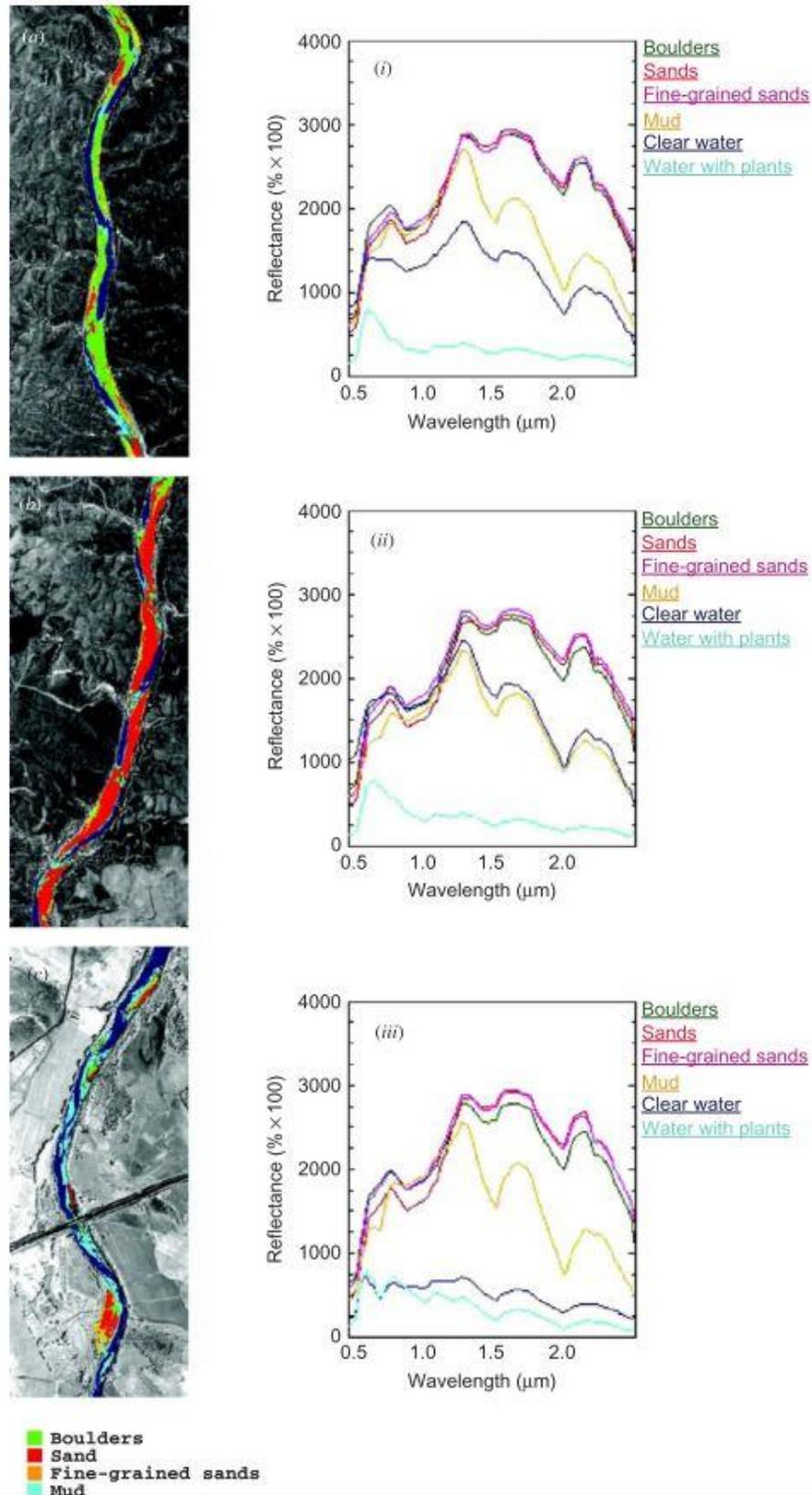


Figure 2.34 : Les variations spectrales des différentes classes en fonction de la portion du cours d'eau. (Riaza *et al.*, 2012)

On observe, par exemple, que la signature spectrale de l'eau est différente dans la troisième portion du cours d'eau. Dans cette portion de la rivière, il y a un mélange d'eau douce et d'eau salée. Cela a pour conséquence une augmentation du pH et une neutralisation de l'eau acide, ce qui change sa signature spectrale. De plus, la montée du pH permet le développement d'une flore aquatique qui impose sa signature à celle de l'eau. Il reste quelques bancs de galets et de sables dans la dernière partie de la rivière. Leur signature est légèrement différente à cause de la présence de sels dû à l'eau salée comme la halite ou la carnallite. Pour le reste des signatures spectrales, les variations sont plus minimales.

La cartographie du cours d'eau est ici très dépendante de l'apport des spectres de terrain pour la reconnaissance des 5 classes. La seule image Hymap traitée avec des spectres provenant d'une bibliothèque spectrale n'aurait pas permis de définir les 5 classes sur toute la longueur du cours d'eau. De plus, les signatures de terrain permettent aussi d'éviter les erreurs d'interprétation. La signature de l'eau, par exemple, peut être confondue avec des sulfates de fer hydratés. Les images Hymap seules ne donnent que peu de détails. Seule la vase a une signature suffisamment particulière pour être bien reconnue. Le défi de ce genre de cartographie est de bien délimiter les abords du cours d'eau. C'est particulièrement difficile quand ils sont bordés de végétation et que la signature de l'eau présente des signes de végétation. De plus, le tapissage du fond du cours d'eau par des encroutements de minéraux peut également compliquer l'identification. Cette étude a permis de cartographier le mélange d'une eau acide avec de l'eau salée et ses conséquences sur sa chimie (Figure 2.35). Cette étude démontre qu'il est possible d'identifier et caractériser la pollution d'un cours d'eau par le DMA.

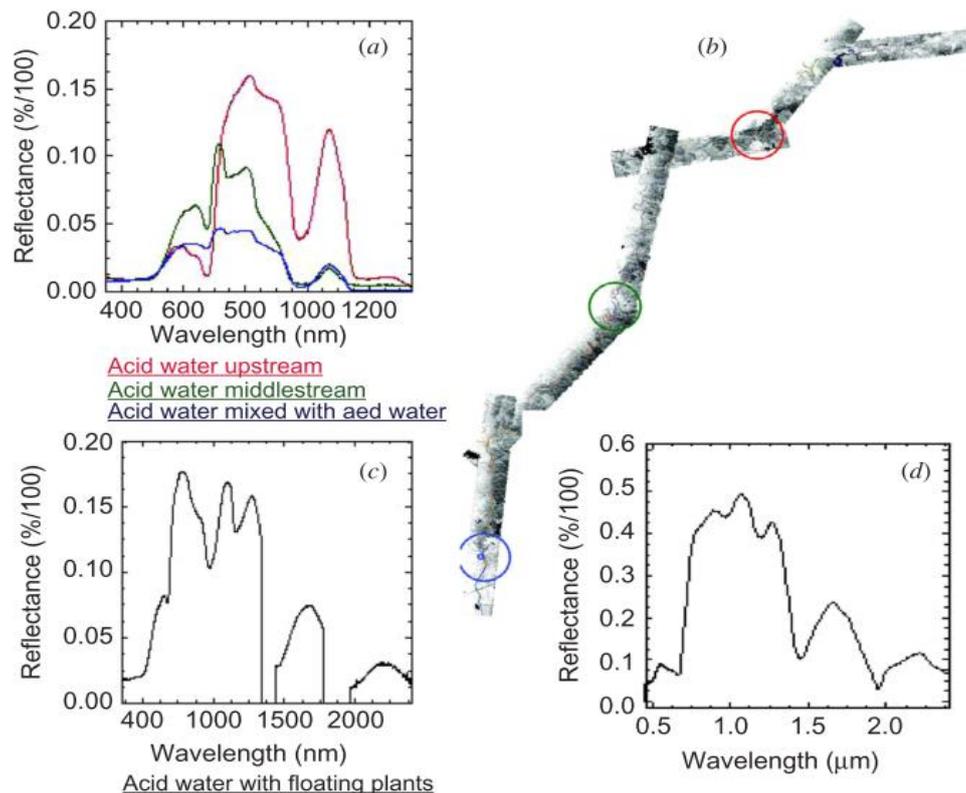


Figure 2.35 : Les différentes signatures spectrales de l'eau le long du cours d'eau. (Riaza *et al.*, 2012)

D'autres études, comme celle de Borisova *et al.*, en 2013, le travail consiste à préciser la détermination des différents oxy-hydroxydes de fer largement présent à différents degrés d'oxydation dans les contextes de DMA. Cette étude proposait une méthode pour mieux identifier les différents oxydes et autres minéraux porteurs de fer. Cette identification est basée sur la détermination du pourcentage de fer. La zone étudiée est une province minière de Bulgarie où il y a eu plus de 30 ans d'exploitation du fer. Une quarantaine d'échantillons de sols ont été prélevés sur le terrain. Dans la région, on reconnaît plus de 92 espèces minérales dont les principales sont l'hématite, la goéthite et la sidérite. Il y a aussi de la barytine en association avec le minerai qui peut faire varier les réponses spectrales.

Il est possible de lier l'amplitude du pic d'absorption autour de 0,8 μm à la proportion de fer. Une relation entre l'intensité du pic d'absorption et la proportion en fer a donc été établie (Figure 2.36).

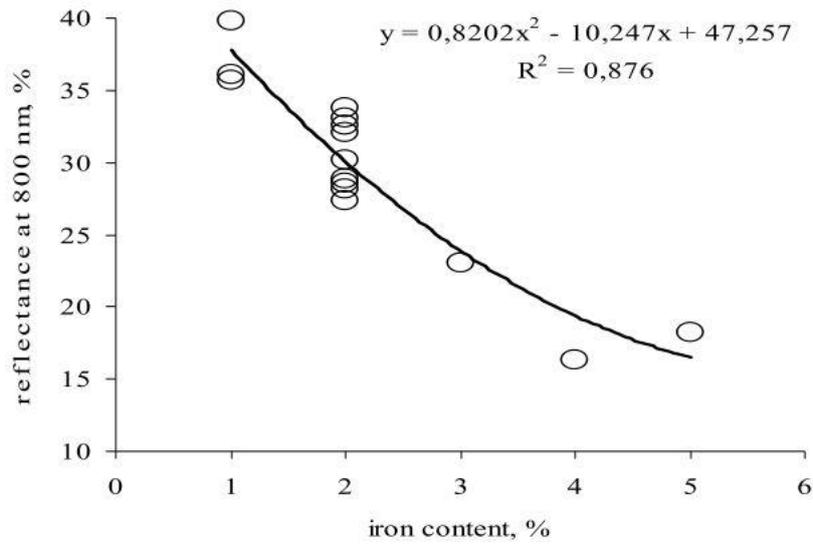


Figure 2.36 : Relation entre l'intensité du pic d'absorption à 0,8 μm et la proportion de fer de l'échantillon. (Borisova *et al.*, 2013)

Sur le terrain, les réponses spectrales sont des mélanges de différents minéraux. Il faut donc prévoir l'effet de ces mélanges sur le pourcentage de goéthite de l'échantillon pour mieux évaluer la proportion de fer (Figure 2.37).

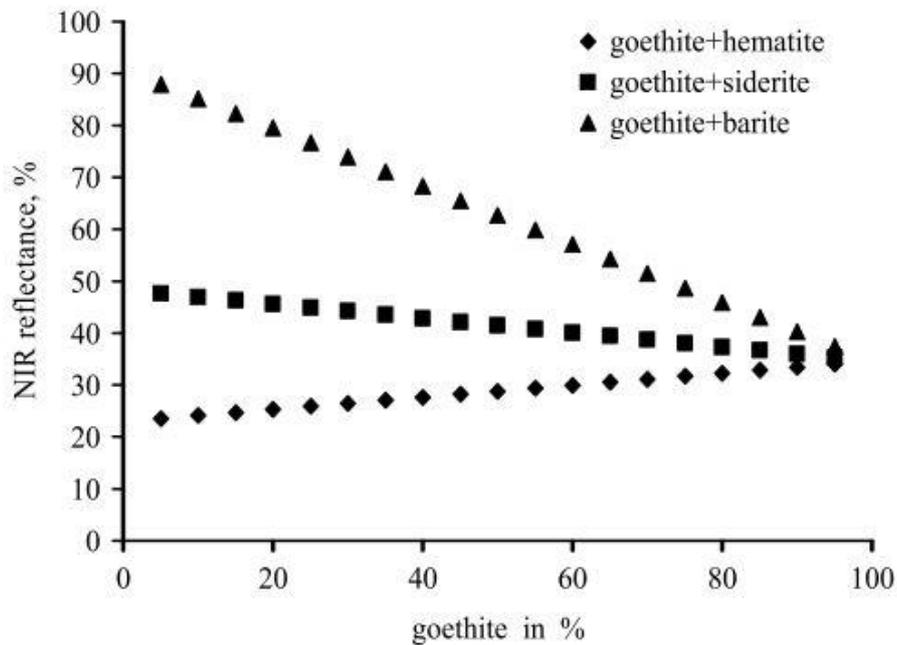


Figure 2.37 : Pourcentage de goéthite pour différents assemblages minéralogiques. (Borisova *et al.*, 2013)

Cette étude présente un outil permettant de mieux préciser la chimie et la minéralogie des minéraux ferrifères. Ce sont des minéraux très répandus, en particulier dans les contextes miniers. C'est donc un outil très intéressant pour bien cartographier les différents oxy-hydroxydes de fer sur un site minier.

La possibilité de pouvoir discerner efficacement les différents oxy-hydroxydes de fer a permis d'améliorer la cartographie des sites miniers contaminés en DMA et même de faire un lien entre les espèces identifiées et le pH *in situ*. C'est pourquoi l'étude de Quental *et al.*, de 2013 propose une cartographie de la fosse de la mine de S.Domingos dans la partie portugaise de l'IPB. L'objectif est de cartographier les minéraux secondaires du DMA présents sur le site pour pouvoir établir une relation spatiale entre ces minéraux et le pH. Les images ont été prises avec un capteur HyMap. De plus, 92 spectres ont été acquis sur le terrain. Des séquences minéralogiques comme copiapite–jarosite–goethite–hématite traduisent une augmentation du pH. L'enjeu de cette étude était de déterminer la présence et la configuration spatiale de ces phases minérales pour en déduire le pH.

La méthode de traitement de l'image est classique et fait appel à des algorithmes bien connus (MNF, PPI, SAM) (Figure 2.38), seulement ici deux cartes ont été comparées. Une première carte est faite considérant uniquement les spectres de référence de la bibliothèque spectrale de l'USGS, puis une autre utilisant les spectres pris directement sur le terrain. Les pixels qui recourent correctement les deux images permettent de construire la carte finale. Les spectres de terrains sont plus précis que les spectres de laboratoire des bibliothèques. Ces derniers sont pris sur des minéraux purs dans des conditions idéales. Il est intéressant de comparer l'apport des deux jeux de spectres.

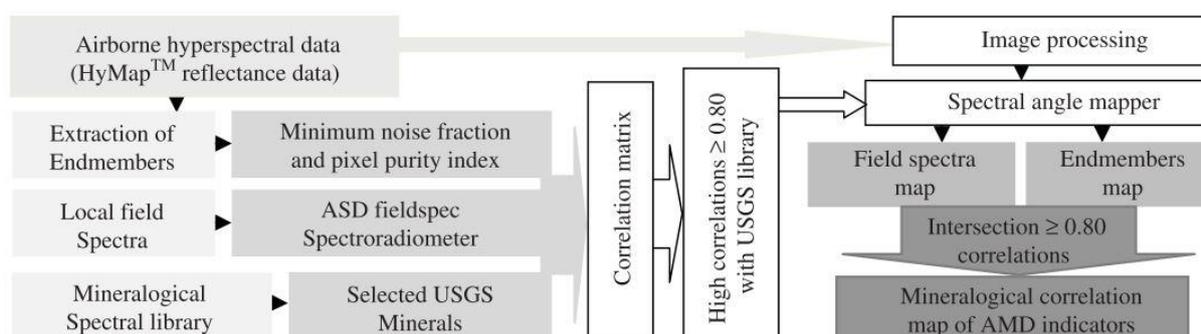


Figure 2.38 : Organigramme des étapes de traitement de l'image. (Quental *et al.*, 2013)

Sur les 92 spectres de terrain, 23 montrent une forte corrélation avec les spectres de la bibliothèque spectrale. Sur les 96 composantes identifiées sur l'image, 20 ont une forte corrélation avec la bibliothèque spectrale. L'outil SAM permet donc de produire 2 images, une

basée sur les spectres de terrain et l'autre sur les spectres de la bibliothèque spectrale (Figure 2.39).

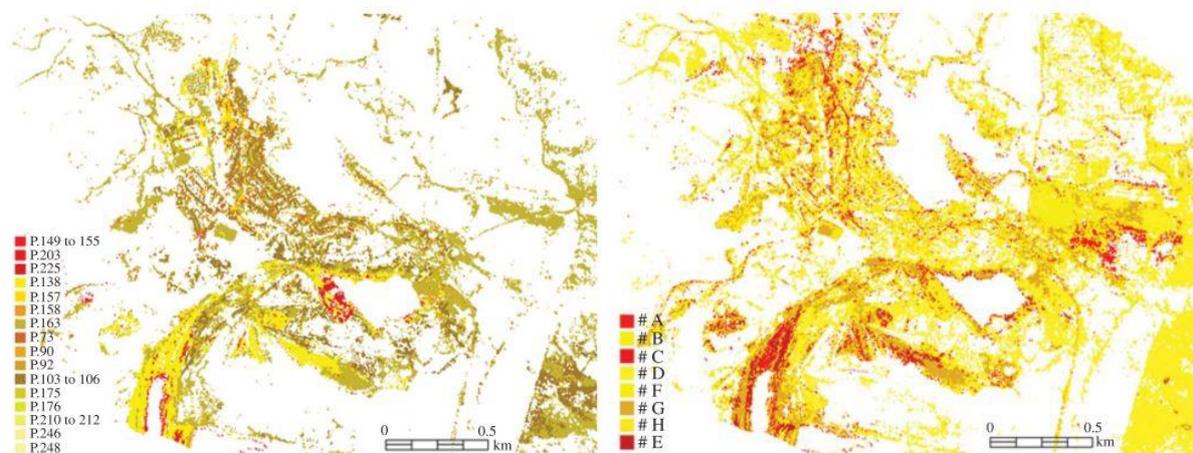


Figure 2.39 : Les deux cartes des composantes pures produites avec les différents jeux de spectres. Les classes ne correspondent pas à des minéraux en particuliers. (Quental *et al.*, 2013)

La carte finale est construite avec les pixels ayant des signatures suffisamment corrélées sur les deux images. Les zones comprenant un trop grand mélange de minéraux indicateurs de plusieurs gammes de pH sont retirées. Elles ne sont pas suffisamment informatives en termes de gradient de pH. Sur la carte finale, seules trois classes ont été retenues mais elles sont suffisamment distinctes pour révéler la répartition spatiale du pH (Figure 2.40).

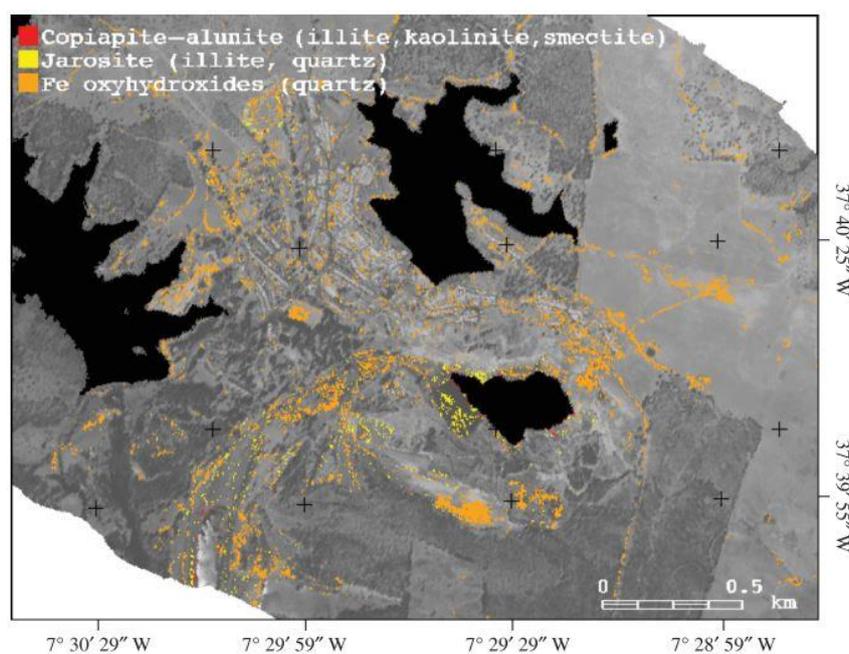


Figure 2.40 : Carte minéralogiques finale provenant de la fusion des deux autres images. (Quental *et al.*, 2013)

Ce sont les variations de pH qui sont mises en exergue ici, plus que des compositions minéralogiques précises. On voit que, là aussi, de nombreux pixels ne sont pas classés. Néanmoins, les signatures des pixels qui ont été classés ont une très forte probabilité d'être correctes. Les classes rouges et jaunes correspondent aux pH les plus bas, jusqu'à pH 3 – 4,5 alors que la classe orange avec la goethite correspond à un pH aux alentours de 5,5. La fosse est le plan d'eau qui se situe au sud-est de l'image. Le village est situé entre les deux lacs de la partie nord. Or, on constate que la pollution du site minier se prolonge sur les axes routiers et dans le village. L'exploitation, et la pollution conséquente, datant de l'époque romaine, les habitations sont parfois construites avec des matériaux locaux déjà pollués et présentant des minéraux secondaires du DMA. Pour le cas de cette étude, on constate que c'est l'apport combiné des deux sources de spectres qui a permis de faire la meilleure classification.

La télédétection peut aussi servir à suivre l'évolution d'un site minier au cours du temps. C'est l'objet de l'étude de Buzzi *et al.*, en 2014. Cette étude avait pour objectif de cartographier le site minier de Sotiel, contaminé par du DMA et située dans l'IBP, au cours de sa restauration de 2005 à 2009. Pour cela, des images Hymap ont été prises en 2005, 2008 et 2009 pour suivre l'avancée des travaux et ses conséquences sur la nature et la répartition spatiale des minéraux secondaires. La zone d'étude comprend un parc à scories, une usine de traitement de minerai et un parc à boue de sulfurée (Figure 2.41).

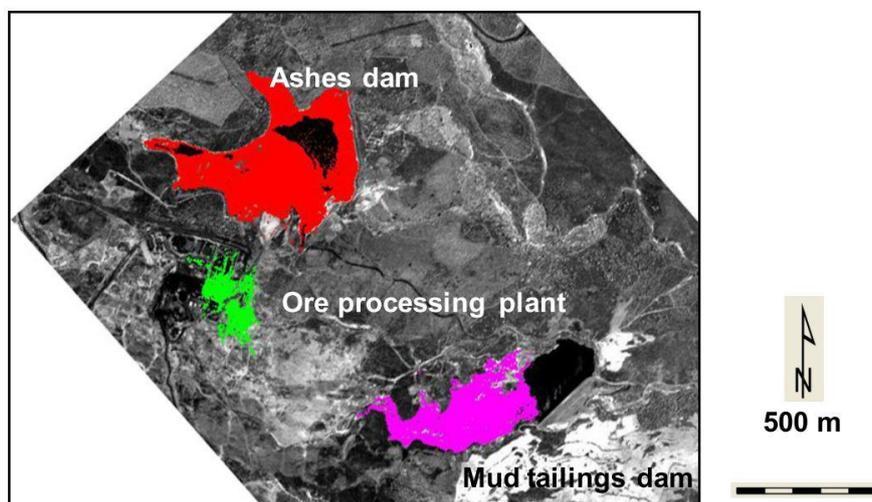


Figure 2.41 : Site d'étude présentant et ses différentes composantes. (Buzzi *et al.*, 2014)

De nombreux spectres de terrain ont été acquis (287) et 45 spectres supplémentaires ont été pris sur des échantillons en chambre noire. De plus, 18 spectres provenant de bibliothèques spectrales et correspondant à des produits d'oxydation de la pyrite ont été ajoutés. Trois

algorithmes ont été utilisés conjointement (SAM, SFF et BE) pour construire les cartes minéralogiques (Figure 2.42).

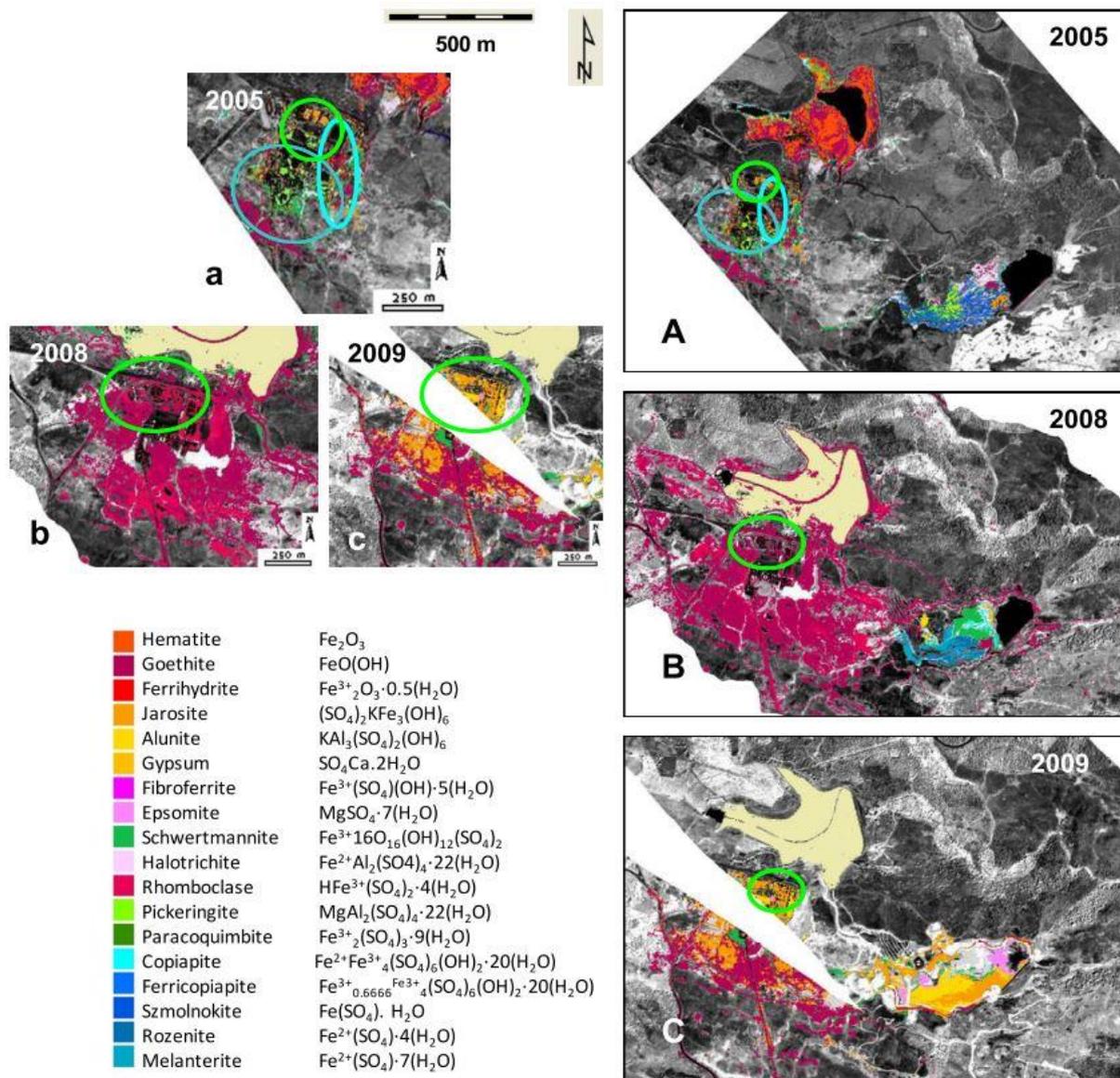


Figure 2.42 : Les différentes cartes produites pour les années 2005, 2008 et 2009. (Buzzi *et al.*, 2014)

En 2005, on constate que le parc à scorie au nord est largement oxydé avec des espèces comme la goethite et l'hématite. Le parc a ensuite été réhabilité en 2006. Les cendres ont été extraites et l'eau drainée. Le parc a finalement été comblé et végétalisé. Sur les images de 2008 et 2009 le parc est recouvert d'herbes (Figure 2.42B et C). La zone autour du parc réhabilité est largement recouverte de goethite en 2008, sûrement à cause des travaux de déblaiement du parc. En 2009, on remarque un retour de l'acidité avec l'apparition de la jarosite à cause d'une saison plus humide (Figure 2.42C, cercle vert). En 2005, le parc à boue présente des minéraux

d'altérations de la pyrite très hydratés comme le montre la présence de szmolnokite, rozénite et mélanterite. On remarque la présence d'une phase moins acide, la pickeringite, au niveau de l'entrée de la boue au niveau du bord nord-ouest du parc. L'oxydation de la pyrite produit des phases plus acides au cœur du parc. En fin d'année 2008, le parc à boue a été drainé et asséché. C'est pourquoi, en 2009, on constate des phases minérales moins hydratées et plus oxydées comme la jarosite, l'alunite et la goethite. Ces changements de degrés d'oxydation au niveau du parc à boue sont bien visibles au niveau des signatures spectrales (Figure 2.43).

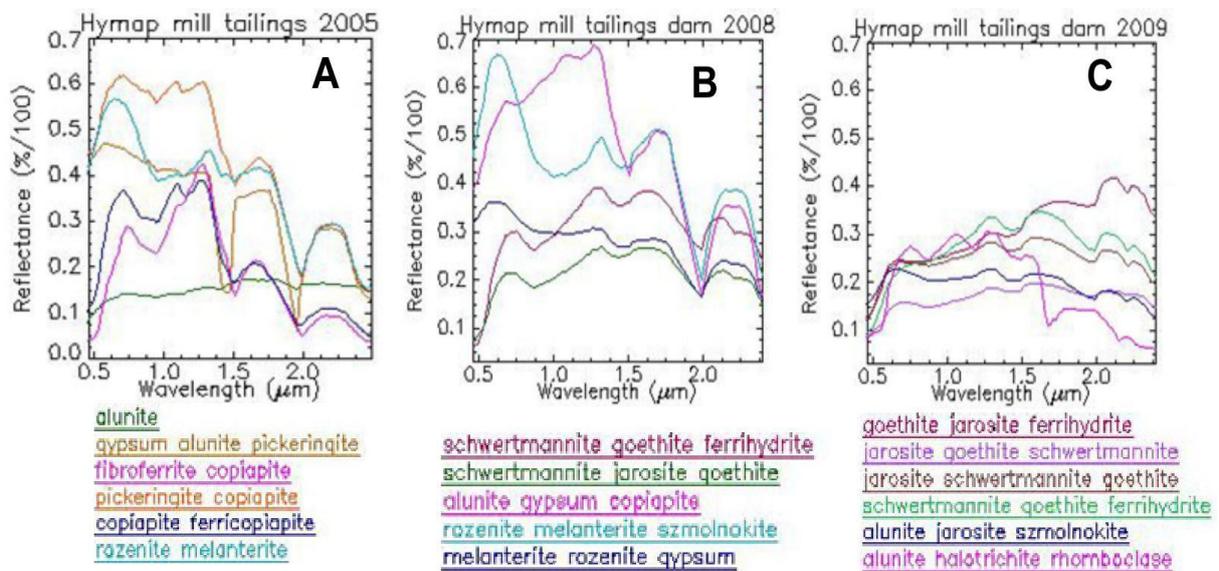


Figure 2.43 : Variation des signatures spectrales au sein du parc à boues de 2005 (A) à 2009 (C). (Buzzi *et al.*, 2014)

En 2005, on observe des signatures de rozénite, copiapite ou pickeringite. Elles ont été remplacées par de la jarosite, de l'alunite et de la goethite en 2009. Le drainage du parc a favorisé la formation de minéraux moins hydratés. Cette étude montre l'utilité de prendre des images à plusieurs reprises dans le temps pour pouvoir cartographier les changements minéralogiques associés. Ici, ils sont dus au climat et aux activités humaines.

La même année, une autre équipe a travaillé sur le même site avec les mêmes images Hymap de 2005. Cette étude utilise des algorithmes différents de la précédente (SSEE, ISMA). Ils ont également pris des spectres de terrain et des spectres en chambre noire pris sur des échantillons rapportés du terrain en plus des bibliothèques spectrales. Cette fois-ci, l'objectif de l'étude est de dresser des cartes de pH en fonction des minéraux présents (Figure 2.44).

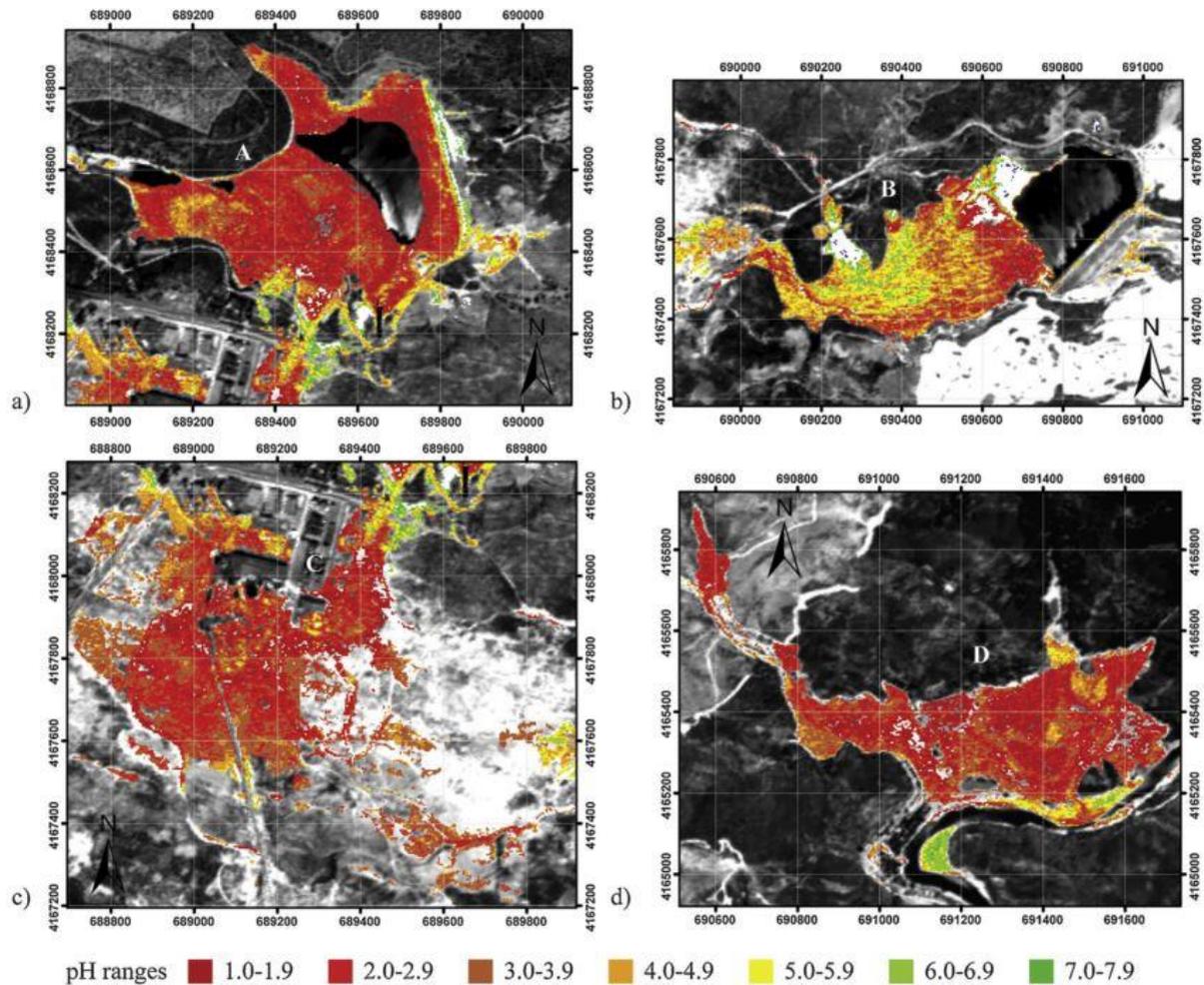


Figure 2.44 : Carte de pH du site minier de Sotiel basé sur les différents minéraux secondaires présents. (Zabcic *et al.*, 2014)

On retrouve le parc à scorie en (a) qui présente un pH très bas. En effet l'étude précédente montrait que le parc présentait de la goethite et de l'hématite, traduisant une oxydation avancée et donc un pH faible. De plus, le parc à boue (b) présente des pH plus élevés au niveau de la zone de décharge. Plus loin dans le parc, on constate une baisse de pH à cause de l'oxydation progressive de la boue sulfurée. Les résultats des deux études sont cohérents et se complètent.

2.3.8 – Exploitation

La télédétection peut aussi être utilisée dans la phase d'exploitation d'une mine. De plus en plus de cartes topographiques des fosses sont faites à l'aide de drones, équipés d'un radar, par exemple. Il existe aussi un capteur particulier (*HyLogger-3™*) qui permet de prendre des signatures spectrales sur des carottes de roche. Il permet ainsi d'assister le géologue lors du *logging* des carottes.

Une telle méthode a été utilisée à Mount Polley (Fox *et al.*, 2016). Cette étude avait pour objectif d'analyser des carottes de forages provenant des sites miniers de Glen Lyell et Mount Polley. Ces carottes ont été analysées avec le spectromètre spécialement prévu à cet effet, le *HyLogger-3™*. C'est un spectromètre balayant le VNIR, SWIR et l'IR thermique (TIR). L'analyse spectrale va permettre d'identifier les carbonates présents et les différencier. Il est important de pouvoir discriminer les différents carbonates. En effet, en environnement minier, il est important de connaître le potentiel neutralisant des échantillons. Les carbonates ont le plus fort potentiel de neutralisation, mais il existe des différences de pouvoir neutralisant au sein des carbonates. Certains minéraux, comme la sidérite, n'apportent pas de potentiel neutralisant. Il est donc important de pouvoir les discerner. Or il existe des pics d'absorptions caractéristiques qui permettent de les différencier (Figure 2.45).

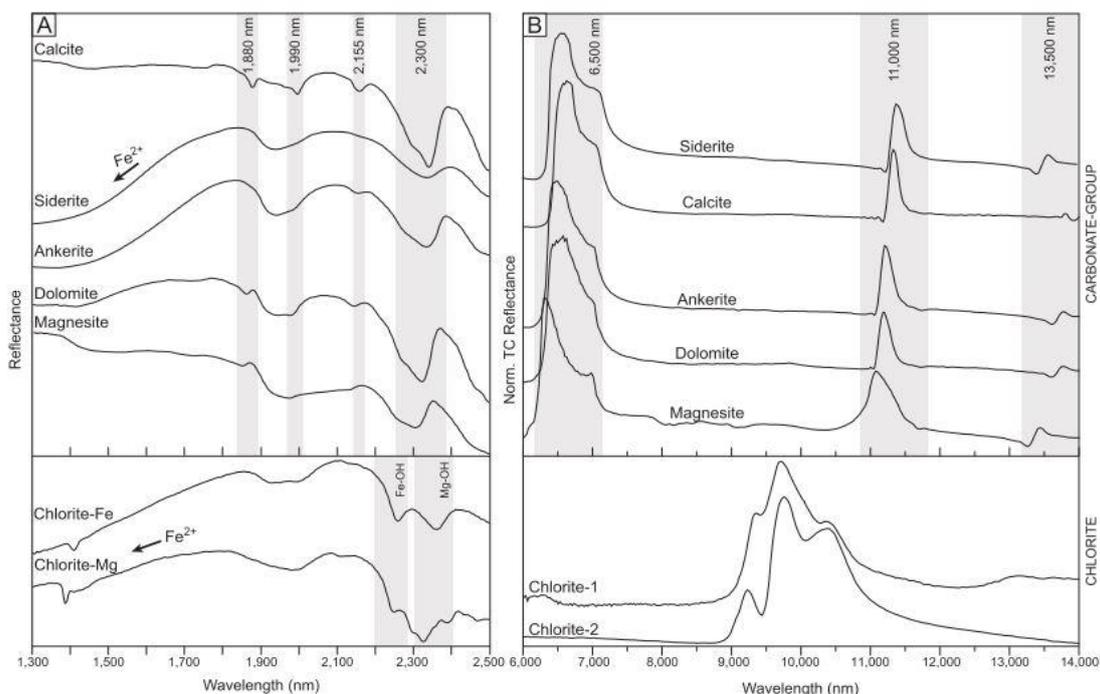


Figure 2.45 : Les différents pics d'absorption des carbonates dans le domaine du SWIR (A) et du TIR (B). (Fox *et al.*, 2016)

L'apport du TIR est important car les pics d'absorptions présents dans le SWIR peuvent entrer en interférence avec la chlorite. Dans le TIR, les pics discriminants se trouvent à 6500 nm, 11300 nm et 13900 nm. Ceux-ci sont différents de ceux de la chlorite. Le spectromètre mesure 12 spectres par secondes, soit un spectre tous les 4 mm.

Les analyses ont ensuite été reportées dans des graphiques 13900 vs 11300 nm et 11300 vs 6500 nm. Ces graphiques permettent de comparer les spectres acquis avec une base de données

spectrales pour déterminer les différentes espèces de carbonates (Figure 2.46). Les carottes de Glen Lyell montrent deux groupes : sidérite et ankérite/Fe-dolomite. Pour Mount Polley, les analyses montrent un mélange entre de la calcite pure (calcite High) et un autre composé d'un mélange (calcite Mod.). Des analyses minéralogiques et géochimiques ont également été faites pour comparaison sur toute la longueur des carottes (Figure 2.47 et 2.48).

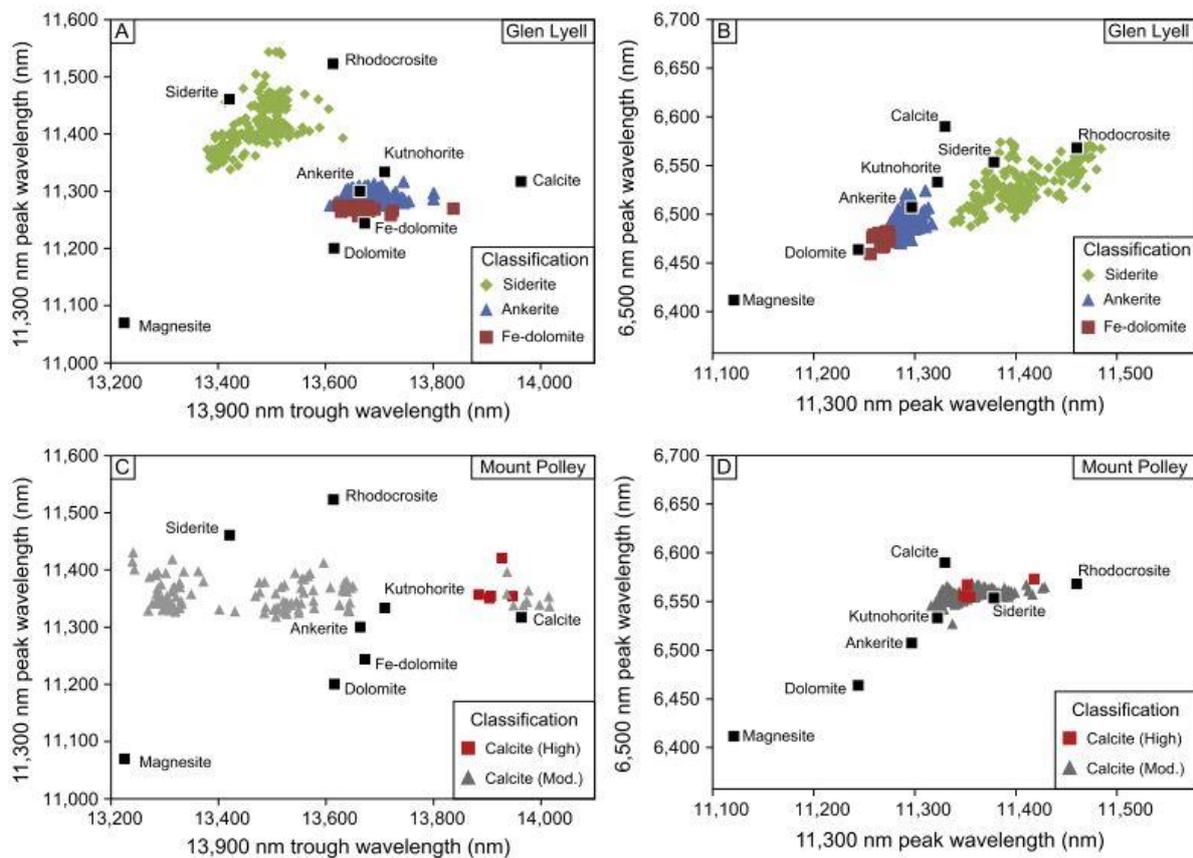


Figure 2.46 : Caractérisation des espèces de carbonates présents sur les deux sites. (Fox *et al.*, 2016)

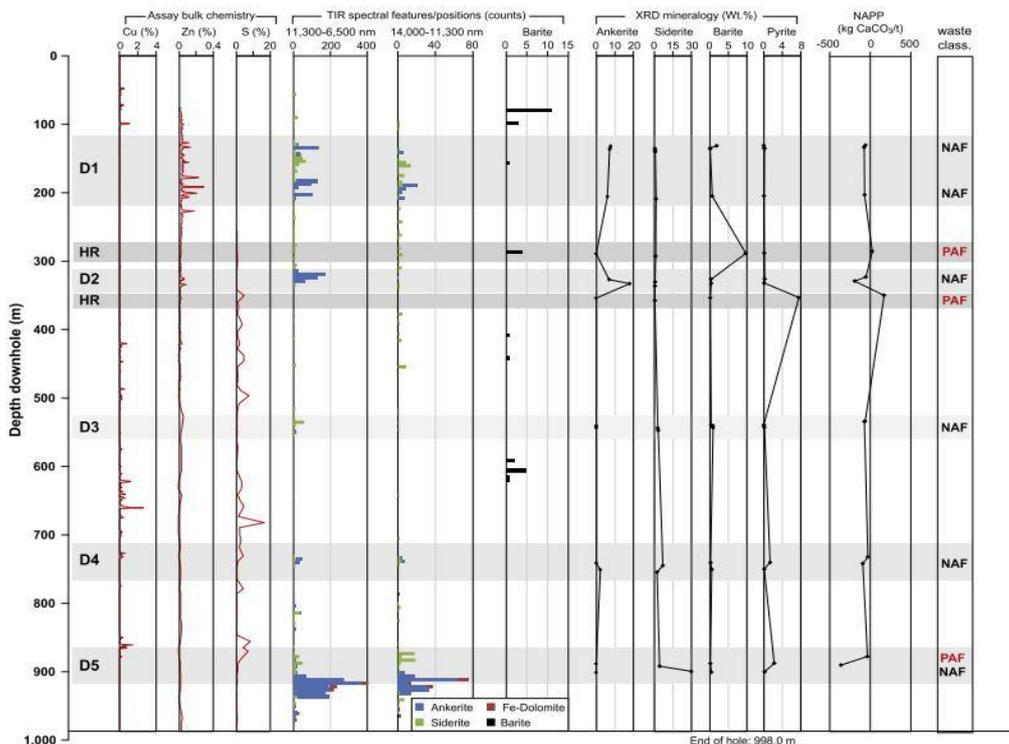


Figure 2.47 : Fusion des données sur les carottes du site Mount Polley. (Fox *et al.*, 2016)

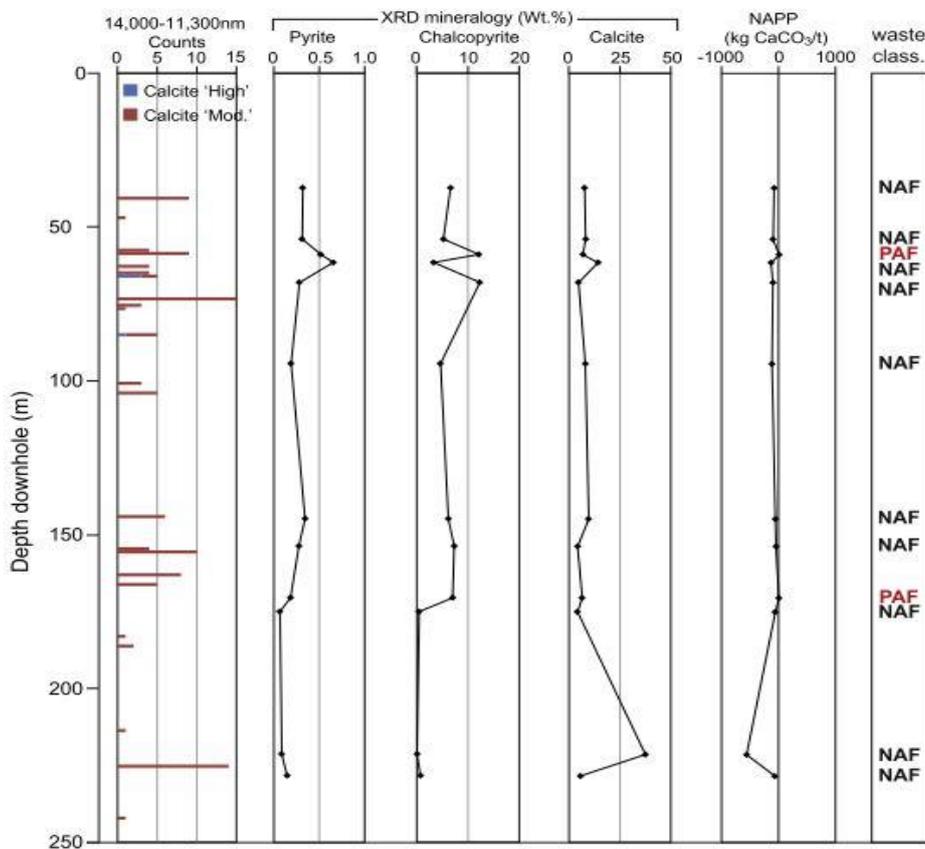


Figure 2.48 : Fusion des données sur les carottes du site Glen Lyell. (Fox *et al.*, 2016)

L'identification de barytine a été ajoutée pour améliorer la prédiction du DMA. En effet, la barytine surestime le PA d'un échantillon car elle contient du soufre mais ne provoque pas d'acidité. De tels échantillons vont avoir un %S_{tot} plus important et donneront des faux positifs.

Ces mesures ont permis de différencier la sidérite de l'ankérite dans le cas de Glen Lyell. Cette information est utile car la sidérite n'apporte pas de potentiel neutralisant alors que l'ankérite oui. De plus, l'identification de la barytine est aussi importante pour bien évaluer le PA des échantillons qui en contiennent. L'apport du TIR permet une bonne identification des carbonates en ajoutant 3 pics d'absorptions caractéristiques permettant de les différencier. Cette méthode permet une évaluation rapide du PGA de l'échantillon et donne des informations utiles pour les calculs chimiques de la véritable estimation du PGA.

CHAPITRE 3 - MATERIEL ET METHODES

Les différentes roches étudiées au cours de ce projet proviennent toutes du site de Mine Canadian Malartic. Plusieurs tonnes de roches ont ainsi été échantillonnées aussi bien dans la fosse que dans les haldes à stériles. Ces échantillons ont été récupérés à l'occasion de deux campagnes de terrain. Une première campagne préliminaire, a eu lieu en novembre 2015 (Figure 3.1) et la seconde en juillet 2016. Durant les deux campagnes, des images multispectrales et/ou hyperspectrales de la mine ont été acquises, aussi bien dans la fosse que sur les haldes à stériles.

Lors de la première campagne, les images ont été prises par un capteur Pika II 400-900 nm aéroporté (avion). Pour la deuxième campagne, les images ont été prises par un drone six rotors à double hélice équipé de capteurs Pika II VNIR 400-900 nm et NIR 900-1700 nm, des images Worldview 3 ont également été acquises. Les deux objectifs de l'échantillonnage étaient, d'une part, d'apporter une validation de terrain pour aider à l'interprétation des images et, d'autre part, de prendre suffisamment d'échantillons pour faire une étude granulométrique et étudier les facteurs qui influencent la réponse spectrale.

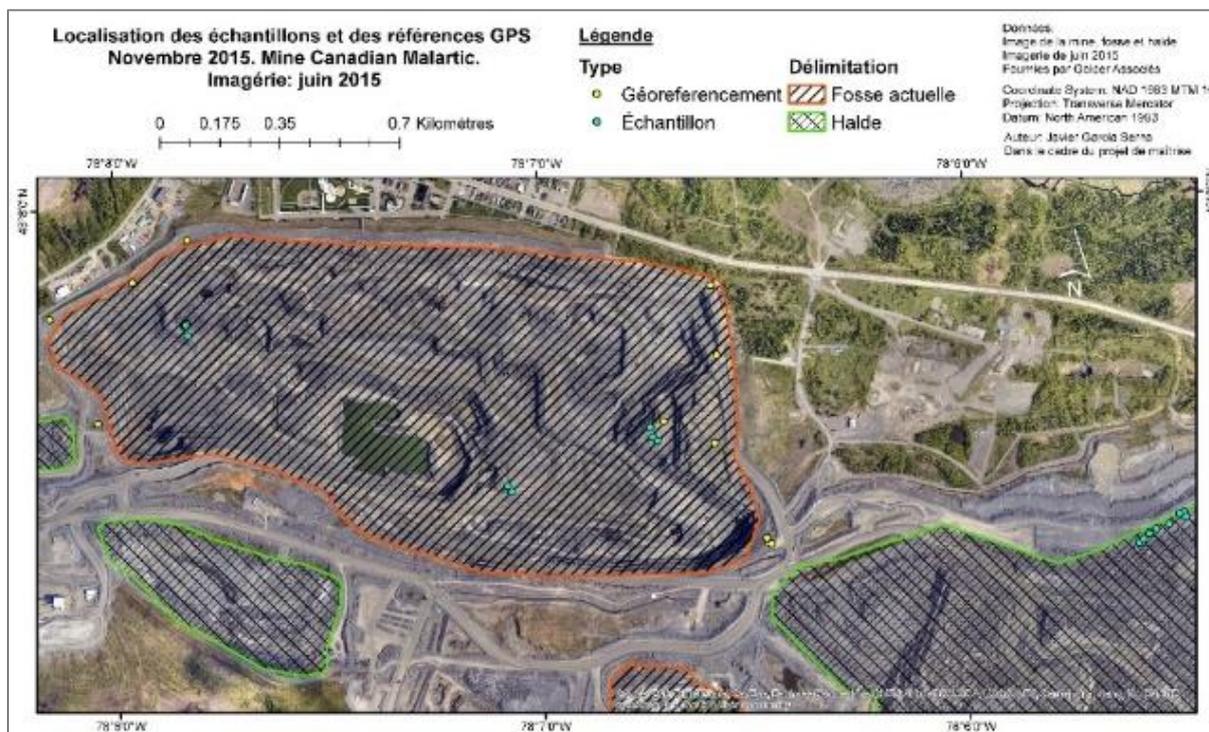


Figure 3.1 : Emplacement des échantillons prélevés lors de la campagne préliminaire.

(Javier Garcia Serna, 2015)

3.1 - La Campagne Préliminaire

Au cours de la première campagne d'échantillonnage, environ 1,5 tonne de roche ont été récupérées. Une quantité importante de roche a été volontairement prélevée afin d'avoir suffisamment de matériel pour effectuer des tests et faire face aux imprévus. Pour la première campagne, il a été tenté de cartographier l'ensemble de la fosse et une partie des haldes. Ensuite, des zones suffisamment diversifiées en termes de faciès ont été choisies pour prendre les mesures ASD et les échantillons. Cette opération avait pour but de prendre des données *in situ* à comparer avec celles issues des différentes imageries mises en œuvre. Pour cela, 6 zones de 15 m X 15 m et 11 zones de 80 cm X 80 cm ont été sélectionnées. Les roches ont été échantillonnées en surface au sein de ces mailles.

3.1.1 – Acquisition des images

Les images de télédétection ont donc été prises par un petit avion muni d'un capteur Pika II 400-900 nm. Les mailles de 15 m ont été choisies pour être sûrs de contenir un pixel SWIR de WV3 (de résolution 7,50 m) bien que les images satellites n'ont pu être acquises lors de la première campagne. Ce format a été ensuite segmenté en plusieurs cases du fait de sa taille et dans un souci de représentativité (Figure 3.2).

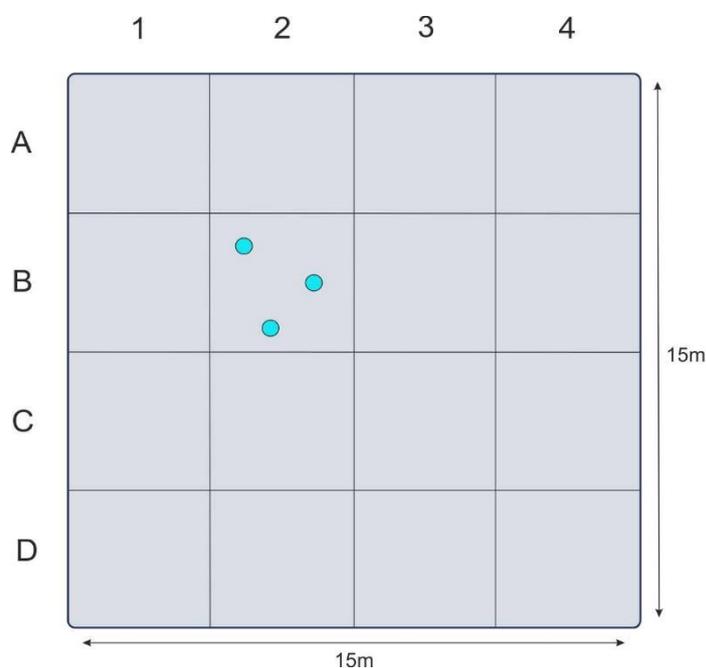


Figure 3.2 : Schéma de la maille d'échantillonnage de 15 m et chaudières (en bleu)

Les mailles de 80 cm ont été conçues comme des « zoom » pour cibler des zones d'intérêt particulier identifiées comme telles lors du terrain. Elles ont été utilisées lorsque certaines zones

semblaient montrer une variabilité lithologique intéressante ou bien présentaient une lithologie particulière.

3.1.2 – Échantillonnage des roches et des spectres

Les cases qui composent les mailles de 15 m sont là pour permettre un échantillonnage représentatif et rigoureux. En faisant cela, on diminue l'erreur relative d'échantillonnage sur l'ensemble de la maille. Il fallait prendre suffisamment de matériel et de spectre pour caractériser l'ensemble d'un pixel. L'échantillonnage des roches s'est donc fait en trois endroits au sein de chaque case pour remplir 1 chaudière. Cela fait donc 16 chaudières par maille de 15 m. Les chaudières ont été nommées de la façon suivante : 15-1500-1-A1 pour la case A1 de la première maille de 1500 cm de 2015 ; de même pour les mailles de 80 cm. Les spectres ont été pris sur les 3 composants de chaque chaudière. Pour les mailles de 80 cm, une seule chaudière et un seul spectre ont été récupérés. Les spectres de réflectance ont été pris à l'aide d'un *FieldSpec Pro 3* (ASD).

3.1.3 – Préparation des échantillons

Plusieurs analyses (DRX, S/C, granulométrie) ont été effectuées sur les différents échantillons prélevés lors des deux campagnes. Cependant, la méthode de préparation est restée la même pour toutes les chaudières (Figure 3.3). Elles contenaient du matériel avec une granulométrie allant du bloc (dizaine de centimètres) aux fines (μm).

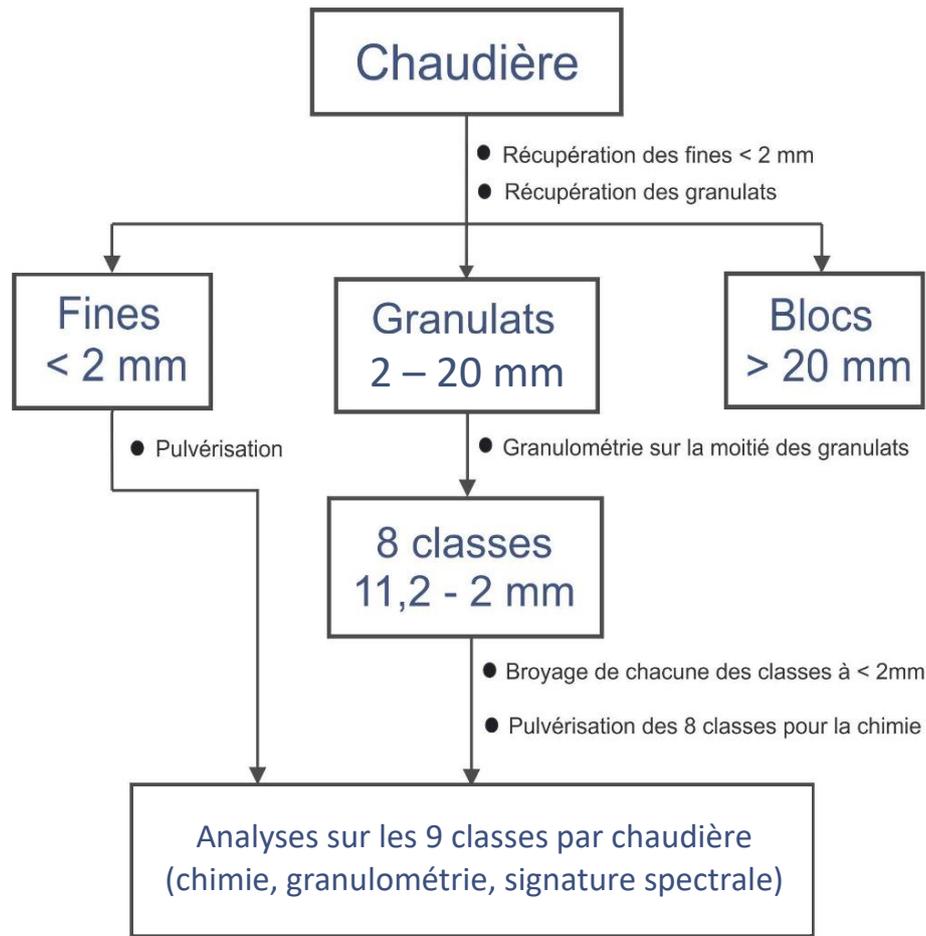


Figure 3.3: Organigramme de préparation des chaudières

Le but de cette préparation était de permettre, d'une part, des résultats sur la chimie des échantillons, c'est-à-dire leur minéralogie, afin de comparer cette minéralogie avec celle identifiée par l'analyse des images multi/hyperspectrales, et, d'autre part, de faire une étude sur la variabilité des spectres sur un même échantillon mais sur des granulométries différentes.

3.1.3.a – Séparation des classes

La première étape consiste donc à séparer les roches en trois grandes classes granulométriques : les blocs (supérieurs à 20 mm), les granulats (compris entre 20 et 2 mm) et les fines (inférieures à 2 mm). Les analyses ont été effectuées sur les granulats et les fines. La classe des blocs n'a pas été considérée, mis à part les 14 gros blocs de la deuxième campagne.

Cette première étape s'effectue au-dessus d'un baril couvert d'une grille. Pour ce faire, le contenu de la chaudière est rincé à l'aide de deux différents tamis posés sur cette grille. Ce rinçage permet de récupérer les fines qui tombent au fond du baril avec l'eau de rinçage. Les tamis (< 20 mm et < 2 mm) permettent la récupération des blocs et des granulats (Figure 3.4).

Les blocs sont remis dans la chaudière. Les granulats sont abondamment rincés pour récupérer toute les fines qui s'y sont agglomérées.

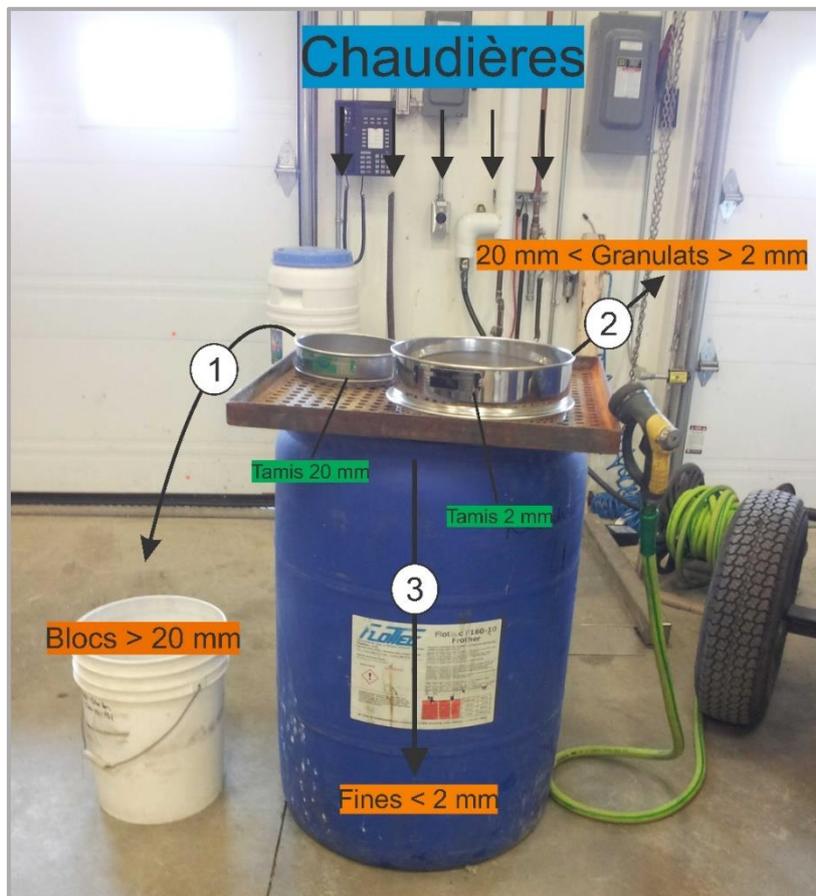


Figure 3.4 : Séparation des classes à l'aide de tamis et d'un baril

3.1.3.b – Récupération des fines et des granulats

L'étape suivante consiste à récupérer les fines. Elles ont été laissées à décanter dans le baril pendant 48h. Il est alors possible de pomper l'eau claire qui remplit le baril à moitié pour ensuite récupérer au fond une boue riche en particules fines. Cette boue est placée dans un filtre à air comprimé pour évacuer l'eau et ne laisser qu'une pâte grisâtre (Figure 3.5A). La pâte est mise à l'étuve à 60°C pendant 24 h pour la sécher.

Les granulats ont eux aussi été séchés à l'étuve et peuvent maintenant être triés en 8 classes pour l'analyse granulométrique (Figure 3.5B). Seule la moitié des granulats est utilisée. L'autre moitié est conservée pour servir de témoin. Ces 8 classes (< 11,2 mm ; < 9,5 mm ; < 8 mm ; < 6,7 mm ; < 5,6 mm ; < 4 mm ; < 3,35 mm et < 2 mm) ont été concassées, broyées et analysées séparément pour déterminer dans quelle mesure le classement modifie la composition chimique et *in fine* la réponse spectrale.



Figure 3.5 : Filtration des fines (A) et classification des granulats (B)

3.1.3.c – Réduction des classes

Les 8 sous-échantillons correspondant aux 8 classes granulométriques sont eux aussi divisés en deux. Une moitié va être concassée puis broyée pour l'analyse. L'autre moitié est conservée comme témoin. Dans certains cas, il n'y avait pas assez de matériel granulaire pour conserver les deux témoins (celui avant classification et celui avant analyse). Dans ces cas, les granulats ont été classés et ce n'est qu'avant l'analyse que les témoins de chaque classe ont été conservés.

Pour permettre l'analyse de ces 8 classes, il faut donc les réduire pour satisfaire aux critères des appareils utilisés (S/C, DRX, Microtrac). Les 8 sous-échantillons sont d'abord passés au concasseur à mâchoires pour qu'ils atteignent la taille nécessaire pour passer ensuite au broyeur à cône (Figure 3.6). À la sortie, ils ont tous une granulométrie ≤ 2 mm. À cette étape, ce n'est plus leur granulométrie qui nous intéresse. En effet, le but du classement initial n'est pas d'obtenir des classes de tailles particulières, mais simplement d'effectuer une séparation granulométrique afin de voir si elle est accompagnée d'une ségrégation minéralogique et chimique entre les différentes classes de particules. Le choix des différents tamis et, par conséquent, de la dimension des éléments de chaque classe n'a qu'un but pratique, à savoir de constater les différences apportées à la chimie par le biais de ce classement.

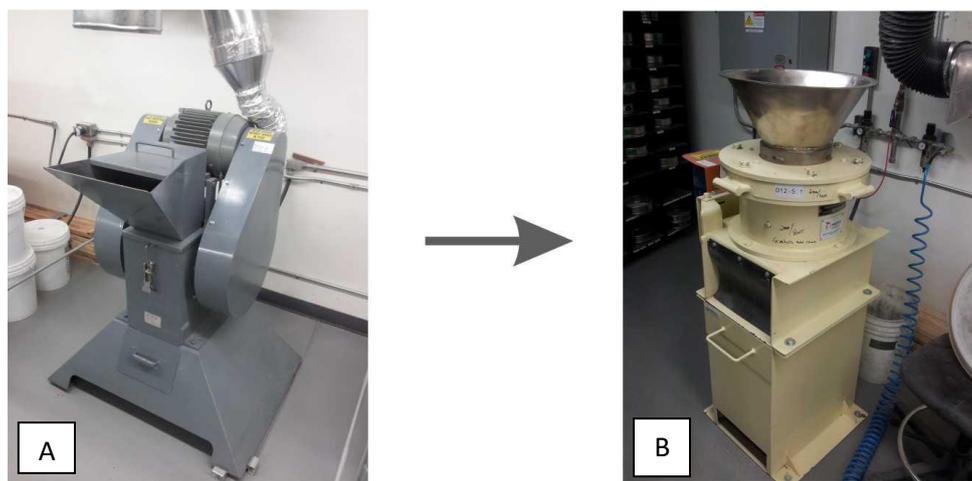


Figure 3.6 : Le concasseur à mâchoires à gauche (A) et le broyeur à cône à droite (B)

Enfin, tous les sous-échantillons ainsi que les fines pourront passer à l'étape de pulvérisation. C'est cette dernière étape qui permet vraiment d'atteindre les critères granulométriques nécessaires aux analyses, les étapes précédentes étant des prérequis pour celles-ci. Ils sont donc passés par une pulvérisette Fritsch (Figure 3.7A). Les échantillons sont alors prêts pour les analyses, ils pèsent environs 50 g. Le matériel restant est conservé comme témoin ou bien pour servir à d'autres analyses futures (Figures 3.7B et C).



Figure 3.7 : La pulvérisette Fritsch (A), les échantillons finaux (B) et le matériel restant (C)

3.2 - La seconde campagne

Après plusieurs mois d'essais, de différentes approches et méthodes de préparation et d'analyses, une seconde campagne de terrain a été mise en place. Au cours de cette dernière campagne, les acquisitions spectrales aéroportées ont été faites à l'aide d'un drone équipé de capteurs Pika 350-900 nm et 900-1700 nm. Ce deuxième capteur 900-1700 nm nous permet de

capter une plus large gamme spectrale, celle-ci étant susceptible d'apporter des informations supplémentaires sur la minéralogie. A l'occasion de cette campagne des images WV3 ont été acquises mais n'ont pas été utilisées dans le cadre de ma maîtrise mais par les doctorants de Sherbrooke.

3.2.1 – Acquisition des images

Le drone a fait deux acquisitions, l'une dans les haldes selon un transept NO-SE et l'autre dans la fosse sur une zone de 130 X 200 m (Figure 3.8).

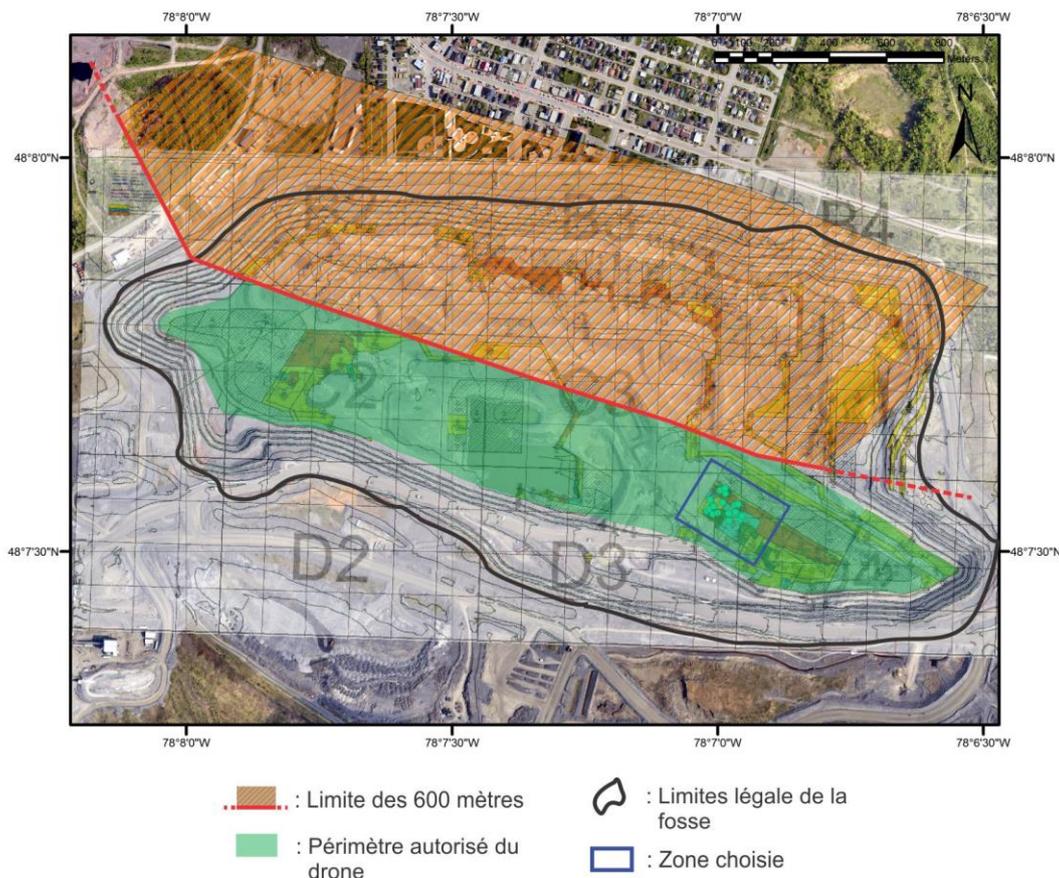


Figure 3.8 : Contraintes de vol du drone dans la fosse

Nous avons particulièrement travaillé dans la fosse sur la zone indiquée plus haut (encart B). Cette zone a été d'abord choisie parce qu'elle nous était accessible avec le drone. En effet, la législation est stricte quant aux plans de vols des UAVs (*Unmanned Aerial Vehicle*). Il faut rester à 600 m des habitations, ce qui nous a empêchés de travailler le long du mur nord, trop près de la ville. Il est aussi impossible de travailler trop près des murs de la fosse elle-même. La zone choisie satisfaisait tous ces critères et était intéressante parce qu'elle présentait une bonne variabilité avec du minerai de différente teneur ainsi que des roches stériles.

3.2.2 – Échantillonnage des roches et des spectres

Les points d'échantillonnages ont été définis en fonction des zones de teneurs variables indiquées par le plan d'exploitation (Figure 3.9) mais aussi en fonction des variabilités lithologiques au sein de ses zones. Nous avons donc pris 17 échantillons de roches en surface dans un rayon de 1 m autour d'un point de référence GPS. Pour 14 de ces 17 échantillons, nous avons aussi identifié un bloc représentatif suffisamment gros pour être discernable sur les images du drone. Nous avons pris un spectre ASD sur chacun de ces blocs. Ces blocs seront, de plus, analysés séparément du reste du matériel. Cette méthode permet un lien direct entre les données d'échantillonnage et celles d'imagerie. Les spectres pris par le drone et ceux du *FieldSpec Pro* pourront ainsi être comparés plus rigoureusement.

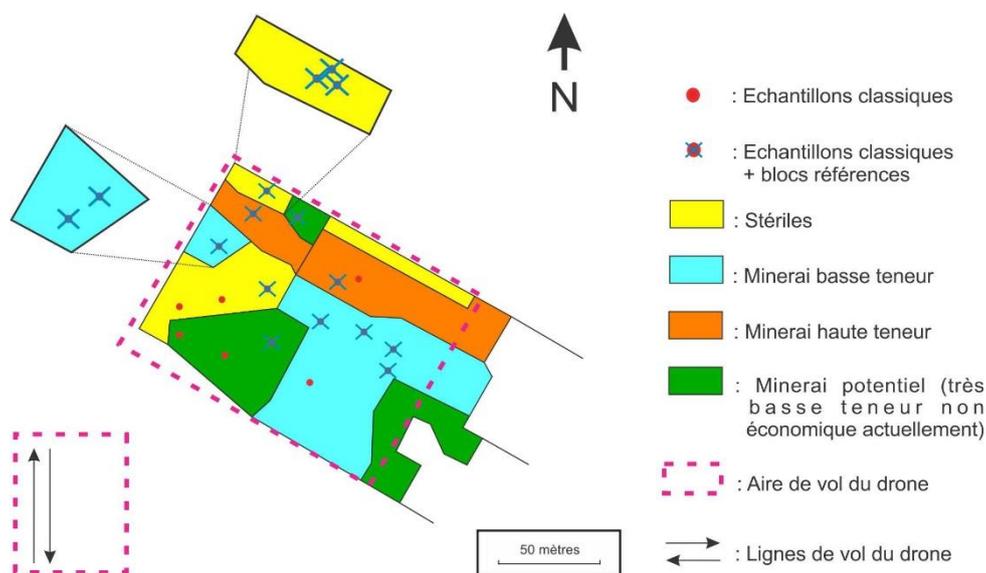


Figure 3.9 : Localisation détaillée des échantillons pris dans la fosse

La lithologie était relativement simple, nous étions dans les grauwares turbiditiques, soit peu altérés (mais généralement relativement silicifiés) ou alors présentant une carbonatation caractéristique des abords de la faille Cadillac. La zone était recoupée par endroits par des veines de quartz et des petits dykes felsiques. Ces veines ont été échantillonnées.

Nous avons aussi effectué un transect NO-SE dans les haldes à stériles. Les haldes, par définition, ne présentaient pas de gros blocs similaires à ceux identifiés dans la fosse. Nous avons donc fait un échantillonnage classique où le matériel de surface a été échantillonné quel que soit sa granulométrie. Sur une longueur de 147 mètres, 10 échantillons ont été prélevés avec un écart de 14,7 mètres entre chaque. Tous les 14,7 m, des blocs accompagnés de fines ont été

mis dans des chaudières. Le matériel a été échantillonné en surface dans un rayon de 50 cm et de façon représentative. Les spectres ont également été pris tous les 14,7 mètres à une hauteur d'environ 50 cm du sol.

3.2.3 – Préparation des blocs

Les blocs prélevés lors de la deuxième campagne ont nécessairement été préparés différemment. Ces blocs faisaient environs 30 cm et approximativement une quinzaine de kilos. Ils ont d'abord été fragmentés à la masse pour entrer dans le concasseur à mâchoire. Ils sont ensuite passés dans le broyeur à cône. Le problème est ici qu'on obtient environ 15 kg de matériel sensé être analysé via un échantillon de 50 à 100 g. Pour que l'échantillon soit représentatif, il faut donc effectuer une homogénéisation. D'ailleurs, ce n'est pas un, mais trois échantillons qui ont été prélevés dans un souci de représentativité. Les résultats retenus pour chaque bloc sont une moyenne des trois échantillons. Les 15 kg de matériel ont été homogénéisés puis réduits à l'aide de 3 diviseurs de plus en plus petit (Figure 3.10).

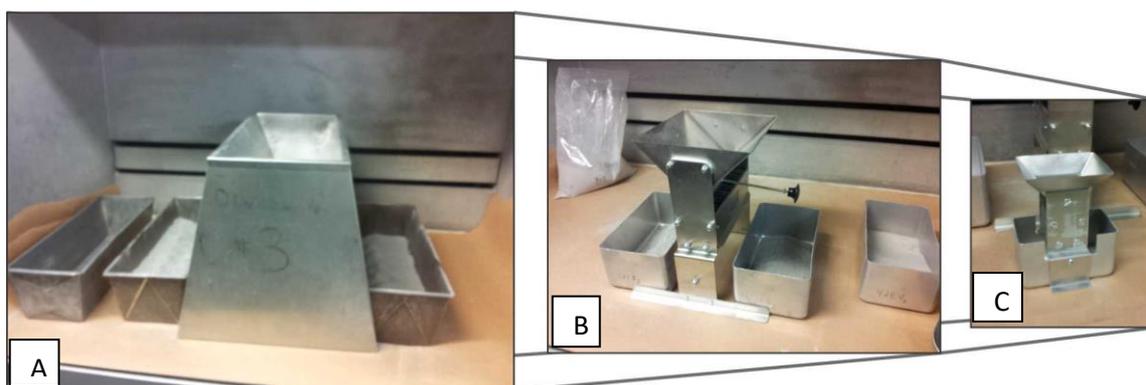


Figure 3.10: De gauche à droite, le grand diviseur (A), le diviseur moyen (B) et le petit diviseur (C)

Le premier grand diviseur permet d'homogénéiser le tout. La méthode consiste à diviser au moins six fois les 15 kg. Après cette étape, une moitié est retenue pour poursuivre, l'autre est conservée. On passe alors au diviseur moyen en réduisant progressivement. À chaque division, une moitié est conservée, l'autre divisée une fois de plus. Le dernier aliquote produit avec le diviseur moyen (≤ 300 g) est réparti en trois échantillons de même masse compris entre 50 et 100 g à l'aide du plus petit diviseur. D'autres échantillons ont été produits à partir de ces blocs. Un bloc de greywacke et un de porphyre ont été sélectionnés pour tester l'impact de la granulométrie réelle. Pour ces deux blocs, quatre fractions granulométriques ont été faites : 2 mm – 630 μ m ; 630 – 212 μ m ; 212 – 106 μ m et < 106 μ m. Les signatures spectrales de ces quatre fractions ont été mesurées et comparées.

3.2.4 – Les assemblages de minéraux purs

Dans un second temps, des poudres uniquement composées de 3 minéraux purs ont été produites. Les différents minéraux purs ont été achetés séparément. Les assemblages de minéraux purs ont pour but de reproduire différents PNN en combinant de la pyrite avec de la calcite et le l'albite. Le but étant de voir dans quelle mesure les différentes proportions de minéraux purs font varier la signature spectrale et ainsi voir s'il est possible de différencier ces assemblages et leur PNN uniquement via la signature spectrale. L'albite est utilisée comme matrice silicaté et a été choisie car on en retrouve de 30 % à 50 % en poids dans les différents faciès de Malartic. Les minéraux sont pulvérisés pour obtenir une poudre homogène en termes de granulométrie (Figure 3.11).

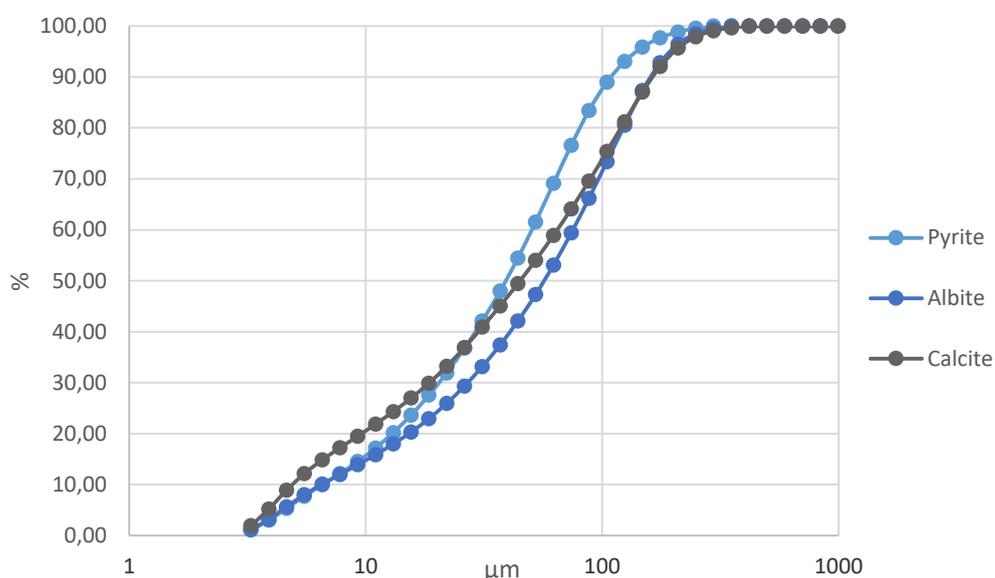


Figure 3.11 : Courbe Granulométrique des minéraux purs réduits en poudre

La pyrite et la calcite ont été mélangées dans des proportions permettant d'obtenir différentes gammes de PNN (Annexe 2). Dans chaque mélange l'albite sert de balance à la pyrite et calcite et permet de simuler une gangue silicatée. En effet l'albite est en concentration majeur entre 30% et 50% dans les roches du site. Pour constituer les mélanges, les masses des minéraux ont été calculé pour une masse totale de 126 g. Cette masse correspond à ce que peut contenir la boîte de Pétri utilisée pour prendre les spectres. La figure ci-dessous permet de calculer les proportions en poids de chaque minéral pour les différents assemblages (Figure 3.12), (cf. Annexe 2).

Série bas soufre			Série haut soufre		
%S	%C	PNN	%S	%C	PNN
1	0,15	-18,8	3	0,5	-52
1	0,8	35,4	3	1	-10
1	1,25	72,9	3	2	73
1	8	635,2	3	8	573
Série bas carbone			Série haut carbone		
%S	%C	PNN	%S	%C	PNN
0,5	1	67,7	0,5	8	650,8
1	1	52,1	2	8	603,9
2	1	20,8	5	8	510,2
8	1	-166,7	10	8	353,9

Figure 3.12 : Les différents mélanges de minéraux purs en fonction de %S et %C et le PNN

3.3 - Techniques Analytiques

Les différentes analyses menées sur les échantillons ont été effectuées dans les laboratoires de l'UQAT essentiellement. Seuls quelques spectres ont été pris à l'Université de Sherbrooke pour bénéficier de leur appareil *FieldSpec Pro 3* ainsi que de leur chambre noire. Les analyses avaient deux objectifs. Il s'agissait tout d'abord d'apporter des données en termes de minéralogie pour les échantillons pris sur le terrain afin de pouvoir les croiser avec celles extraites des images prises par les équipes de Sherbrooke et de l'INRS. Dans un second temps, l'effet de la granulométrie sur la réponse spectrale devait être déterminé, et en particulier, quelle était l'importance des fines (< 2 mm) sur les réponses spectrales extraites des images de terrain. Pour répondre à ces questions, nous avons utilisé plusieurs méthodes, à savoir une étude granulométrique, une étude spectrographique, des analyses soufre/carbone ainsi qu'une étude minéralogique.

3.3.1 – Etude Granulométrique

3.3.1.a - *WipFrag*

Dans l'optique d'une étude granulométrique à toutes les échelles, l'objectif était d'étudier les granulats et fines via les méthodes classiques de tamisage manuel et laser, mais surtout tenter de faire la granulométrie à l'échelle du sautage minier. Après un sautage minier, le matériel se présente principalement sous forme de blocs pluri-centimétriques et centimétriques.

Pour étudier la granulométrie de ces blocs, nous avons tenté d'utiliser un logiciel bien connu des compagnies minières abitibiennes, le logiciel *WipFrag*TM. C'est un logiciel d'analyse d'image qui permet une mesure des fragments sur des photos ou des flux vidéo en continus. Il

est par exemple utilisé sur les convoyeurs à bandes pour déterminer de façon continue si la granulométrie désirée a été atteinte. Le logiciel détecte les différents blocs via les variations d'intensité lumineuse des pixels de l'image (*Edge Detection Variation*) (Figure 3.13).

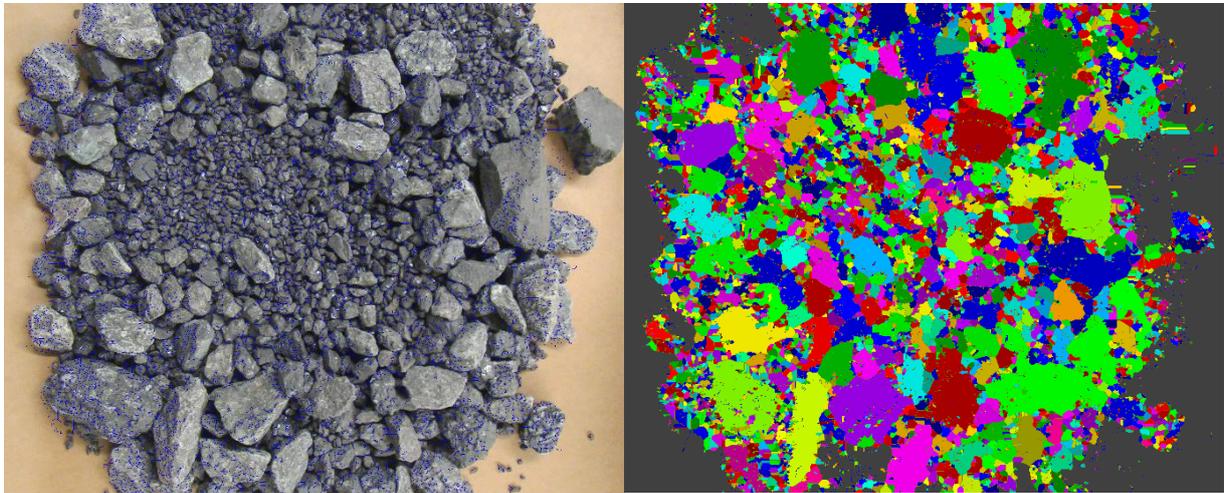


Figure 3.13 : La technique de fragmentation EDV (Edge Detection Variation). (Rossit, 2016)

Cette technique a été utilisée sur les photos prises lors de la première campagne de terrain de novembre 2015 mais n'ont pas donné de résultats satisfaisants. La méthode a finalement été abandonnée.

3.3.1.b – Tamisage classique

Pour l'étude des granulats compris entre 2 mm et 20 mm, la méthode choisie a donc été le tamisage classique. Pour chaque chaudière, après avoir isolé les granulats comme décrit précédemment, ils ont été pesés avant de commencer le classement. Après avoir séparé les 8 classes, elles ont été pesées une par une. J'ai donc pu, à l'aide de ces masses calculer les courbes granulométriques cumulatives des granulats présents dans les chaudières (Figure 3.14).

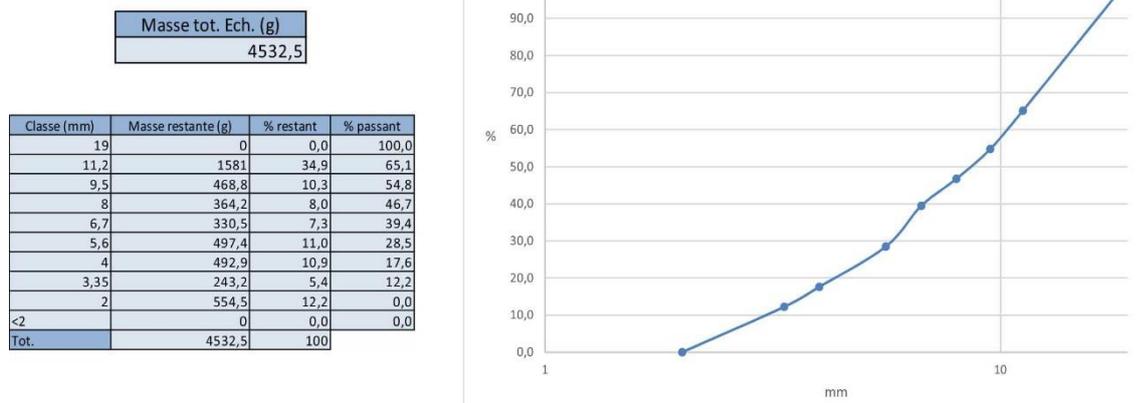


Figure 3.14 : Exemple de courbe granulométrique cumulative

3.3.1.c – Tamisage laser

En ce qui concerne les fines <2 mm, elles ont été passées au granulomètre *Microtrac S3500*. Les 8 classes et les fines pulvérisées ont aussi été analysées à l'aide de cet appareil qui permet de mesurer la distribution granulométrique des particules d'une poudre mise en suspension dans de l'eau. L'analyse se fait via trois lasers et deux détecteurs (Figure 3.15).

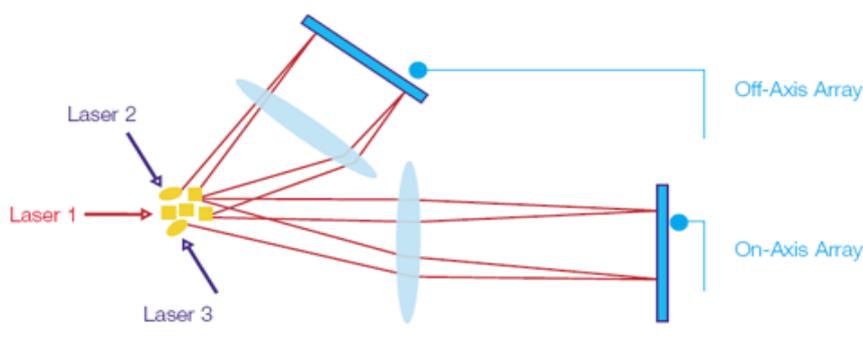


Figure 3.15 : Schéma de fonctionnement de l'analyseur du Microtrac S3500. *Microtrac.com*

Cette configuration permet de minimiser le rapport signal/bruit et ainsi de mieux détecter les particules. Ces particules peuvent être de natures variées, aussi bien sphériques qu'irrégulières, transparentes ou absorbantes et même réfléchissantes. L'appareil est équipé d'un logiciel de traitement des données qui permet d'obtenir la distribution des particules d'un diamètre allant de 2,76 μm à 2816 μm . De l'eau déionisée est utilisée entre chaque mesure pour rincer l'appareil.

3.3.2 – Analyses Chimiques

Les analyses chimiques permettent de déterminer la composition élémentaire des échantillons. Ces analyses se font à l'aide de différentes méthodes et appareils. La fluorescence X permet de connaître la concentration des éléments majeurs et mineurs sous forme d'oxyde. Cela nécessite environ 2 g d'échantillon. L'ICP-AES informe sur les éléments en traces (ppm). Les échantillons ($\approx 0,5$ g) doivent être préalablement dissous à l'acide. Le soufre/carbone permet de déterminer de façon rapide et simultanée la concentration en soufre et en carbone total d'un échantillon solide sec ≈ 130 mg.

3.3.2.a – La fluorescence X

L'utilisation de la fluorescence X est un moyen simple et rapide pour obtenir une bonne estimation semi-quantitative des éléments majeur (>1 %p/p) et mineurs (entre 0,1 et 1 %p/p) d'un échantillon. Les acquisitions se font à l'aide d'appareils maniables et facilement transportables sur le terrain dans un holster.

C'est une technique analytique non destructive qui fonctionne sur le principe d'absorption des rayons X et d'une réémission de moindre énergie appelé fluorescence X. Elle est due aux phénomènes d'éjection d'électrons de haute énergie provenant des couches internes du cortège électronique. Des électrons provenant des couches externes viennent alors remplir ces lacunes en émettant un rayonnement X caractéristique du noyau considéré. Cela permet la caractérisation élémentaire.

L'appareil utilisé à l'IRME est un *Niton XL3t* de chez *Thermo Scientific*. Cet appareil possède 4 méthodes d'analyses préprogrammées : TestAll Geo, Sols, Minerais Cu/Zn et Minerais Ta/Hf. Le mode TestAll Geo est un mode de base qui permet de déterminer automatiquement les conditions d'analyses pour obtenir les meilleurs résultats pour les éléments des échantillons géologiques (Al, As, Ca, Cr, Fe, Mg, Ni, S, Sr, Te, U, Zn). C'est un mélange des modes Sols et Minerais. Le mode Sols a pour but de déterminer des polluants dans des sols (argile, terre, sable, etc.). Il est très sensible aux métaux lourds ce qui le rend inapproprié pour de hautes teneurs. Les deux modes Minerais ont pour but d'analyser des matériaux miniers (carottes, roches, minerais broyé, rejets, etc.). Le mode Cu/Zn est calibré pour une bonne analyse des métaux de transitions, alors que le mode Ta/Hf est calibré pour les métaux plus lourds aux environs de l'hafnium et du tantale.

3.3.2.b– ICP-AES

La technique ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy) permet d'obtenir des concentrations des éléments en traces des échantillons. Pour cela, environ 0,5 g d'échantillon doit être digéré partiellement ou entièrement dans des solutions d'acides ($\text{HNO}_3/\text{Br}_2/\text{HF}/\text{HCl}$). La digestion partielle vise la dissolution des carbonates et des silicates les plus réactifs et éventuellement des sulfures. L'analyse du Ca, Mg et Mn donne une bonne estimation de la teneur en carbonates de Ca-Mg-Mn qui est un paramètre important à connaître en environnement minier afin d'évaluer le potentiel de neutralisation d'un échantillon. L'échantillon alors mis en solution est vaporisé dans un plasma d'argon à environ 7000 K. L'échantillon est immédiatement ionisé ; les atomes constitutifs du matériel sont alors excités et réémettent en retour des rayonnements électromagnétiques qui sont alors analysés par le spectromètre d'émission. Chaque atome émet un spectre de longueurs d'ondes qui lui est propre. La lumière émise par l'échantillon est alors concentrée par des lentilles puis décomposée en ses différentes longueurs d'ondes par un système de diffraction. L'intensité de chaque longueur d'onde est mesurée dans des tubes photo-détecteurs. De cette manière, il est possible de mesurer les concentrations élémentaires de l'échantillon. L'appareil utilisé au laboratoire est un spectromètre *Optima 3100 RL* de chez *Perkin Elmer*

3.3.2.c – Analyses Soufre/Carbone

L'appareil utilisé est un *ELTRA CS-2000 Carbon/Sulfur determinator*. Son principe consiste en la combustion d'un échantillon à l'aide d'un four à induction de haute fréquence. L'échantillon est brûlé en présence d'oxygène ; les gaz de combustions sont alors captés, filtrés, traités et analysés par absorption infrarouge.

Ce type d'analyse a été choisi pour quantifier la pyrite dans les échantillons, la pyrite étant considérée comme la seule source de soufre présent dans les échantillons. On considère également que le carbone vient essentiellement des carbonates et qu'il n'y a donc pas de matière organique. Il n'y a que peu, voire pas de minéraux carbonatés dans les échantillons, mais ils présentent pour la plupart une carbonatation sous forme de fines veines. Du fait de leur dureté faible, les carbonates ont tendance à se concentrer dans les fractions les plus fines. L'analyse S/C peut donc permettre une estimation simple et rapide du fractionnement de la chimie en fonction de la granulométrie.

Pour ce faire, l'échantillon doit être placé dans un petit creuset en céramique. La masse de l'échantillon est alors pesée et doit être de 130 ± 5 mg. On y ajoute environ 0,6 g de fer et 0,9 g

de tungstène. Le fer est utilisé pour permettre l'induction de chaleur et la transmettre à l'échantillon lors de sa fusion. Le tungstène est utilisé pour éviter les phénomènes d'éclaboussures lors de la fusion du mélange. Lors de la combustion, le soufre et le carbone sont oxydés respectivement en SO_2 et CO_2 . L'oxygène, qui sature la chambre de combustion est également utilisé comme vecteur des gaz de combustion vers l'analyseur. Le gaz présente aussi d'infimes quantités de SO_3 , de CO et de vapeur d'eau aussi produits lors de la combustion et susceptibles d'interférer avec l'analyseur infrarouge. Le mélange est donc passé au travers de catalyseurs, trappes et filtres avant d'atteindre l'analyseur pour éliminer ces interférences.

L'instrument possède 4 canaux d'analyses. Deux pour le soufre, bas soufre et haut soufre, et deux pour le carbone, bas carbone et haut carbone. Les canaux bas ont une sensibilité de l'ordre du ppm, alors que les canaux hauts en ont une pour des pourcentages élevés. Au cours de l'analyse, les concentrations en SO_2 et CO_2 sont déterminées dans tous les canaux. Le logiciel *Uni* fourni avec l'appareil détermine quels sont les canaux les plus propices à l'analyse en éliminant ceux sous- ou sursaturés afin de faire le calcul des concentrations en S_{total} et C_{total} .

Les consommables utilisés pour les analyses proviennent de la compagnie *Alpha Resources*. C'est le cas des creusets en céramique traités à 1000°C au laboratoire pour éliminer les impuretés (code produit AR 3818), mais aussi du tungstène (code produit AR266) et du fer (Iron chip accelerator, code produit 077). Les étalons utilisés pour la calibration de l'appareil sont les suivant, (Tableau 3.1) :

Tableau 3.1 : Étalons utilisés à l'UQAT pour la calibration du ELTRA CS-2000
Carbon/Sulfur Determinator. (Villeneuve, 2014)

Nom	Type de matériel	% S	% C
Carbon & Sulfur limestone (AR 4012)	Roches calcaires	0,044	11,97
NBM-1	Minerai	0,28	0,79
Carbon & Sulfur in soil (AR 4017)	Sol	0,52	0,47
LKSD-4	Sédiment lacustre	0,99	17,7
Ore Standard (AR 4005)	Minerai	1,41	1,42
RTS-1	Minerai	1,66	<0,9
Ore Standard (AR 4006)	Minerai	4,24	4,4
Sulfamethazine (AR 298) ¹	Composé organique	11,5	51,8
MP-1b	Minerai	13,79	0,028
RTS-2	Minerai sulfureux	18,95	<2
CCU-1c	Concentré sulfureux	33,3	0,09
RTS-4	Concentré sulfureux	35,9	<1,5
RTS-3	Concentré sulfureux	9,98	---
TPO-1	Concentré fer	18,03	---
CZN-3	Concentré zinc	31,6	---
Pyrite Hassan (U1317) ²	Pyrite pure	53,45	-

Les limites de détection pour le soufre et le carbone sont 0,009 et 0,05 %p/p, respectivement. Les limites de quantification sont, quant à elles, de 0,2 et 0,030 %p/p pour le soufre et le carbone, respectivement. Au cours des analyses, il est nécessaire d'utiliser un blanc et un standard. Le premier duplicata doit être fait au bout de 11 échantillons, le deuxième au bout 18 et le troisième au bout de 24.

3.3.3 – Étude minéralogiques

Les analyses qui portent sur la caractérisation minéralogique, aussi bien qualitatives que quantitatives, font l'objet d'un croisement de donnée et de techniques analytiques complémentaires. Les techniques utilisées sont la microscopie optique, en lumière transmise ou réfléchi, la microscopie électronique avec un microscope électronique à balayage (MEB), la diffraction des rayons X (DRX) et les calculs minéralogiques utilisant la chimie des

échantillons. Le but de ces analyses, dans le cadre du projet, est uniquement de déterminer la composition (chimique et minéralogique) des échantillons.

3.3.3.a – La Microscopie

La microscopie optique

Elle constitue la première étape d'une caractérisation minéralogique. Cela permet d'identifier les phases minérales majeures ainsi que leur habitus et fabrique. Cela permet également d'identifier des zones d'intérêt au sein des minéraux ou de la gangue qui nécessiteront une étude plus approfondie à l'aide d'outils plus performants. Les minéraux opaques seront observés en lumière réfléchie et feront l'objet d'un premier inventaire. Du fait de leur aspect souvent identique en termes de couleur et de leur petite taille (pulvérisation), il est souvent difficile de déterminer leurs caractéristiques optiques. Pour des grossissements supérieurs à 10^3 , l'apport du MEB devient nécessaire. Les observations sont faites avec un microscope *Axio Imager M2m* de la marque *Zeiss*.

Le microscope électronique à balayage (MEB)

Le MEB permet donc d'atteindre des grossissements plus importants, de l'ordre de 10^5 à 10^6 . Il a surtout comme avantage d'apporter simultanément des informations de nature morphologique et de composition chimique. En effet, via le balayage d'un faisceau d'électrons (20 keV) sur la surface de l'échantillon, il provoque l'émission de différents rayonnements chacun vecteur d'informations variées. Les électrons secondaires, qui ne sont que le retour des électrons incident après contact avec la surface de l'échantillon, permettent d'en connaître le relief et ainsi la dureté relative des minéraux. Les électrons rétrodiffusés nous renseignent sur la masse atomique des minéraux. Les minéraux les plus denses apparaîtront relativement plus clairs. Un MEB est souvent équipé d'un spectromètre permettant une micro-analyse élémentaire via rayonnement X. Il existe l'EDS (Energy Dispersive Spectrometry, ou spectromètre à dispersion d'énergie), plus commun, ou son homologue le WDS (Wavelength Dispersive Spectrometry, ou spectromètre à dispersion de longueur d'onde). C'est ce dernier, plus communément appelé microsonde, qui est le plus utilisé pour déterminer la stœchiométrie. Il est également plus précis avec une limite de détection d'environ 200 ppm (contrairement à entre 1000 et 5000 ppm pour l'EDS). Ce type de micro-analyse peut se faire sur toute la surface de l'image (cartographie chimique élémentaire) ou bien de manière ponctuelle sur tel ou tel minéral pour en connaître la stœchiométrie, par exemple.

Le MEB utilisé au laboratoire est un *S-3500N* de la marque *Hitachi*. Il est équipé d'un spectromètre EDS de type SDD (Silicon Drift Detector) X-Max (20 mm²) de chez *Oxford Instruments*. Le faisceau d'électron est utilisé à 20 keV, et environ 100 µA pour une distance de travail de 15 mm. Le traitement numérique et les analyses sont pris en charge par le logiciel *INCA*.

La diffraction des rayons X

Cette technique permet d'identifier les phases minérales via leur réseau cristallin et ses plans réticulaires. Les échantillons sont soumis à un faisceau de rayon X dirigé et variant d'angle d'incidence θ . La distance des atomes (d) des plans réticulaires, caractéristique de chaque minéral, est déterminée connaissant la longueur d'onde (λ) et l'angle du faisceau via la loi de Bragg. Couplé avec une modélisation de Rietveld, elle permet une estimation semi-quantitative de ces minéraux (Bouzahzah, 2013). Le résultat de cette modélisation est cependant dépendant des phases identifiées ; il est normalisé à 100% et peut donc fausser les proportions massiques en cas de non comptabilisation d'une phase particulière. De plus, certains pics caractéristiques de certaines phases peuvent être confondus. L'orientation des minéraux et leur degré de cristallinité jouent également. Les phyllosilicates peuvent poser problème ainsi que les minéraux amorphes comme les oxy-hydroxydes de fer.

L'appareil utilisé au laboratoire est un *Bruker A.X.S Advance D8* en mode $\theta/2\theta$ avec des angles variant de 5 à 70° pour un pas de 0,2°. Les échantillons sont micronisés (<10 µm) avant d'être analysés. Le traitement des données et l'identification des phases minérales sont pris en charge par le logiciel *EVA*, et le calcul selon la méthode de Rietveld pour la quantification de ces phases se fait via le logiciel *Topas*.

La réconciliation des données minéralogiques

La réconciliation des données minéralogiques est la fusion des données issues de ces différentes méthodes et analyses, en complément de la géochimie, qui permet d'aboutir à une minéralogie plus précise. Le pourcentage en poids de chaque minéral peut être calculé en connaissant la concentration en éléments traceur et la stœchiométrie des minéraux (Bouzahzah, 2013) (Equation 3.1).

$$x_i = 100 \times \frac{A_t}{B_t} \quad [3.1]$$

x_i : Proportion massique du minéral i dans l'échantillon (% p/p)

A_t : Proportion massique de l'élément traceur t dans l'échantillon (% p/p) obtenue par analyse chimique totale

B_t : Proportion massique de l'élément traceur t dans le minéral i (% p/p) obtenue par micro-analyse (MEB, MSE) ou teneur théorique dans le minéral

L'hypothèse qui sous-tend ce type de calcul est que le ou les éléments traceurs sont spécifiques à un minéral en particulier. Par exemple, le Cu pour la chalcopryrite, le Zn pour la sphalérite ou bien le Ca et le C pour la calcite. La pyrite est calculée en dernier à partir du soufre restant après soustraction de la contribution des autres sulfures. Pour le cas de la pyrrhotite, le % massique des deux espèces (pyrite et pyrrhotite) permet de calculer leur ratio pour départager leurs contenus respectifs en soufre.

3.3.4– Spectroscopie de réflectance

Des spectres de réflectance ont été pris sur les échantillons, aussi bien lors des campagnes de terrain qu'en laboratoire. Les mesures spectrales en laboratoire ont été faites à l'Université de Sherbrooke dans une chambre noire en conditions d'éclairage contrôlé avec un *FieldSpec Pro 3* de chez ASD. Une première campagne d'échantillonnage spectrale préliminaire a été faite à l'été 2016 sur les échantillons de la première campagne. Une seconde campagne a ensuite été faite à l'hiver 2018.

3.3.4.a – Fonctionnement de l'appareil

Cet appareil permet de mesurer et calculer une intensité lumineuse relative et absolue. La lumière est captée par une fibre optique vers un système de diffraction holographique. Le spectre lumineux est ainsi partagé en ses différentes longueurs d'ondes, lesquelles sont mesurées indépendamment à l'aide de plusieurs détecteurs. C'est la réflectance d'un objet soumis à une source lumineuse qui est mesurée par l'appareil.

La portion du visible et du proche infrarouge, communément appelé VNIR pour (Visible/Near Infrared), est comprise entre 350 et 1050 nm. Ce domaine spectral est mesuré par un réseau de 512 canaux de photodiodes en silicium équipés d'un système de diffraction. Chaque canal est géométriquement positionné pour recevoir de la lumière dans une bande spectrale de 1,4 nm ; les mesures sont faites simultanément. La portion du proche infrarouge (NIR ou SWIR) à proprement dit est comprise entre 900 et 2500 nm. Cette portion du spectre est mesurée par

deux capteurs distincts. Un premier capteur (SWIR1) couvre la gamme de 900 à 1850 nm, alors qu'un deuxième capteur (SWIR2) couvre la gamme de 1700 à 2500 nm. Contrairement au VNIR, les mesures se font de manière séquentielle. Une lentille de diffraction holographique concave oscille pour faire balayer la lumière vers un seul détecteur à l'indium et arséniure de gallium. La période oscillatoire est de 200 millisecondes. Le capteur mesure donc les différentes longueurs d'ondes alors que la lentille oscille. Les deux capteurs SWIR1 et SWIR2 sont équipés de ce dispositif. Les détecteurs captent des bandes spectrales de 2 nm.

Les détecteurs en eux-mêmes produisent un courant électrique qui peut s'ajouter à celui produit par les photons mesurés. Pour éviter que cela fausse les mesures, une fonction permet d'éliminer ce phénomène appelé *dark current (DC)*. L'amplitude du phénomène est fonction de la température et du temps. La correction est à effectuer régulièrement pour obtenir des mesures fiables. De plus, le système permettant cette correction produit lui-même du DC. C'est pourquoi chaque appareil contient un fichier (ASD.INI) où sont stockées les données de correction de ce DC spécifique. Ce fichier est crucial, car sans lui, les mesures seront erronées.

Le matériel est caractérisé par sa réflectance (réflectance absolue) ; celle-ci est indépendante de la source lumineuse et c'est pour cela que la caractérisation est possible. L'appareil mesure quant à lui des réflectances relatives à la source lumineuse utilisée. Pour calculer la réflectance absolue, il est nécessaire d'utiliser des références de réflectance connue (spectralons). On utilise des spectralons avec une réflectance de 99 % pour cela. Ce sont des pastilles avec une surface quasi-Lambertienne permettant une réflexion optimale. Il en existe pour différents pourcentages de réflexions (99 %, 80 %, 60 %, 40 %, 20 %, 5 %, 2 %). Avant chaque mesure, il est donc nécessaire de calibrer l'appareil avec un spectralon et ne pas changer de configuration (orientation et distance par rapport à la source lumineuse) pour la mesure des spectres sur l'échantillon.

Comme toutes analyses de données électriques, il est aussi nécessaire de prendre en compte le bruit. De par sa nature aléatoire, il est possible de la moyenniser sur plusieurs mesures pour l'éliminer. C'est pourquoi chaque mesure de spectre est en réalité une moyenne de plusieurs acquisitions. Le nombre de ces acquisitions est paramétrable mais se paye en temps d'analyse. Un juste milieu est donc à trouver entre le temps disponible et la précision recherchée. Il est admis qu'une moyenne de 10 à 25 mesures est un bon compromis. Pour le projet, c'est 30 mesures qui ont été retenues. L'ensemble des données sont traitées par le logiciel propriétaire

RS³ installé sur l'ordinateur portable fournis avec l'appareil et spécialement configuré pour son utilisation.

3.3.4.b – Protocole d'acquisition

Campagne préliminaire

Des spectres ont été acquis, dans les laboratoires de Sherbrooke, sur les échantillons de la campagne préliminaire. Ces spectres ont été acquis en conditions contrôlées à l'aide d'un spectromètre *FieldSpec Pro 3*. Ces spectres ont été pris depuis une même chaudière mais sur les 8 sous-échantillons correspondant aux 8 classes granulométriques. Pour ce faire, les échantillons doivent être spécialement préparés.

L'acquisition des spectres se fait à l'aide d'une fibre optique. Celle-ci doit être placée au-dessus de l'échantillon et suffisamment proche de ce dernier (quelques mm idéalement) pour récupérer uniquement le spectre réfléchi par l'échantillon. Pour cela, les 8 sous-échantillons et les fines ont été placés dans 9 petites placettes hexagonales (Figure 3.16). L'acquisition peut ensuite se faire avec, comme seule source lumineuse, une ampoule appropriée qui éclaire selon un angle de 45 degrés.



Figure 3.16 : Mise en place des échantillons dans les placettes (A) et acquisition dans la chambre noire (B)

À l'allumage de l'appareil et avant toute mesure d'échantillon, il faut éliminer le *dark current* (DC). Les acquisitions se font via le logiciel *RS³* qui possède une fonction pour le supprimer. Cette opération est à répéter régulièrement. Il faut ensuite calibrer l'appareil en fonction des conditions d'éclairage. On prend pour cela la *white reference* (WR). C'est cette étape qui

nécessite un spectralon à 99 %. On place simplement la fibre optique au-dessus de la pastille pour prendre la signature lumineuse de la source.

En condition de laboratoire, la source lumineuse ne change pas. Il n'est donc pas nécessaire de refaire une WR à moins que la configuration du dispositif n'ait changée. Par sécurité, il est toujours possible de replacer le spectralon pour vérifier que la calibration est bonne. Sur le terrain, par contre, il est très important de prendre régulièrement la WR car les conditions d'éclairage peuvent changer rapidement, comme par exemple si un nuage passe. Une fois ces précautions prises il est important de prendre les mesures rapidement, surtout sur le terrain. Au laboratoire, les conditions sont en théorie stables mais la source lumineuse est également source de chaleur. Le différentiel de chaleur peut induire des erreurs. Il est donc préférable de prendre les mesures rapidement là aussi. C'est pourquoi les sous-échantillons ont été préparés à l'avance pour une acquisition rapide. Pour chaque série d'échantillons (comme 15-1500-1-A1 par exemple), le DC a été éliminé et une calibration de la WR a été effectuée, soit une élimination de DC et une WR tous les 9 échantillons (8 classes + fines).

Deuxième campagne

Pour les assemblages de minéraux purs et les échantillons de blocs de la deuxième campagne le protocole de mesure est un peu différent. Les poudres ont été placées dans une boîte de pétri pour prendre leur signature spectrale. Il est fait de même pour les fractions des blocs (Figure 3.17).



Figure 3.17 : Méthode d'acquisition des spectres avec la boîte de Pétri

Les poudres sont d'abord compactées pour obtenir une surface horizontale. Cela permet d'éviter les erreurs de mesure dus à l'inclinaison éventuelle de l'échantillon. Ensuite, la surface

compactée doit être rompue en appliquant des coups de pinceaux de façon verticale. En effet, une surface compactée se rapproche d'une surface Lambertienne, ce que l'on cherche toujours à éviter pour ne pas avoir une réflexion dans une orientation préférentielle mais de façon diffuse dans toutes les directions. Le fait de compacter une poudre la rend plus claire. Entre deux compactages sur une même poudre, il est possible d'obtenir deux signatures différentes et donc de produire des erreurs. On crée pour cela une certaine rugosité sur la surface de l'échantillon en s'assurant de minimiser celle-ci pour produire une réflectance diffuse et ainsi plus représentative de l'échantillon. Si cela n'est pas fait, la lumière réfléchi qui est captée par la fibre optique provient d'une seule zone réduite de l'échantillon. Il est de plus possible que certaines ombres soient plus importantes selon un certain angle de vue. Pour chaque poudre, les signatures sont donc prises quatre fois en faisant tourner l'échantillon de 90 degrés pour chaque mesure. La signature finale est une moyenne de ces quatre mesures. Cette méthode permet de minimiser les erreurs dues aux ombres produites par la rugosité.

Pour les deux blocs, 16-ZFA-6 (B2) et (B3), les spectres de chaque fraction ont été acquis (2 mm-630 μm , 630-212 μm , 212-106 μm et < 106 μm). Ces signatures ont été comparées avec le spectre d'une poudre de roche totale de ces mêmes blocs. Pour les assemblages de minéraux purs, les signatures de la pyrite, de la calcite et de l'albite seront acquises pour servir de référence. Ensuite, les signatures des différents assemblages ont été acquises et mises en relation avec les spectres des minéraux purs.

Dans un second temps les différentes fractions des blocs ont été disposées sur un bloc référence (plaquette) provenant lui aussi de la Mine Canadian Malartic. Ce bloc référence, 16-ZFA-1, est un échantillon de grewacke comme l'on en trouve largement dans la fosse. Il a été façonné en une plaquette pour permettre de pouvoir disposer les poudres des autres échantillons sur sa surface (Figure 3.18).



Figure 3.18 : Acquisition des poudres avec le bloc référence (plaquette) sous-jacent

Pour chaque fraction des deux blocs, les poudres ont été disposées selon trois degrés de recouvrement du bloc. La poudre a d'abord été placée de sorte qu'elle recouvre complètement la plaquette. De cette manière, on obtient en théorie uniquement la signature de la poudre. Ensuite, la poudre recouvrira environ la moitié de la surface de la plaquette. Pour terminer, la dernière configuration se fera avec peu de poudre et donc une plus grande surface de la plaquette visible. De cette manière il est possible de voir dans quelle mesure les signatures de la poudre et la plaquette sous-jacente vont former une signature composite intermédiaire. La même opération a été également faite avec les poudres de trois assemblages de minéraux purs (8 %S, 1 %C ; 1 %S, 8 %C et 3 %S, 1 %C). Les proportions de recouvrement ont été établies à l'aide du logiciel d'analyse d'image ImageJ.

Pour les tests d'humidité, le protocole de mesure est le suivant. Les échantillons sont mélangés avec de l'eau pour obtenir une teneur en eau de 50 %. Ils doivent être bien homogénéisés puis placés dans un récipient posé sur une balance au-dessous de la fibre optique (Figure 3.19).



Figure 3.19 : Montage pour l'acquisition des spectres du test d'humidité

La masse initiale de poudre mélangée avec l'eau est notée. Ensuite, l'échantillon est laissé sous la lampe qui produit suffisamment de chaleur pour permettre à l'eau de s'évaporer relativement rapidement. Des spectres sont alors pris à intervalles réguliers tout en mesurant la masse du mélange. Entre chaque mesure, la poudre doit être homogénéisée pour ne pas prendre la signature d'une surface qui s'assèche de plus en plus. Cela ne serait pas représentatif.

ImageJ

Le logiciel ImageJ a été utilisé pour tenter de quantifier le pourcentage de recouvrement des poudres sur la plaquette de référence 15-1500-A1 (greywacke). Cette opération intervient lors des essais sur l'interaction des poussières avec la roche et sa conséquence sur la signature spectrale de cette dernière. Pour cela des photos des différents essais et recouvrement ont été faites (Figure 3.20).

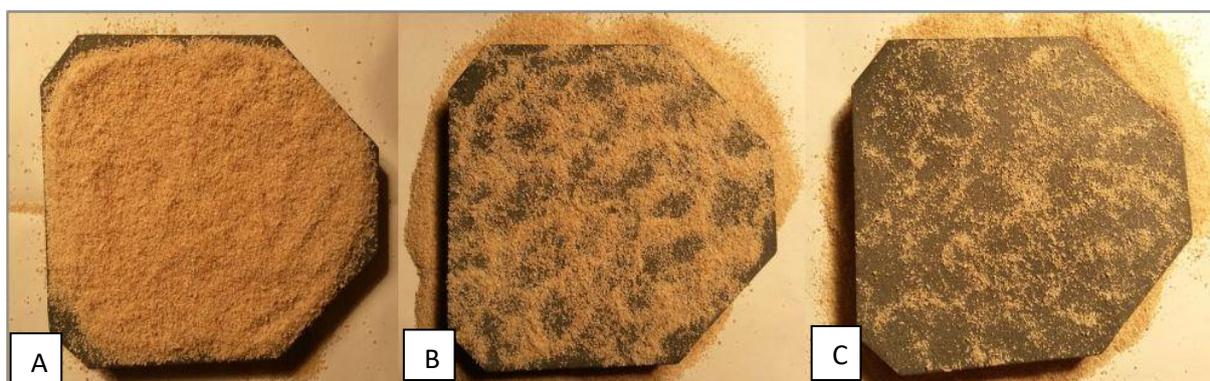


Figure 3.20 : Présentation des différentes proportions de recouvrement de la plaquette par l'échantillon 16-ZFA-6 (B3). Proportion 1 (A), proportion 2 (B), proportion 3 (C)

Dans la figure ci-dessus, l'échantillon 16-ZFA-6 (B3) est placé sur le bloc référence. La première étape consiste à définir l'espace de travail. Il faut pour cela détourner la plus grande zone représentative du recouvrement souhaité. Pour la proportion P1 (recouvrement complet du bloc) il faut donc exclure les angles de la plaquette qui ne sont pas complètement recouvertes (Figure 3.21).



Figure 3.21 : Détourage de la zone d'étude pour l'échantillon 16-ZFA-6 (B3) P1

La seconde étape consiste à transformer l'image en image binaire. C'est-à-dire uniquement avec des pixels noir et blanc (Figure 3.22). Les parties de l'image hors du cadre sont également exclus.

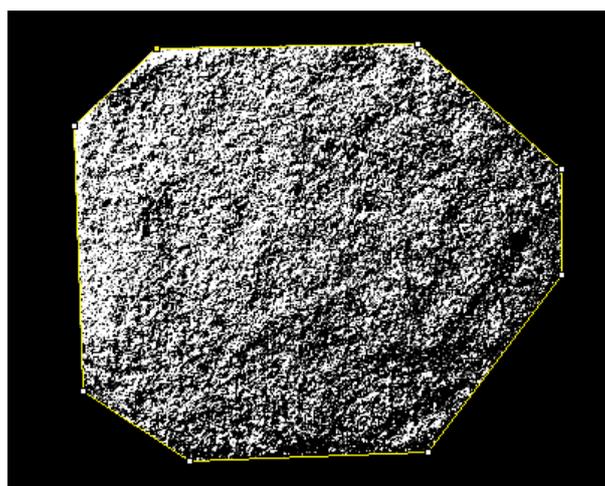
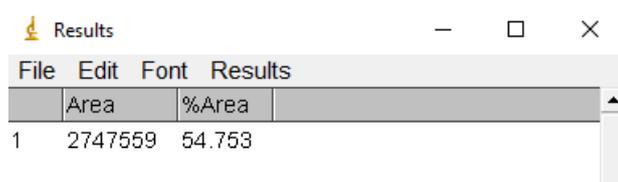


Figure 3.22 : Image binaire de l'échantillon 16-ZFA-6 (B3) P1

Le logiciel est alors capable de déterminer le pourcentage de pixels noirs. Dans ce cas, la différence entre pixel noir et pixel blanc n'exprime pas la différence entre le bloc référence et

la poudre. Ici, la poudre recouvre 100 % du bloc mais la technique ne permet pas de le mettre en évidence. Le logiciel nous donne ici 54,8 % de pixels noirs (Figure 3.23).



	Area	%Area
1	2747559	54.753

Figure 3.23 : Capture d'écran des résultats obtenus avec ImageJ pour l'échantillon 16-ZFA-6 (B3) P1

La limite du logiciel est sa capacité à identifier les deux entités que sont la plaquette et la poudre qui le recouvre. Dans ce cas précis, ces résultats ne sont pas exploitables. Les pixels noirs correspondent aux parties ombragées des grains. Ils ne font qu'exprimer le pourcentage d'ombre sur l'image.

On peut faire le même exercice avec la proportion intermédiaire P2 afin de déterminer l'efficacité de la méthode dans un cas plus favorable où la poudre ne recouvre pas entièrement la plaquette. On répète alors les mêmes étapes (Figure 3.24).

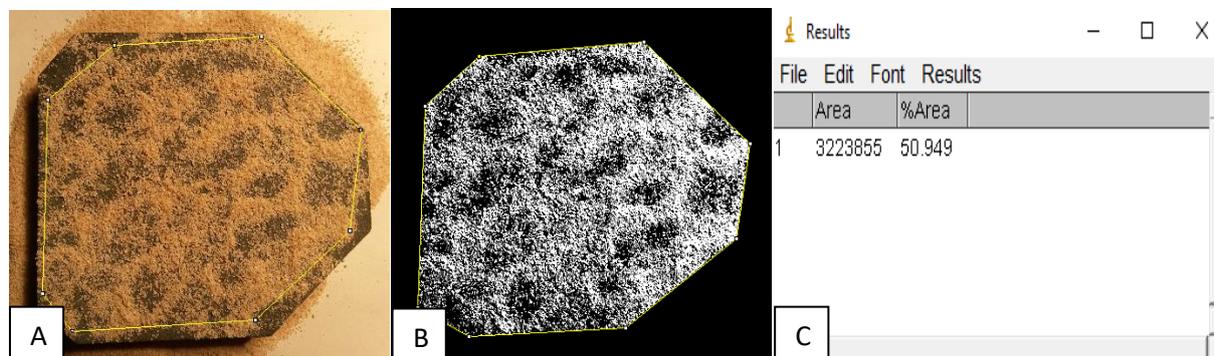


Figure 3.24 : Procédure complète d'analyse avec ImageJ pour l'échantillon 16-ZFA-6 (B3) P2. Détourage (A), image binaire (B), résultats (C)

On voit qu'ici les résultats nous donnent un pourcentage de pixels noirs de 50,9 %. Les pixels noirs comportent dans ce cas les ombres mais aussi les parties plus sombre de l'image qui correspondent à la plaquette. Cela donne un pourcentage de recouvrement de 49,1 %. Les résultats semblent ici représentatifs du pourcentage réel qui devait être de 50 %, mais on ne peut pas vérifier ce 'pourcentage réel'. La mise en place des poudres se fait manuellement et le pourcentage de recouvrement voulu est déterminé uniquement à l'œil. Le nombre de pixels noirs (qui devraient correspondre au bloc référence sombre uniquement) est sûrement plus important qu'il ne devrait l'être car les ombres sont aussi prises en compte. Malgré cette marge

d'erreur non quantifiable, les résultats semblent être représentatifs du recouvrement voulu. Finalement pour la proportion P3 on obtient ceci (Figure 3.25).

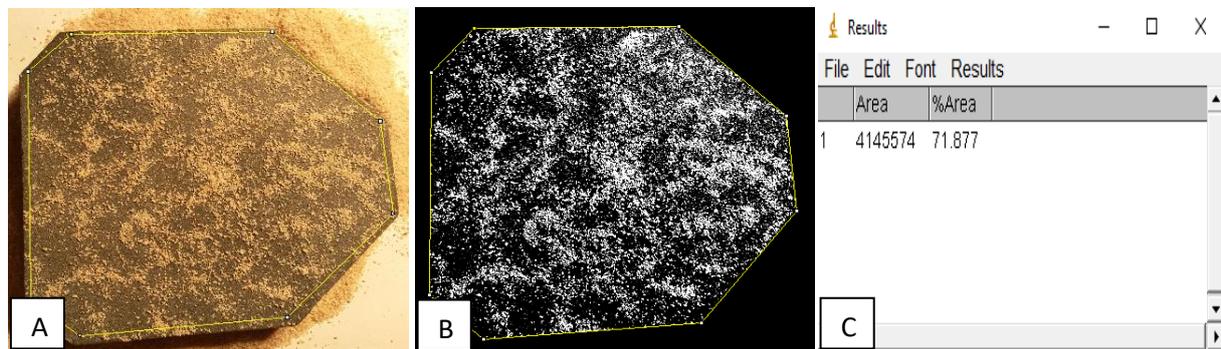


Figure 3.25 : Procédure complète d'analyse avec ImageJ pour l'échantillon 16-ZFA-6 (B3) P3. Détourage (A), image binaire (B), résultats (C)

Cette fois-ci, on obtient un pourcentage de pixels noirs de 71,7 %, soit un pourcentage de recouvrement de 28,3 %. Les résultats semblent cohérents là aussi. Malgré tout, il n'est pas possible de savoir si les proportions déterminées par le logiciel sont correctes dans la mesure où il n'est pas possible de savoir précisément à l'œil le pourcentage de recouvrement pendant la mise en place de la poudre sur la plaquette de roche référence. De plus, 16-ZFA-6 (B3) est un échantillon favorable pour la méthode car la poudre est orange (porphyre) alors que le bloc est gris sombre. Dans le cas où la poudre est également du greywacke (donc sombre également), le contraste ne permet pas de différencier la poudre de la roche. Les résultats sont alors inexploitable (Figure 3.26).

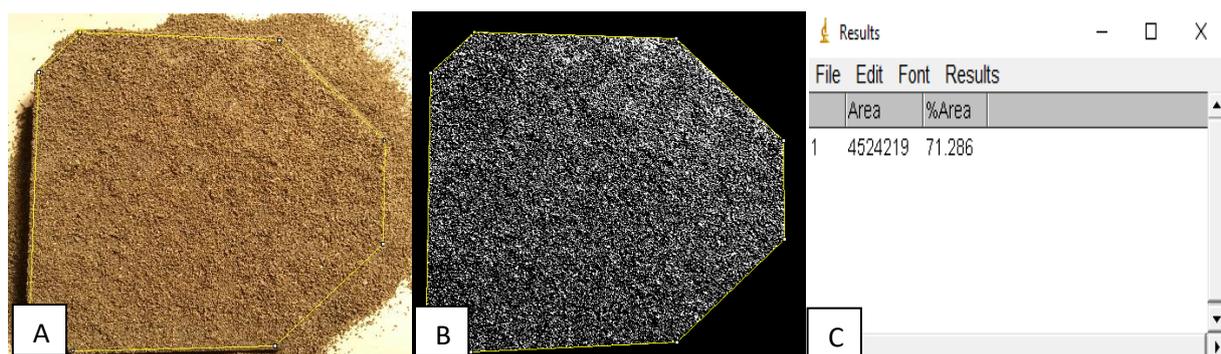


Figure 3.26 : Procédure complète d'analyse avec ImageJ pour l'échantillon 16-ZFA-6 (B2) P2. Détourage (A), image binaire (B), résultats (C)

Dans ce cas, le pourcentage de recouvrement est de 100 %. On voit qu'il est difficile de le déterminer à l'œil. Le logiciel nous donne 71,3 % de pixels noirs, soit 28,7 % de recouvrement. Ce résultat est très proche du précédent alors que cette fois-ci la plaquette est totalement

recouverte. C'est un exemple des limites de la méthode. Le logiciel permet donc d'avoir des résultats approximatifs dans le meilleur des cas ou bien inexploitable dans des cas moins favorables. C'est pourquoi le pourcentage de recouvrement avec ImageJ sera uniquement déterminé de façon semi-quantitative pour les échantillons où le contraste de couleur entre la poudre et la roche est suffisant ou bien là où la taille des grains permet un résultat satisfaisant bien que non vérifiable.

CHAPITRE 4 – RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les défis mise au jour lors de la première campagne ont permis de mieux comprendre les enjeux de ce projet à savoir obtenir de bonnes mesures spectrales et parvenir à en extraire de l'information malgré une lithologie très homogène tout en considérant la problématique des poussières. La deuxième campagne a donc bénéficié de l'expérience acquise lors de la première. Les approches ont pu être adaptées pour répondre au mieux aux défis du projet.

4.1 – Résultats de la première campagne

4.1.1 – Étude granulométrique

Dans le cadre de la première campagne le matériel de 10 chaudières a été préparé afin de produire 90 échantillons (8 classes + fines). Le début du travail a d'abord consisté à faire une étude granulométrique des roches pour les caractériser.

4.1.1.a – Tamisage classique

Une étude granulométrique a été effectuée sur les granulats compris entre 2 et 20 mm dans chaque chaudière. Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous (Figure 4.1).

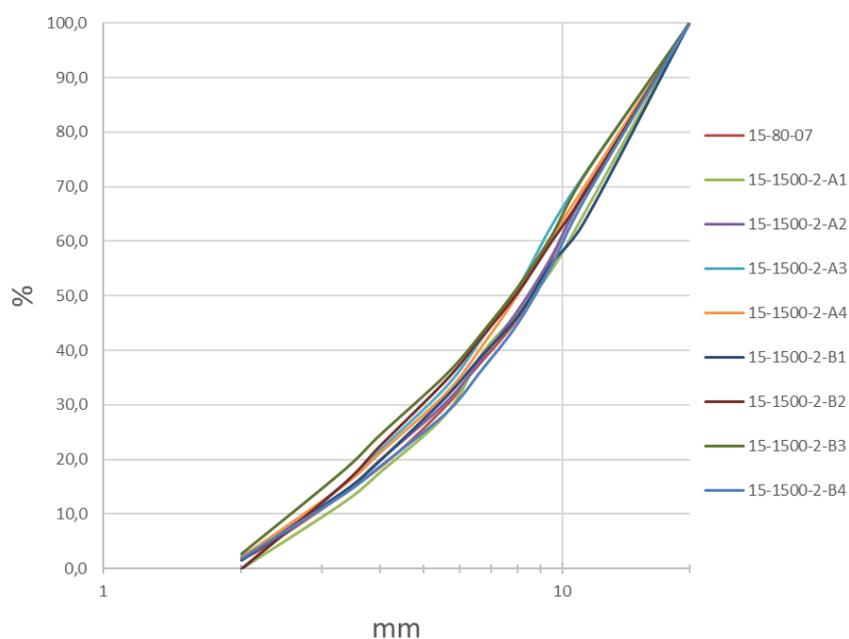


Figure 4.1 : Courbe granulométrique des granulats des 10 chaudières

Les résultats sont très homogènes entre les différentes chaudières prises dans la mine pour une granulométrie entre 2 et 20 mm. Cela traduit la grande homogénéité rhéologique des roches de

la Mine Canadian Malartic. Différentes zones au sein de la fosse produisent après sautage un matériel similaire d'un point de vue granulométrique.

4.1.1.b – Tamisage laser

La granulométrie des différentes classes de granulats au sein d'une même chaudière a été étudiée. On cherche ici à connaître les éventuelles différences de chimie dû au fractionnement granulométrique. Bien que chaque classe corresponde en réalité à une gamme granulométrique précise, ces classes ont été pulvérisées pour avoir la même taille de grains. Cette étape est nécessaire pour pouvoir faire les analyses. En effet, des analyses chimiques ainsi que des signatures spectrales seront prises sur ces fractions pour déterminer s'il y a un fractionnement chimique. Pour la partie concernant les spectres de réflectance, il faut que toutes les classes aient la même taille de grains pour ne pas que cela influe sur leurs signatures spectrales. Des mesures granulométriques ont donc été faites au granulomètre laser sur les différentes fractions pour s'assurer que leur taille est similaire (Figure 4.2).

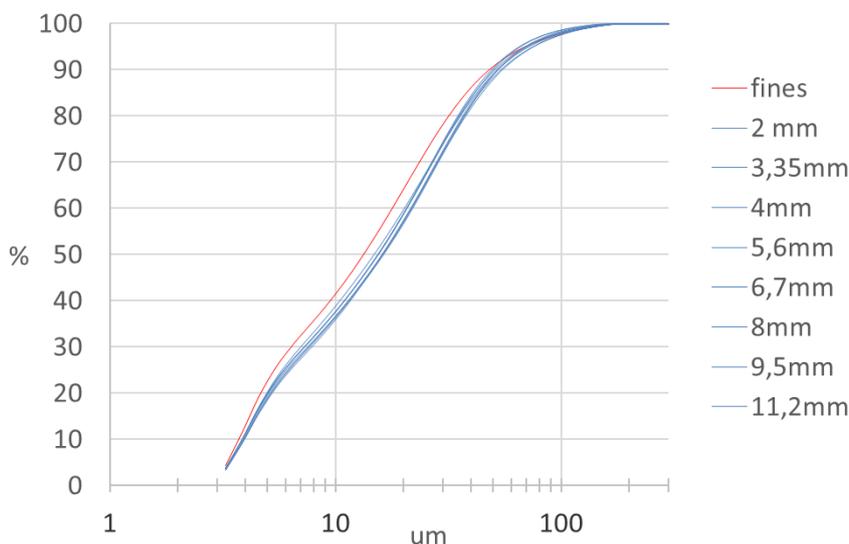


Figure 4.2 : Courbe granulométrique de l'échantillon 15-1500-2-A1

Ces mesures ont permis, à l'image de la chaudière 1-1500-2-A1, de constater que les courbes granulométriques sont suffisamment proches pour considérer que l'effet de la granulométrie ne sera pas significatif sur la signature spectrale.

4.1.2 – Analyses S/C

Elles sont pertinentes car elles permettent d'étudier le fractionnement du soufre et du carbone dans les échantillons. Les concentrations en soufre nous informent sur la pyrite et le carbone

sur la calcite. Les graphiques ci-dessous présente le pourcentage en carbone et en soufre des différents échantillons en fonction des fractions granulométriques. Or on constate pour le carbone un enrichissement pour la fraction la plus fine correspondant à < 2 mm (fines) (Figure 4.3). On ne trouve pas tout à fait la même tendance pour le soufre (Figure 4.4). Bien que les fines semblent montrer un enrichissement, il y a une large gamme de variations. Elles ne semblent pas significativement plus enrichies par rapport aux autres fractions.

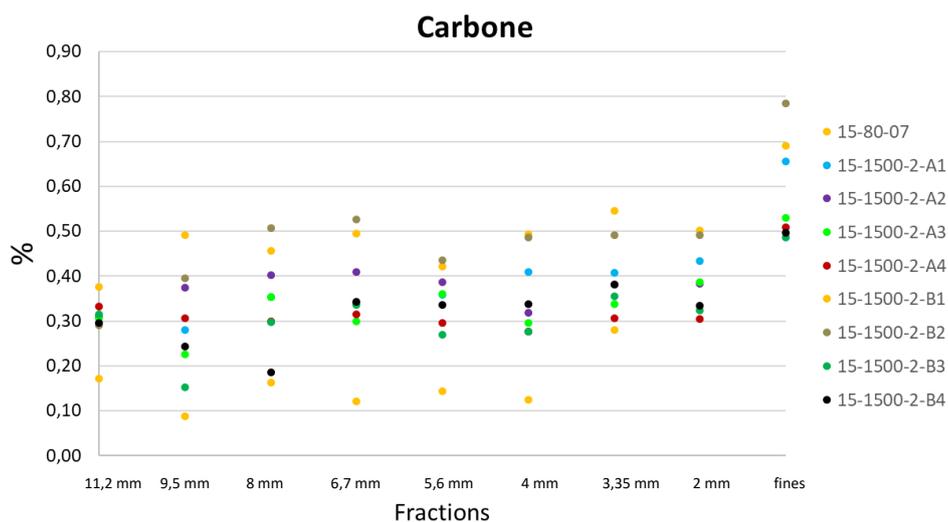


Figure 4.3 : Concentration en carbone des différentes fractions granulométriques pour les échantillons de la première campagne

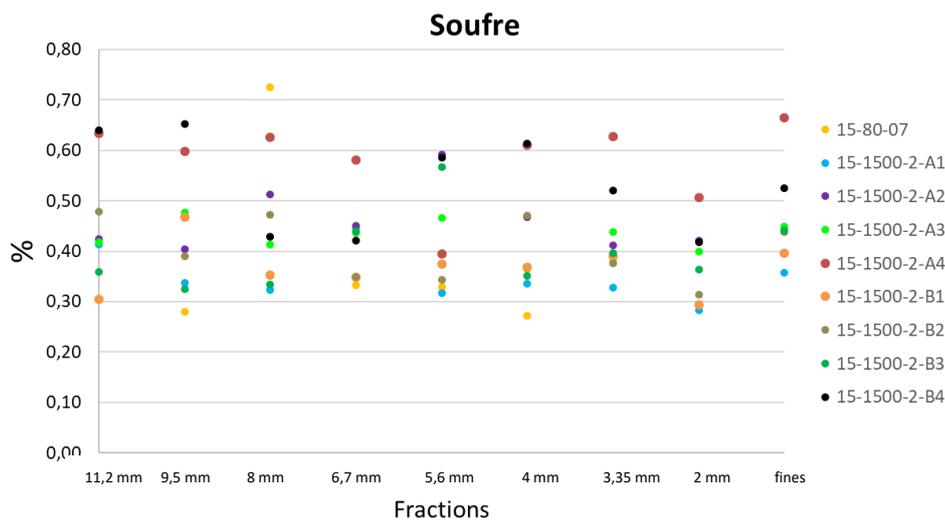


Figure 4.4 : Concentration en soufre des différentes fractions granulométriques pour les échantillons de la première campagne

L'enrichissement en carbone correspond donc à un enrichissement en calcite pour la fraction fine. Etant donné que la calcite a un indice de dureté faible (3), il paraît logique de la retrouver

en plus forte abondance dans la fraction la plus fine. Cela dit, la gamme de %C varie dans une gamme restreinte à 1 %. La pyrite, qui a une dureté plus grande (6-6½), ne semble pas montrer d'enrichissement significatif dans les fractions les plus fines.

4.1.3 – Microscopie

Les observations ont été faites au microscope optique polarisant en lumière réfléchie sur un échantillon représentatif de la chaudière 15-1500-2-A1. Les observations ont permis de confirmer que le principal sulfure est la pyrite (Figure 4.5) avec des traces de chalcopryrite et de pyrrhotite. La pyrite se présente sous forme de grains libres ou inclus, parfois attachés au minéraux de gangues (silicates, carbonates). Le rutile et la magnétite sont rares.

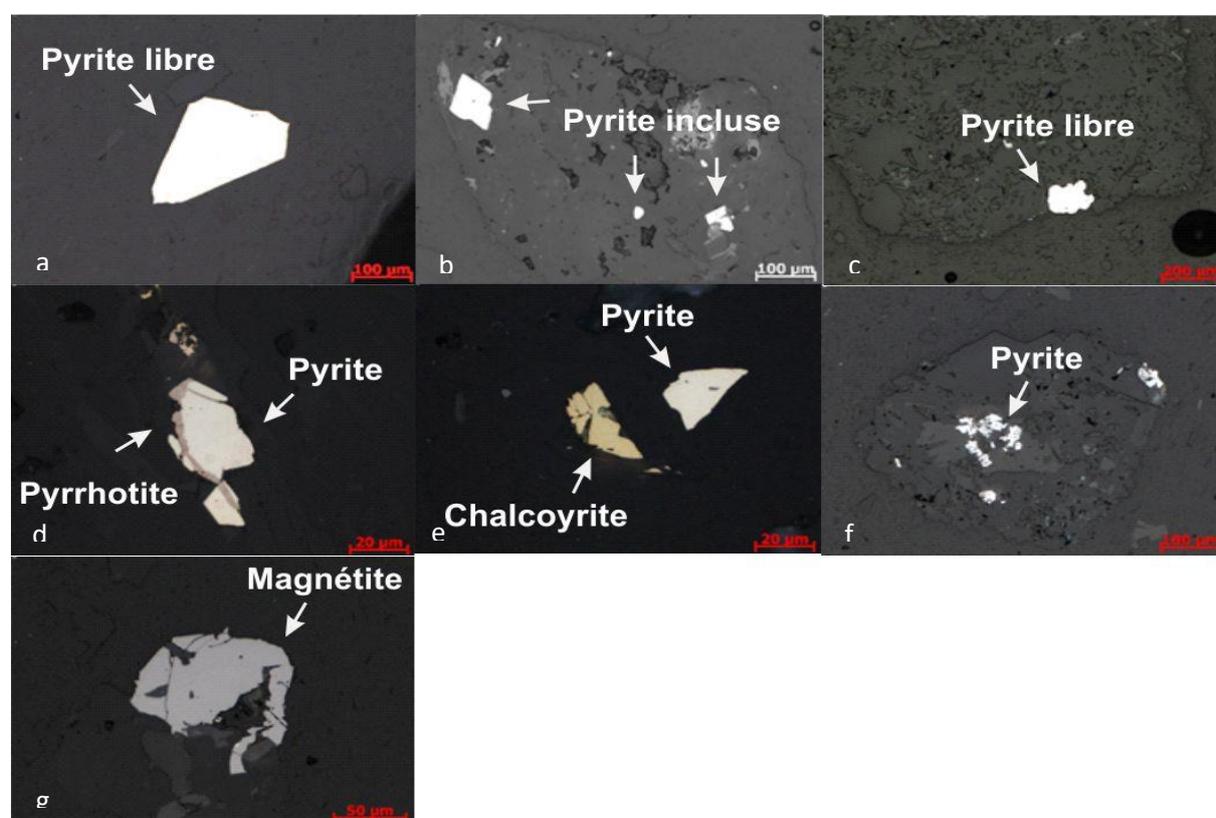


Figure 4.5: Minéralogie des sulfures présents dans les échantillons de la Mine Canadian Malartic

4.1.4 – Spectroscopie

Les mesures de spectres de réflectance ont été acquises au laboratoire de télédétection de l'UdeS à Sherbrooke. Au cours de cette campagne, 230 signatures spectrales ont été acquises. Le but de ces mesures est de déterminer l'influence des différentes classes sur la signature spectrale. On a vu que les échantillons avaient tous une granulométrie identique. Les différences

observables seront ainsi dues à la chimie de l'échantillon et non à sa granulométrie réelle au moment de la mesure. Les mesures sont délicates dans la mesure où les variations recherchées sont subtiles. Elles nécessitent une préparation et un protocole rigoureux. Il a de plus fallu résoudre un certain nombre de contretemps propre à l'appareil.

4.1.4.a – La source lumineuse

L'acquisition des spectres nécessite une lampe spécialement conçue pour fournir une lumière constante sur l'ensemble du spectre de 350 à 2500 nm pour éclairer des échantillons. Malheureusement cette ampoule a rendu l'âme dès les premières mesures ; il a donc fallu la remplacer au plus vite mais il n'était pas possible d'attendre la livraison de la nouvelle ampoule. L'ampoule a donc été remplacée par un éclairage d'extérieur puissant mais non prévu à cet effet. Cela crée une source d'erreur car le spectre lumineux de ses ampoules halogènes n'est pas stable, ce qui produit plus de bruit aux extrémités du spectre.

Il a tout d'abord fallu vérifier le bon fonctionnement du FieldSpec Pro 3 et le calibrer. La première opération concerne le capteur SWIR2. Pour deux mesures d'un même échantillon, on observe un saut lors de l'activation du capteur SWIR2 (Figure 4.6). Dans un cas, la réflectance a été surestimée passé 1750 nm, dans l'autre cas c'est l'inverse. De plus les courbes finissent par se rejoindre. Si les courbes étaient restées parallèles après le saut, il aurait simplement fallu les réajuster. Le fait que les courbes se rejoignent démontre un défaut de ce capteur et indique que l'on ne peut pas suffisamment se fier à la gamme comprise entre 1750 et 2250 nm

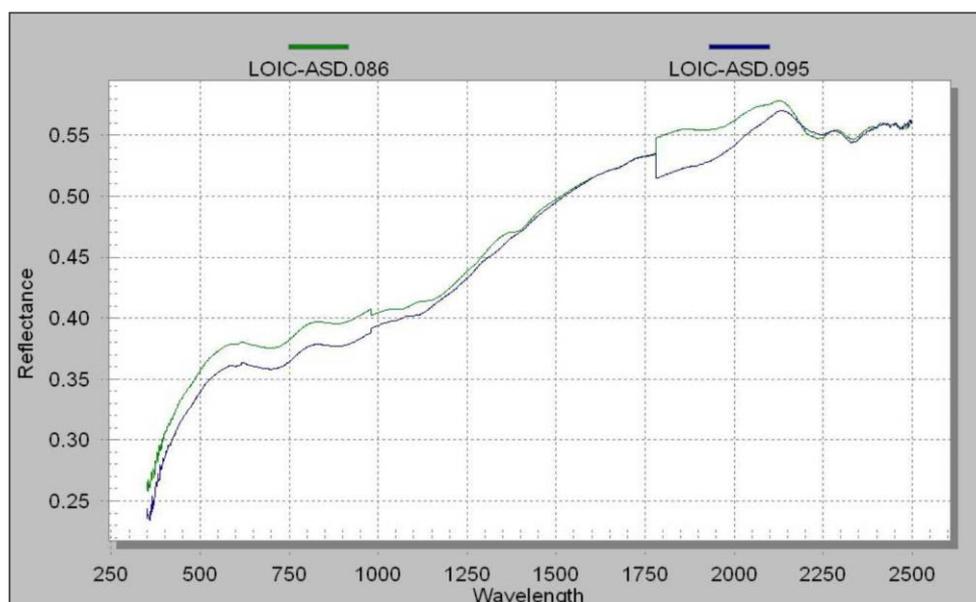


Figure 4.6 : Comparaison de deux signatures du même échantillon avec le FieldSpec Pro

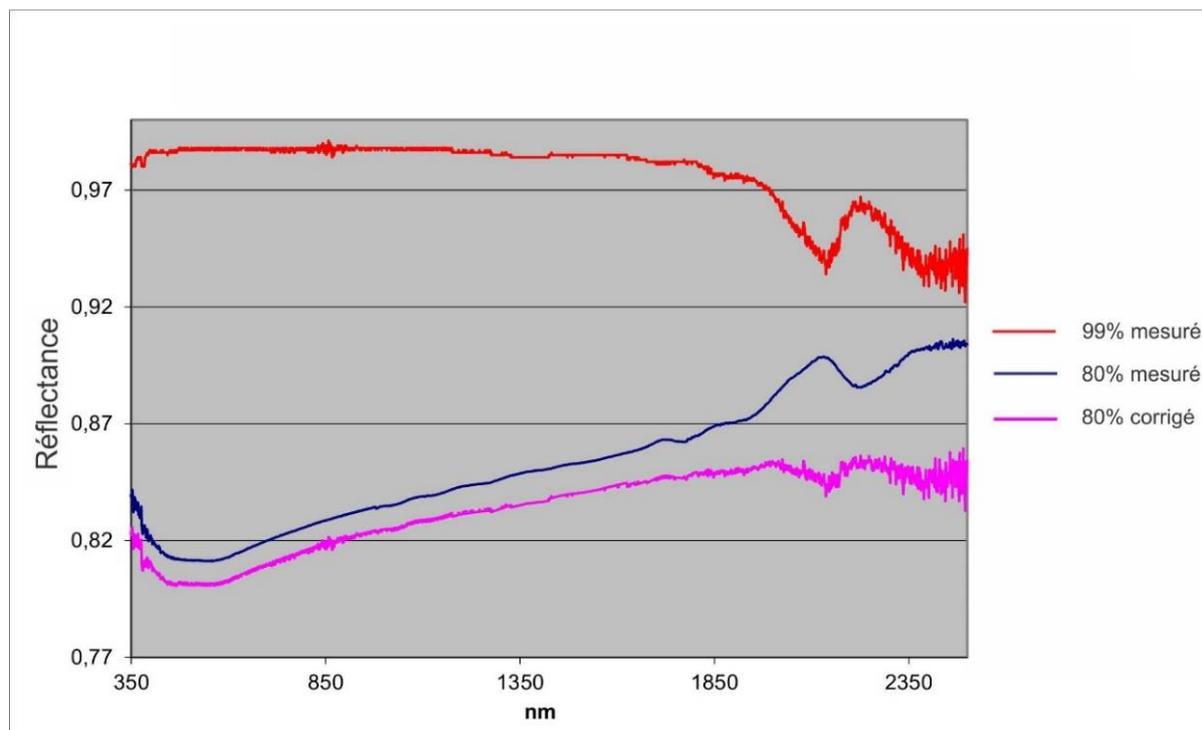


Figure 4.7 : Comparaison des spectres avant et après correction

Le deuxième ajustement à faire concernait les spectralons utilisés pour calibrer l'appareil avant de prendre les mesures. Plusieurs spectralons sont vendus avec l'appareil (99 %, 80 %, 60 %, 40 %, 20 %, 5 %, 2 %), incluant les données d'usine des spectres que sont sensé avoir ces différents spectralons. Il a été identifié que les spectres mesurés ne correspondaient pas avec les spectres théoriques (Figure 4.7). Afin de corriger cela, il a fallu appliquer un facteur de correction. Le spectre de référence à 99 % est considéré par l'appareil comme une référence à 100 %. Or le spectralon n'est qu'à 92 % vers 2500 nm. Ces erreurs cumulées sont une source d'erreur supplémentaire. Après avoir appliqué un facteur de correction, les signatures spectrales sont plus satisfaisantes (Figure 4.8).

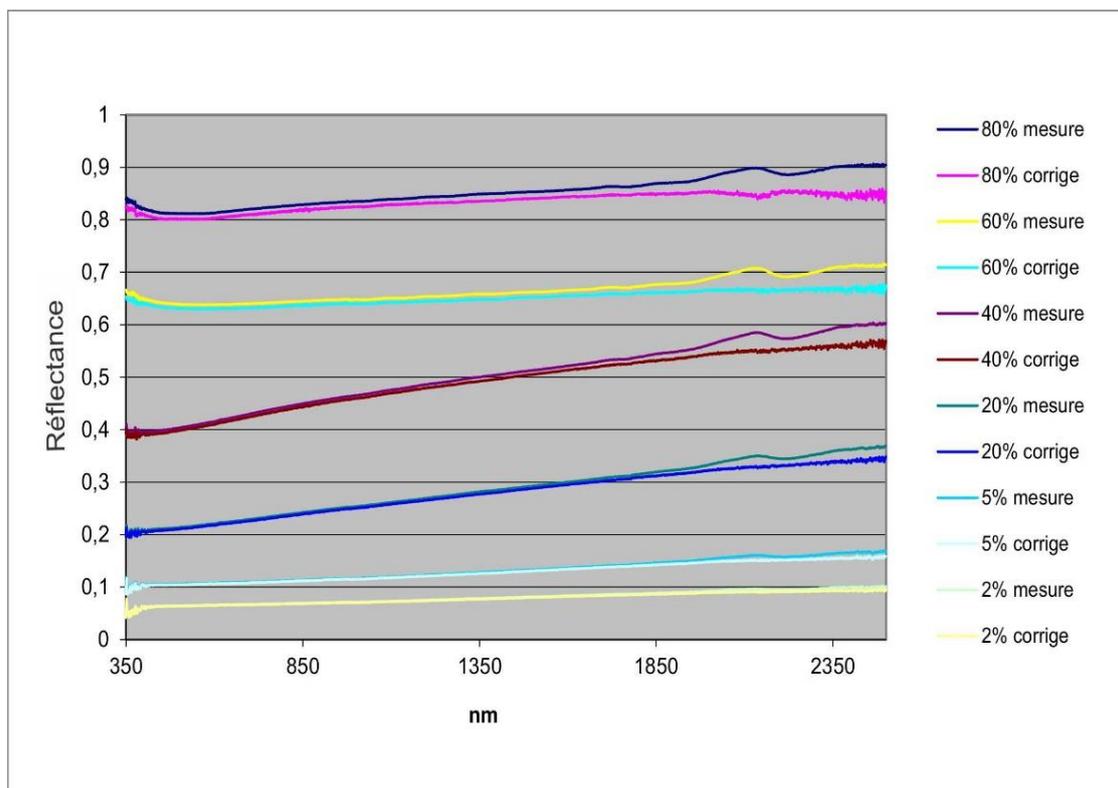


Figure 4.8 : Effet de la correction pour les différents spectralons

Un autre problème est aussi apparu. Plusieurs mesures d'un même spectralon prises chacune avec un écart de 30 s montre une dérive aléatoire. Il n'y avait donc pas de reproductivité des résultats (Figure 4.9). L'écart constaté semblait être dû aux ampoules halogène. En effet, il leur faut un certain temps pour qu'elles atteignent leur luminosité optimale et cela s'accompagne aussi d'une augmentation de la température. Pour pallier à ce problème, les mesures ont été faites une dizaine de minutes après que les ampoules soient allumées et non pas immédiatement après comme c'était le cas. De plus, on peut observer un saut un peu avant 1000 nm au passage du capteur SWIR1. Celui-ci étant constant, cela ne pose pas de problème. Il peut être corrigé facilement.

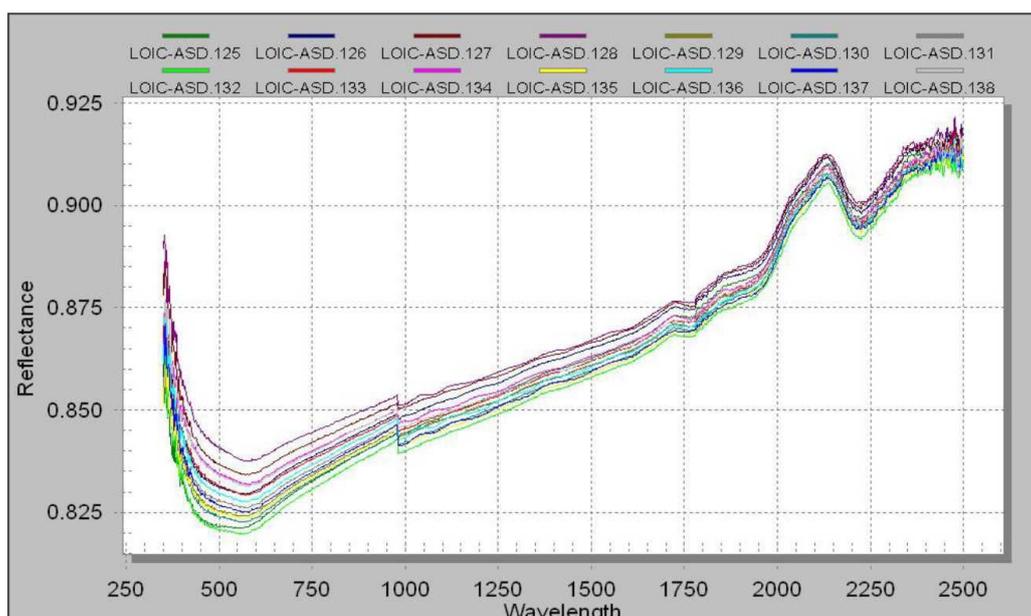


Figure 4.9 : Dérive aléatoire de plusieurs signatures sur un même échantillon

Après ces étapes d'ajustement nécessaire, les spectres obtenus étaient plus satisfaisants (Figure 4.10). Ces résultats ont été obtenus avec la classe 11,2 mm de la chaudière 15-80-07. Les différences entre les spectres ne dépassent pas 2 % en termes de réflectance. Les résultats finalement obtenus ont montrés des différences subtiles entre les signatures spectrales des différentes classes (Figure 4.11).

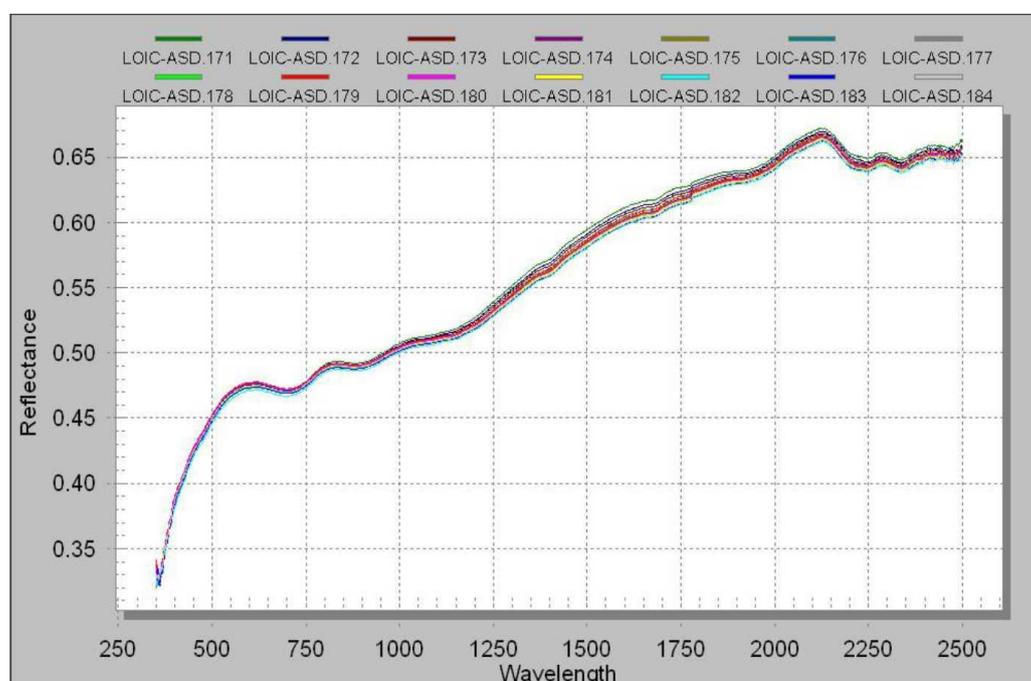


Figure 4.10 : Signatures successifs d'un même échantillon après correction

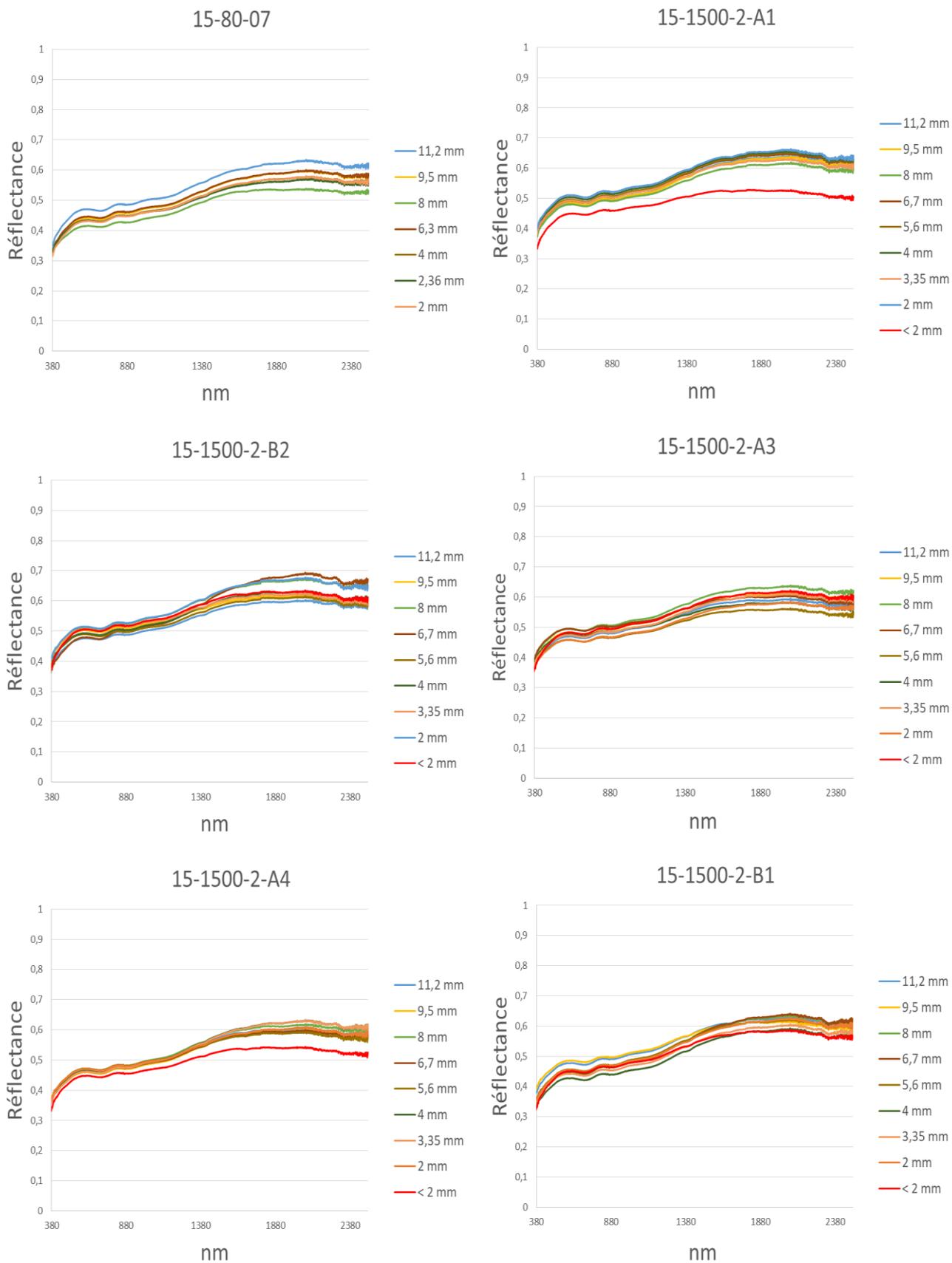


Figure 4.11: Signatures spectrales finales des échantillons de la première campagne

On peut donc supposer, compte tenu des facteurs d'erreurs écartés, que ces différences sont bien résultante de la chimie des échantillons. Pas de tendance claire ne semble cependant se dessiner. Sur les chaudières 15-1500-2-A1 et 15-1500-2-A4, on voit un peu se différencier les fines des autres classes, mais ce n'est pas le cas pour des 4 autres chaudières. Ces écarts sont en l'état non expliqués, c'est pourquoi d'autres mesures ont été prévues pour aller plus loin. Les différentes classes ne sont peut-être pas suffisamment homogénéisées. Cela peut aussi induire des erreurs. Cependant, les fines ont tendance à avoir une réflectance plus importante du fait de leur granulométrie mais là c'est l'inverse que l'on peut observer pour les chaudières 15-1500-2-A1 et 15-1500-2-A4.

Quoi qu'il en soit, les problèmes rencontrés démontrent que l'approche utilisée ne permet pas de répondre à notre question. Pour les prochaines mesures, il faudra changer d'approche. De plus, l'appareil montrait des dysfonctionnements. Il reste trop de variations inexplicables, notamment sur les spectralons. On peut ajouter que les conditions d'acquisition n'ont pas été optimales avec des ampoules halogènes non prévus à cet effet. Ces résultats montrent qu'il y a peut-être des différences à observer mais qu'il faut utiliser l'appareil dans des conditions optimales, ce qui n'était pas tout à fait le cas pour cette campagne de mesure. Les problèmes rencontrés sont néanmoins autant d'enseignements à prendre en compte pour parfaire la deuxième campagne de mesure.

4.2 – Résultats de la deuxième campagne

4.2.1 – La campagne de drone

Au cours de cette deuxième campagne, 27 chaudières ont été prélevées, 10 dans les haldes et 17 dans la fosse. Pour 14 des 17 chaudières de la fosse, un bloc référence a été ajouté. Les blocs ont été préparés au laboratoire. Pour ces 14 blocs, compte tenu qu'il fallait faire 3 sous échantillons par blocs, cela fait 42 échantillons. Les images prises dans la fosse avec le drone ont été traitées par Javier Garcia (Figure 4.12). Les quelques résultats suivants proviennent de son propre rapport de maîtrise (Garcia, 2017). Pour l'exercice, des matrices sont utilisées pour tenter d'établir une image classifiée, c'est pourquoi seule la partie encadrée en bleu a été analysée (Figure 4.13).

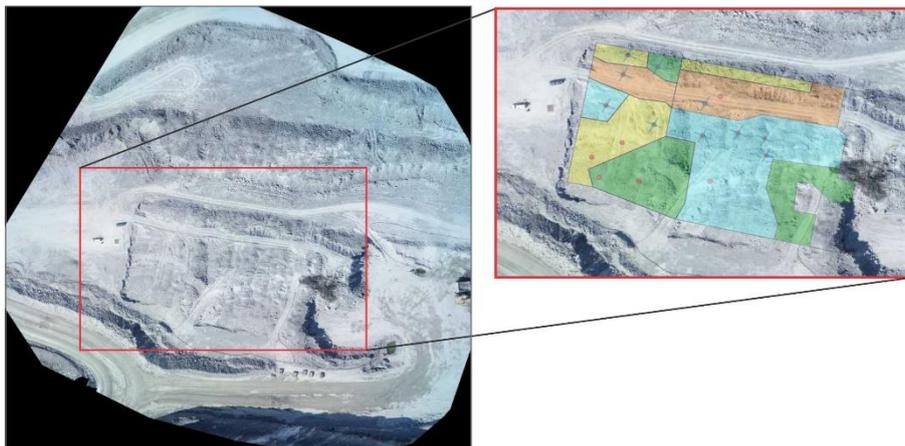


Figure 4.12: Images RGB de la zone d'étude dans la fosse de la Mine Canadian Malartic



Figure 4.13 : Limites de l'image Pika II (Rouge) et la zone étudié (Bleu), à droite. (Javier Garcia, 2018)

Deux méthodes ont été mises en place pour classifier la zone : la méthode SAM et la méthode MTMF. La méthode SAM mesure la distance spectrale angulaire entre les pixels de l'image avec celle d'*endmember* définies. Ces *endmember* sont des blocs provenant de la zone en question. Il y a un bloc de greywacke, un bloc de porphyre potassique et un bloc de porphyre sodique. La méthode MTMF utilise une approche de démixage linéaire de pixels mixtes. La méthode SAM a permis de dresser une carte thématique composée des trois *endmember* (Figure 4.14).

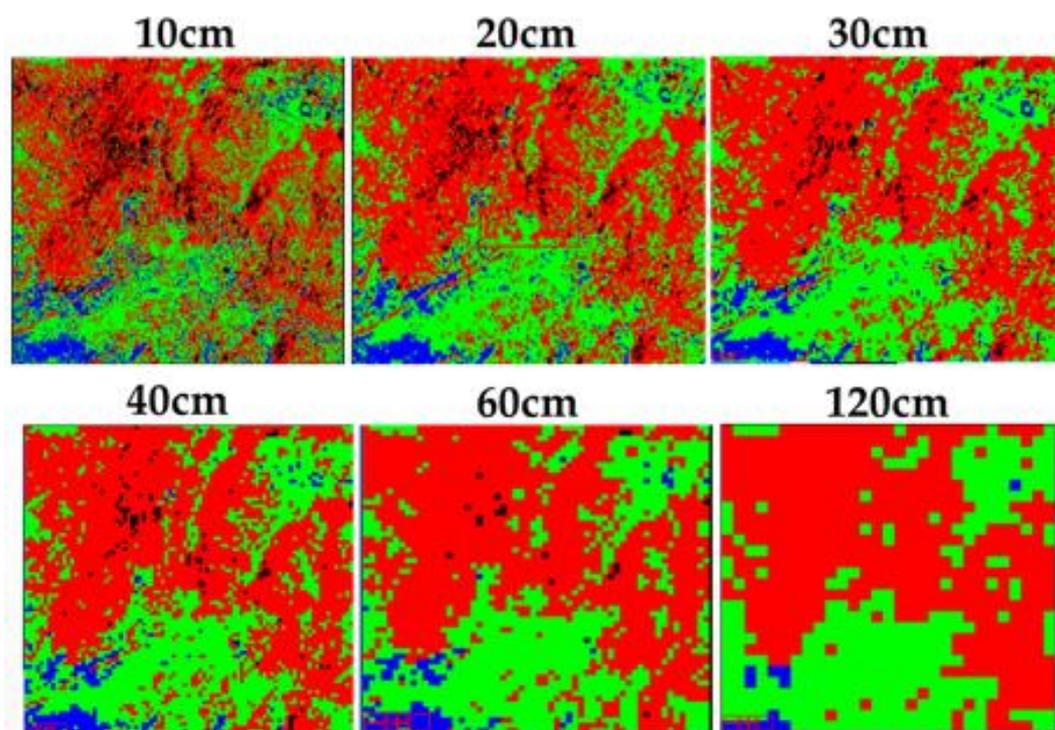


Figure 4.14 : Images résultantes de la classification par SAM des images Pika de résolution spatiale originale et agrégées (10, 20, 30, 40, 60 et 120 cm). (Garcia, 2018)

Les images sont présentées à différentes résolutions. Les pixels rouges correspondent au greywacke, les pixels verts au porphyre sodique et en bleu au porphyre potassique. Les pixels noirs n'ont pas pu être classifiés et correspondent à des zones d'ombres où il y a une perte d'information. On peut constater que cette méthode permet de différencier trois lithologies sur cette image. On retrouve ces zones à l'œil nu sur les images brutes (Figure 4.15). Cependant, il n'y a pas eu de validation effectuée sur la zone pour confirmer la véracité de cette classification. La méthode MTMF a été moins concluante. Il reste beaucoup de pixels non traités et elle fonctionne mieux avec des résolutions fines (Figure 4.16). Sur ces images, la plupart des pixels n'ont pu être classés.

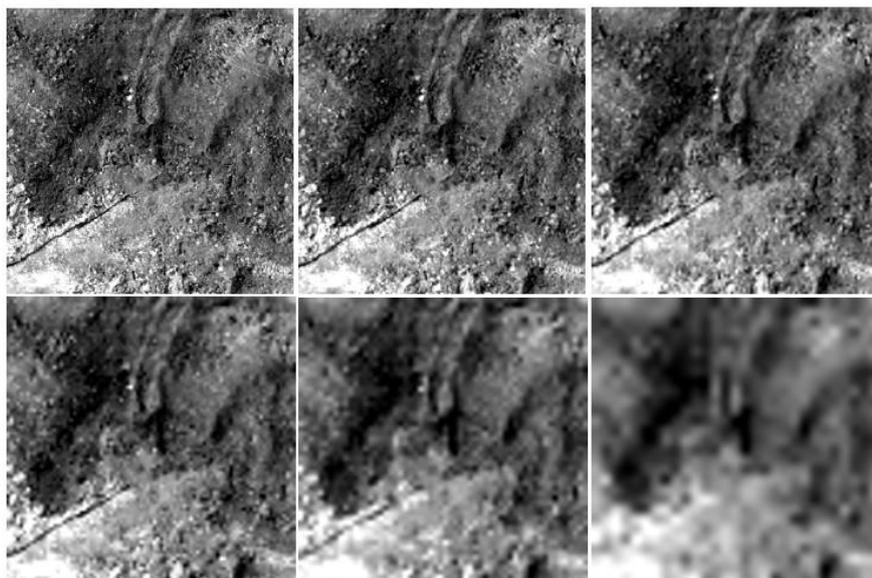


Figure 4.15 : De haut en bas et de gauche à droite, Bande 10 des images Pika II de résolutions spatiales 10, 20, 30, 40, 60 et 120 cm (résolution spatiale originale et agrégées par la moyenne). (Garcia, 2018)

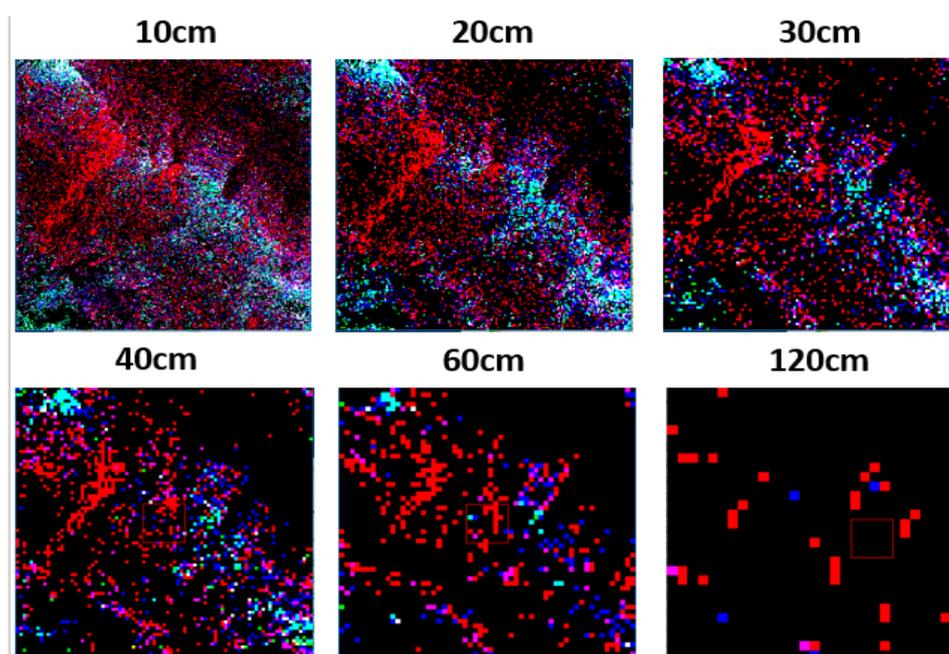


Figure 4.16 : Images résultantes du démixage spectrale par MTMF des images Pika de résolution spatiale originale et agrégées (10, 20, 30, 40, 60 et 120 cm). (Garcia, 2018)

4.2.2 – Signatures spectrales des minéraux purs et des blocs

4.2.2.a – Signatures des blocs

Pour la deuxième campagne de mesures spectrales, une autre approche a été mise en place. Des assemblages de minéraux purs ont été préparés avec de la pyrite, de la calcite et le l'albite. Différents mélanges ont été faits à partir de ces trois minéraux avec plusieurs proportions de pyrite et de calcite pour obtenir différents PNN. Ces modèles simplifiés de la lithologie de la Mine Canadian Malartic ont pour but de déterminer s'il est possible d'identifier des différences spectrales entre ces différents mélanges.

De plus, une étape de traitement simple a été appliquée à ces nouvelles mesures. Pour permettre de comparer les spectres en se concentrant uniquement sur les pics d'absorption, le continuum a été soustrait. Cette technique est connue sous le terme de *continuum removal*. En effet, les signatures spectrales portent une double information. Une première information est liée à la composante chimique de l'échantillon considéré. Cette information est obtenue à partir de l'étude des pics d'absorptions : c'est l'information qui nous intéresse ici, cependant il existe d'autres informations à tirer du spectre en lien avec les propriétés intrinsèques du matériel analysé. Ce sont des paramètres comme la granulométrie, la rugosité de surface, etc. Ces paramètres sont accessibles par l'étude du continuum (Figure 4.17).

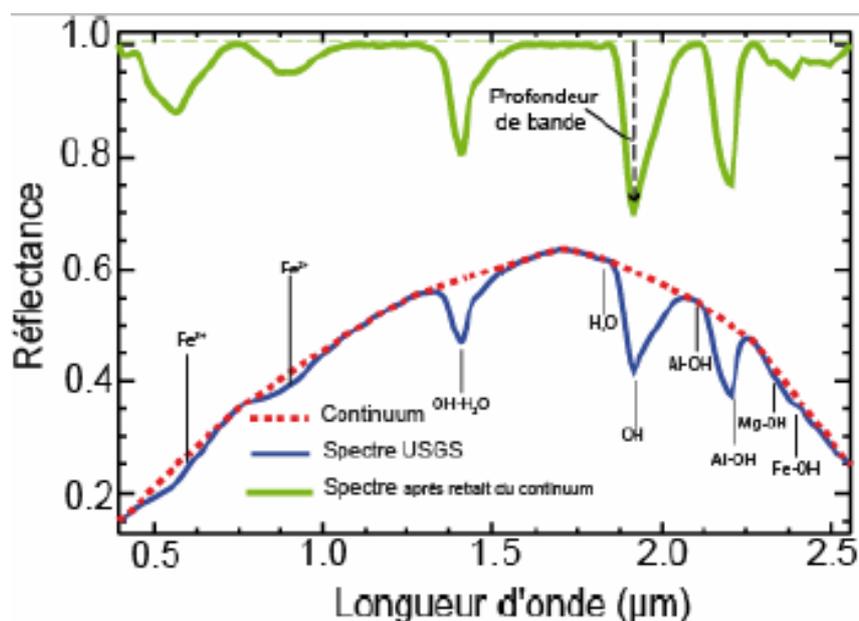


Figure 4.17 : Le *continuum removal*. (Modifié d'après Verpoorter, 2009)

Lorsque l'on veut étudier et comparer les pics d'absorption de plusieurs spectres, on soustrait le continuum (en rouge) du spectre initial (en bleu) pour normaliser les valeurs (en vert). De cette manière, les pics d'absorptions sont plus visibles. Tout d'abord, des mesures des minéraux purs en poudre ont été obtenues afin de servir de référence (Figure 4.18). Sur ces mesures le

continuum n'a pas encore été soustrait. Après avoir opéré le *continuum removal* on voit que d'autres informations apparaissent (Figure 4.19).

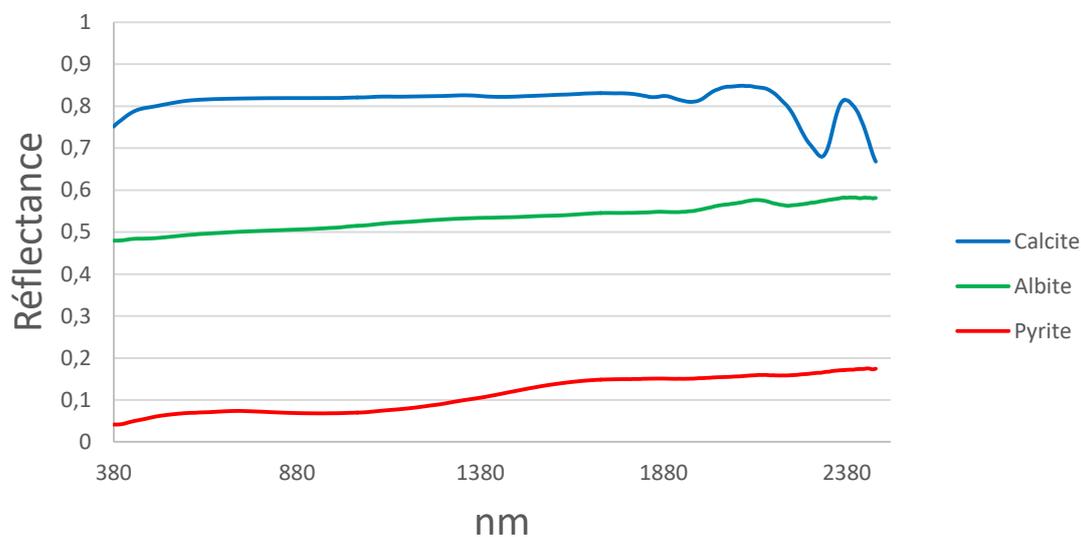


Figure 4.18 : Signatures spectrales brut des minéraux purs

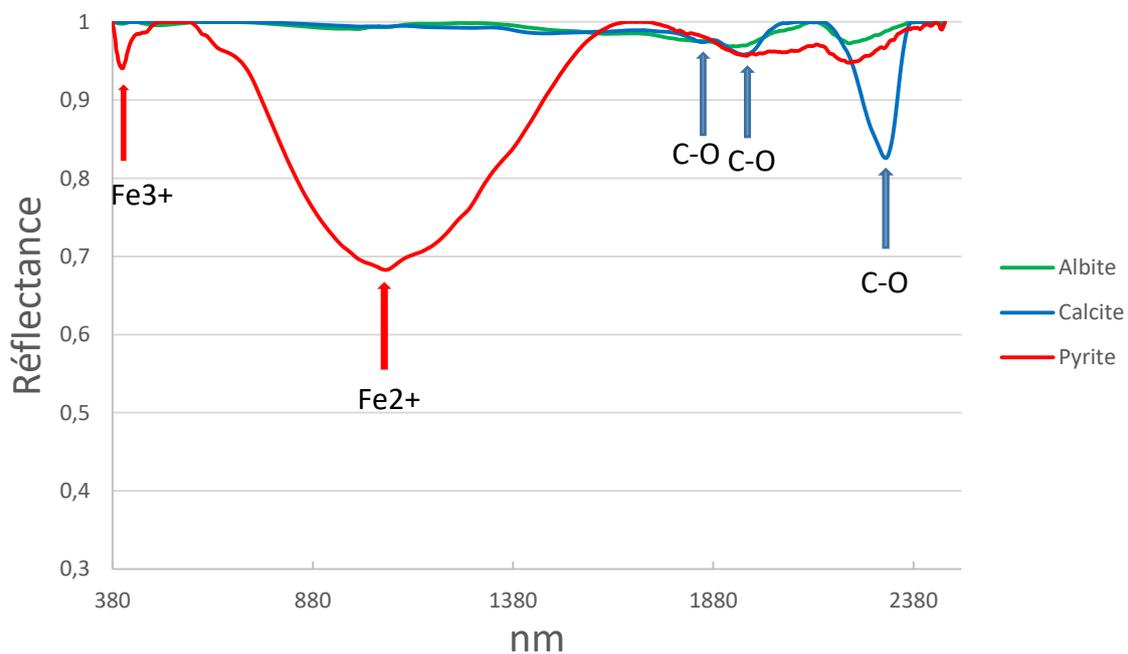


Figure 4.19 : Signatures spectrales des minéraux purs après *continuum removal*

Il est alors possible d'identifier des pics caractéristiques du Fe^{3+} et Fe^{2+} sur le spectre de la pyrite ainsi que les pics des liaisons C-O pour la calcite.

Les signatures de deux blocs ont ensuite été acquises. Ces blocs correspondent à un greywacke (16-ZFA-6 (B2)) et un porphyre (16-ZFA-6 (B3)). Les mesures ont été faites sur les quatre classes à chaque fois (Figure 4.20).

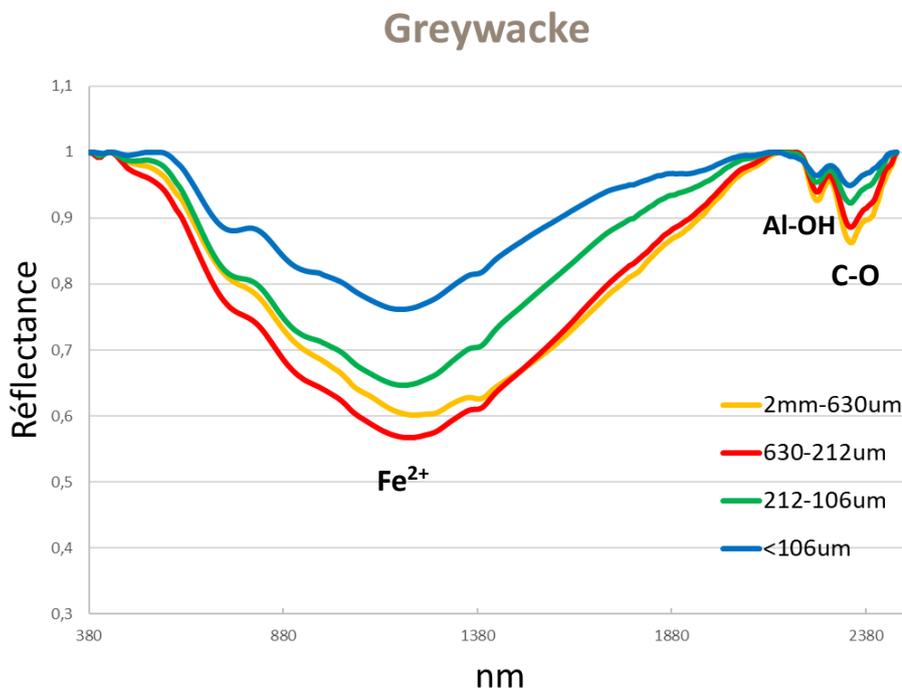


Figure 4.20 : Signatures spectrales des fractions du bloc 16-ZFA-6 (B2), (Greywacke)

On remarque tout d'abord que les fractions les plus fines ont une réflectance plus importante. Cela est cohérent, dans la mesure où les fractions les plus fines sont aussi les plus claires. C'est visible à l'œil nu. On observe aussi un grand pic centré sur 1200 nm qui semble correspondre au pic de la pyrite ainsi que deux pics à 2250 et 2350 nm qui correspondent respectivement aux liaisons Al-OH et C-O. De plus, les classes les plus grossières montrent des pics plus prononcés qu'avec les classes plus fines.

Pour le bloc de porphyre, les signatures spectrales sont différentes (Figure 4.21). Il y a un premier pic d'absorption entre 0,5 et 0,6 μm qui correspond au Fe^{3+} . Ce pic peut être expliqué par la présence de magnétite. Le second entre 0,8 et 1 μm correspond au Fe^{2+} , il est peu marqué. On peut voir ensuite les deux pics caractéristiques de l'eau à 1,4 et 1,8 μm . Ces pics peuvent correspondre à de l'eau libre présente entre les feuillets des argiles. Le prochain pic à 2,2 μm est d'ailleurs caractéristique des argiles et micas, et en particulier, des liaisons Al-OH.

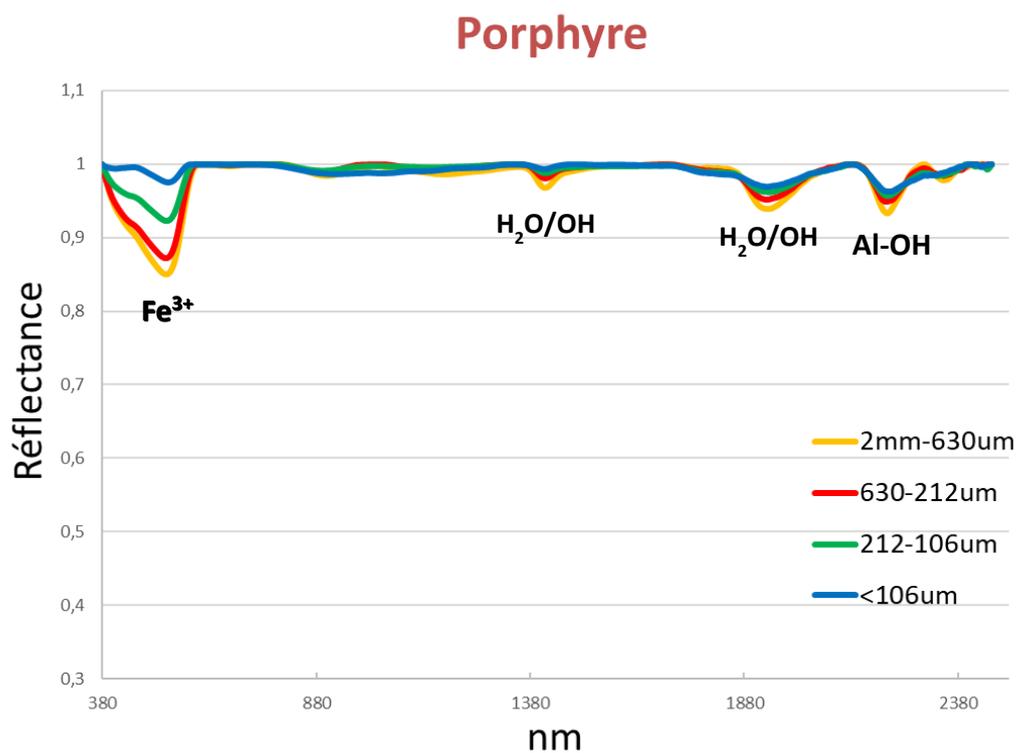


Figure 4.21: Signatures spectrales des fractions du bloc 16-ZFA-6 (B3)

4.2.2.b – Signatures des poudres

Les signatures spectrales des assemblages de minéraux purs ont ensuite été acquises. Les mélanges ont été décomposés en quatre séries : bas carbone, bas soufre, haut carbone et haut soufre. La série bas carbone est d'abord présentée (Figure 4.22).

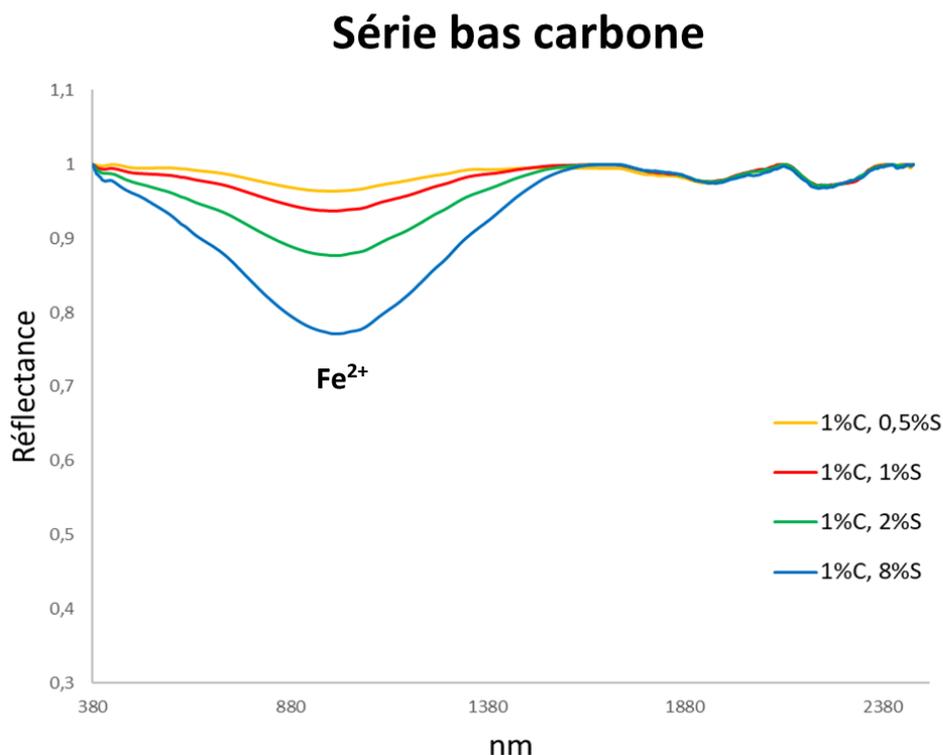


Figure 4.22 : Signatures spectrales de la série bas carbone

Dans cette série, le carbone est fixé à 1 % et le soufre varie de 0,5 % à 8 %. De cette manière, on voit le pic de la pyrite s'intensifier avec l'augmentation de la concentration en soufre. Les deux légers pics d'absorption visibles après 1900 nm sont des artefacts de mesure propre à l'appareil de mesure. Cet effet s'explique du fait que le spectralon utilisé comme référence blanche n'est pas réellement blanc sur toutes les longueurs d'onde du spectre. Cela a pour effet de produire un pic de réflectance vers 2140 nm. Avec l'opération du *continuum removal*, ce pic de réflectance est normalisé à 1, ce qui a pour effet de créer deux faux pics d'absorption de part et d'autre. Ces faux pics d'absorptions ne masquent toutefois pas les vrais pics qui peuvent être présent à ces longueurs d'ondes. L'intégrale des pics a été mesurée afin de constater s'il existe une relation entre l'intégrale des pics et la concentration en soufre (Figure 4.23). On peut voir qu'il semble exister une relation logarithmique entre le %S et la taille du pic d'absorption.

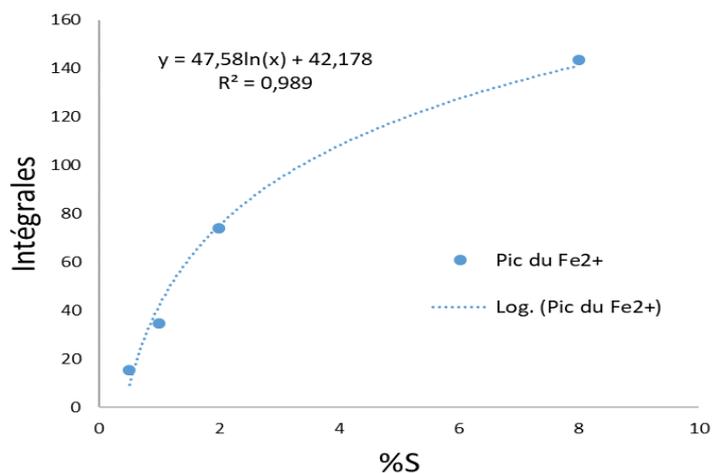


Figure 4.23 : Relation entre l'intégrale du pic du Fe^{2+} et le %S pour la série bas carbone

Les signatures spectrales de la série haut carbone ont ensuite été acquises. Dans cette série le mélange contient 8 % de carbone avec le soufre qui varie entre 0,5 % et 10 % (Figure 4.24). On remarque la même intensification du pic de la pyrite au fur et à mesure que la concentration en soufre augmente. Cette fois, en revanche, il y a assez de carbone par rapport au soufre pour que le pic des carbonates soit visible. Il est à son maximum pour 8 %C, 0,5 %S. Ensuite, avec l'augmentation de la concentration en pyrite, le pic des carbonates diminue alors que celui de la pyrite augmente. On voit ici l'effet de la variation du rapport S/C sur les deux pics correspondants. Bien que le carbone soit fixe, l'augmentation du soufre fait varier le pic du carbone.

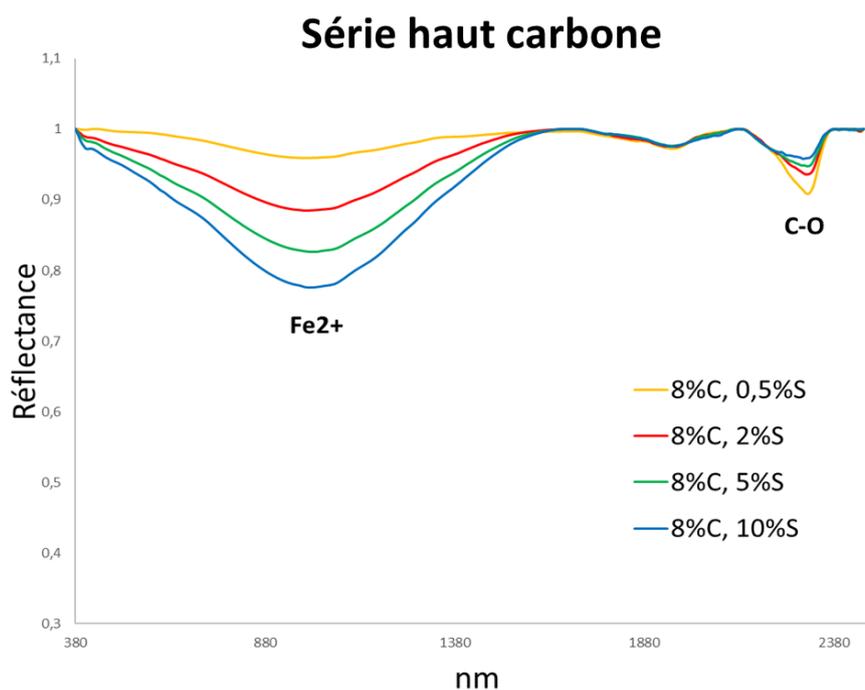


Figure 4.24 : Signatures spectrales de la série haut carbone

Dans cette série, l'intégrale des pics de la pyrite semble suivre une loi exponentielle alors que celui de la calcite une loi linéaire (Figure 4.25). La série haut et bas soufre présentent des signatures spectrales plus constantes (Figure 4.26 et Figure 4.27). Dans les deux séries on observe le pic des carbonates qui apparaît pour 8 %C.

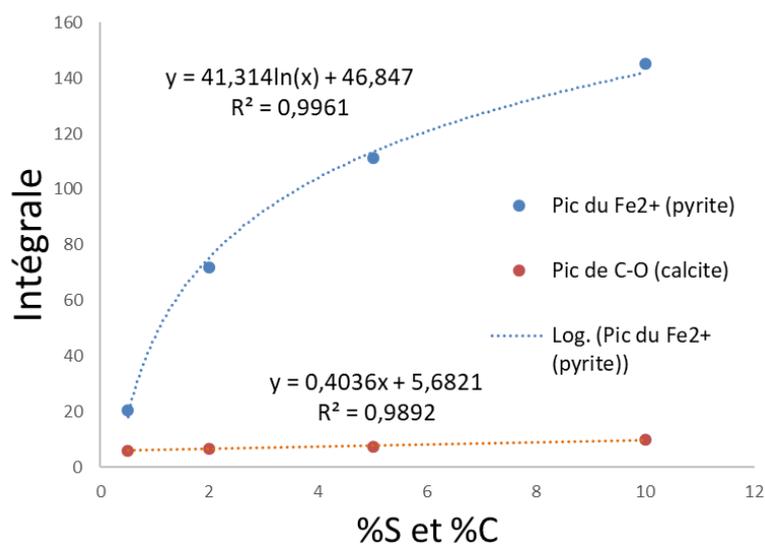
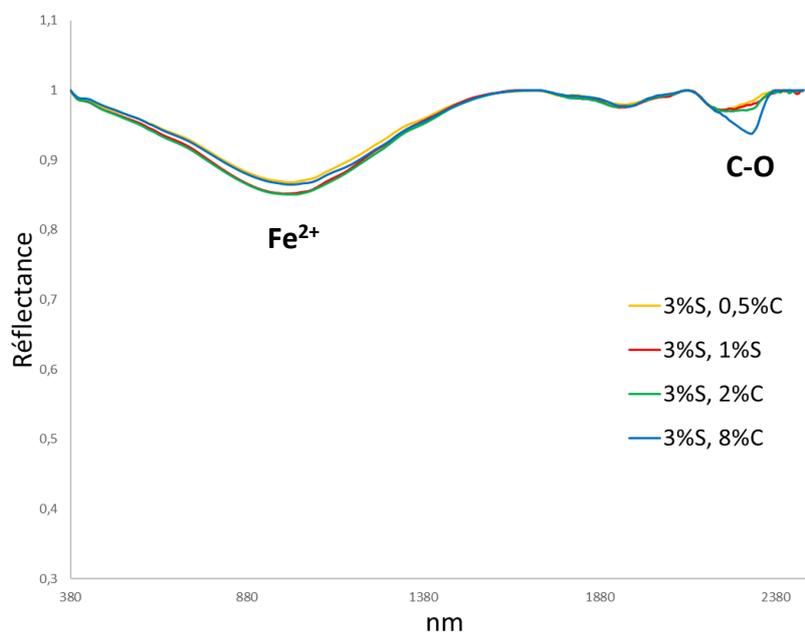
Figure 4.25 : Intégrale du pic du Fe^{2+} et de C-O en fonction du %S et %

Figure 4.26 : Signatures spectrales de la série haut soufre

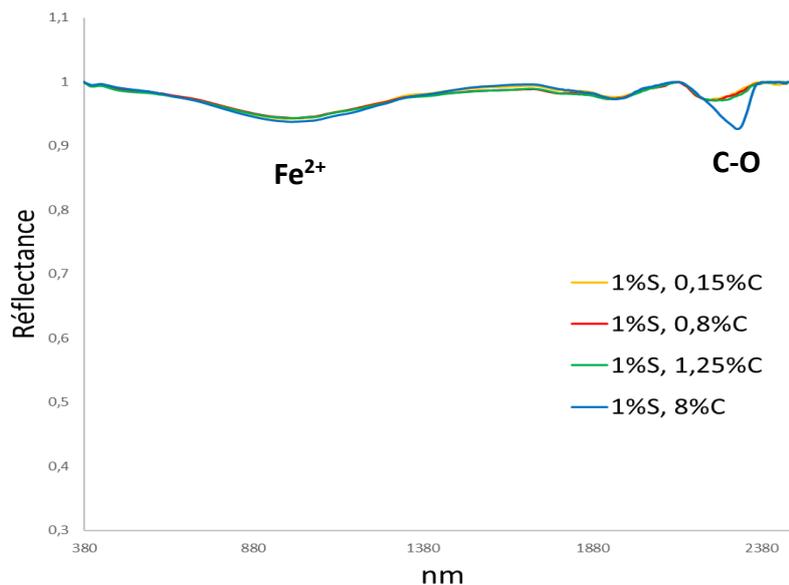


Figure 4.27 : Signatures spectrales de la série bas soufre

4.2.2.c – Signatures avec plaquette sous-jacente

Les prochaines mesures ont été faites avec les échantillons déjà vu précédemment à la différence que cette fois un bloc référence (sous forme de plaquette) sera utilisé comme base pour accueillir les poudres. Les poudres seront disposées selon trois proportions de recouvrement du bloc. Le bloc en question (16-ZFA-1) est un échantillon de greywacke. De cette manière, il sera possible de déterminer dans quelle mesure les signatures spectrales sont affectées. Tout d'abord la signature du bloc référence a été acquise. Deux signatures ont été prises, une sur le bloc directement en l'état sous forme de plaque puis une autre sur une poudre représentative du même bloc (Figure 4.28).

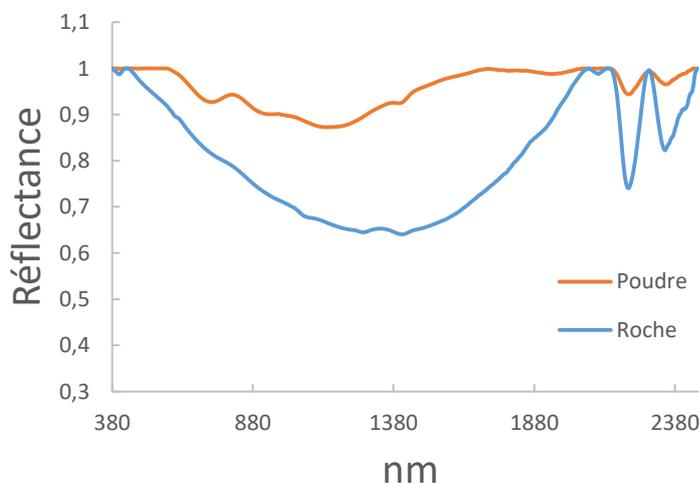


Figure 4.28 : Signatures spectrales du bloc de greywacke de référence en poudre et en roche sous la forme d'une plaquette

On observe que la signature de la plaquette montre un large pic d'absorption centré vers 1400 nm. Il semble s'apparenter au pic de la pyrite mais il est plus large et décalé vers des longueurs d'ondes plus grandes. On remarque que la signature de la plaquette en tant que telle montre des pics plus prononcés que la poudre du même échantillon. La signature de la poudre est comparable à celle du bloc 16-ZFA-6 B2 qui est lui aussi du greywacke. Les premiers spectres ont été acquis avec les blocs de greywacke et de porphyre (Figure 4.29).

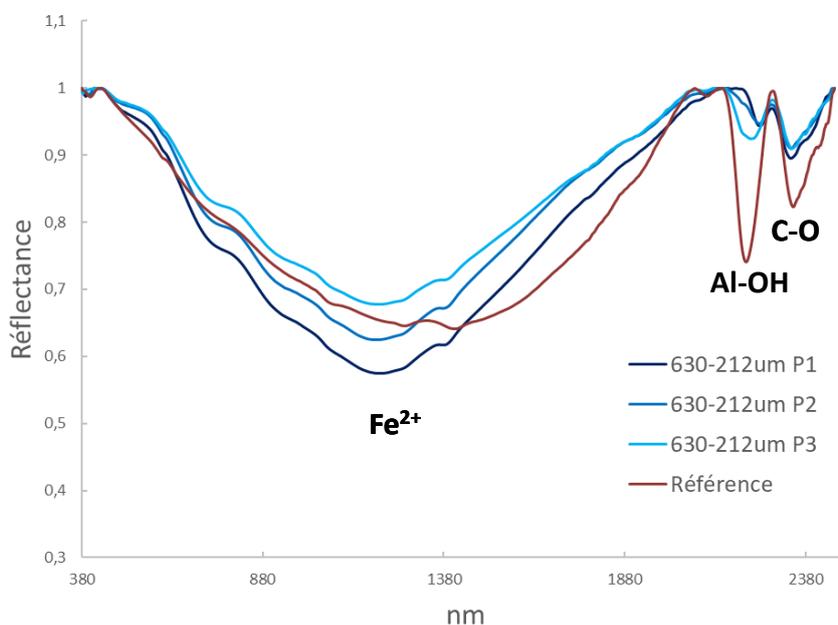


Figure 4.29 : Signature spectrale du bloc 16-ZFA-6 B2 (greywacke) vs signature de la plaquette référence

Seule la classe 630-212 μm est présentée ici. Les mesures ont été faites avec toutes les classes mais les résultats sont identiques à la seule différence que les classes plus fines ont des réflectances plus élevés. Mis à part cet effet, les spectres ont le même comportement. Ici, les signatures du bloc 16-ZFA-6 B2 sont très similaires à celle de la plaquette, dans la mesure où les deux roches sont du greywacke. On remarque ici que la signature de la proportion P3 est un peu différente des signatures P1 et P2. Le flanc droit du pic de la pyrite s'élargit sensiblement vers les grandes longueurs d'ondes et tend à se rapprocher à la signature du bloc. On voit alors un mélange entre les deux signatures. Pour cet échantillon, les proportions n'ont pu être mises

en évidence avec ImageJ dans la mesure où les grains et la roche ont la même couleur du fait qu'ils sont tous les deux du greywacke.

La même chose est ensuite appliquée au bloc 16-ZFA-6 B3 de porphyre (Figure 4.30). Dans ce cas, il est possible de déterminer le pourcentage de recouvrement des proportions P2 et P3 (Figure 4.31 et 4.32). Le recouvrement est de 49,1 % pour la proportion P2 et de 28,1 % pour la proportion P3.

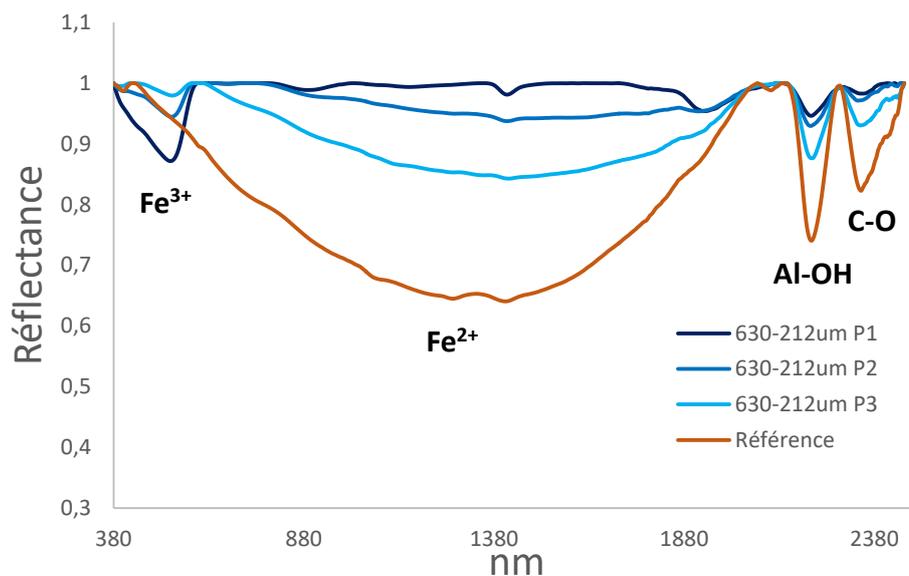


Figure 4.30 : Signature spectrale du bloc 16-ZFA-6 B3 (porphyre) vs signature du bloc référence

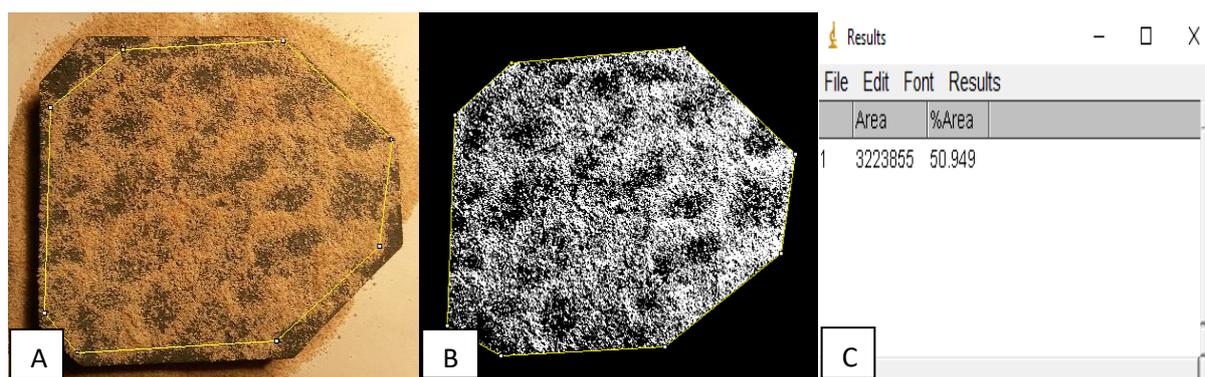


Figure 4.31 : Résultat du pourcentage de recouvrement pour l'échantillon 16-ZFA-6 (B3) P2 avec ImageJ. Détourage (A), image binaire (B), résultats (C)

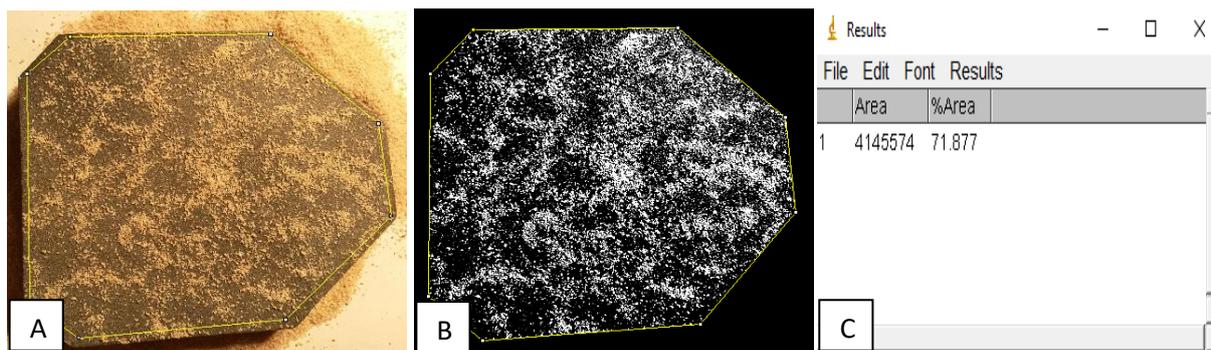


Figure 4.32 : Résultat du pourcentage de recouvrement pour l'échantillon 16-ZFA-6 (B3) P3 avec ImageJ. Détourage (A), image binaire (B), résultats (C)

Cette fois-ci, les deux signatures ne correspondent pas à la même lithologie et sont donc plus dissemblables. C'est sûrement ce qui explique que les deux signatures semblent se mélanger plus progressivement. De la proportion P1 à P3, le grand pic centré à 1400 nm n'est tout d'abord pas présent puis apparaît et finalement s'amplifie. C'est également le cas des pics Al-OH et C-O qui deviennent de plus en plus marqués lorsque la signature se rapproche de celle de la plaquette référence. On voit aussi que le pic du Fe^{3+} est bien marqué pour le porphyre et se dissipe peu à peu en tendant vers le greywacke. Ces résultats démontrent qu'il est possible d'obtenir des mélanges spectraux plus ou moins complexes en fonction des différences de lithologie. Dans le cas d'une fosse à ciel ouvert, on comprend que la plupart des signatures, si ce n'est toutes, seront un mélange spectral.

Les poudres de minéraux purs sont ensuite comparées à la plaquette référence. Pour la série bas carbone avec 8 %S, on ne voit pas de changement significatif de la signature spectrale, même pour la proportion où il y a très peu de poudre sur la roche (Figure 4.33).

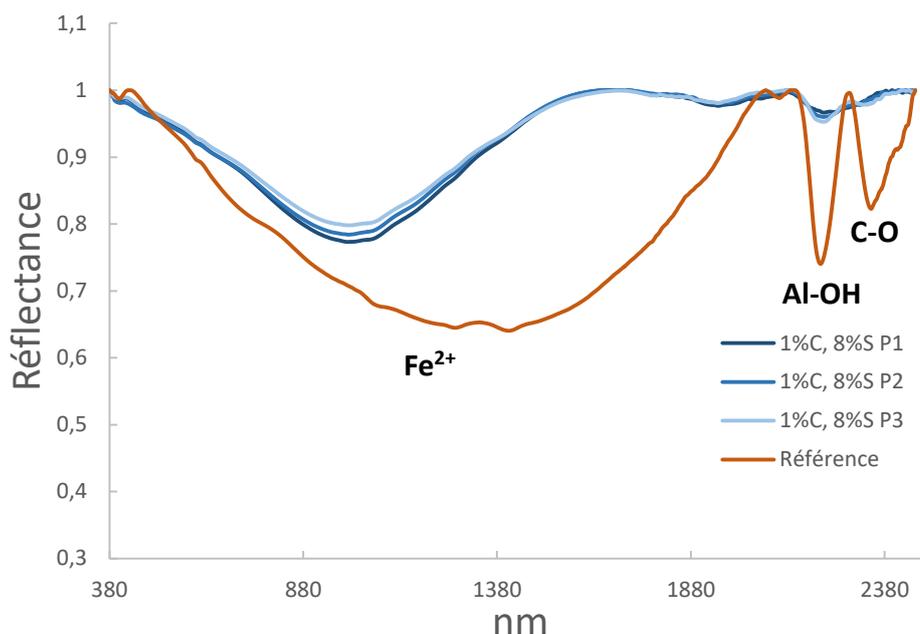


Figure 4.33 : Signature spectrale de la poudre 1 %C, 8 %S vs signature du bloc référence

Pour cet essai, les proportions P2 et P3 n'ont pu être mises en évidence car la poudre et la roche avaient la même couleur. Les grains sont aussi beaucoup plus petits que précédemment ; le logiciel ne peut faire la différence entre les deux. Dans le cas des minéraux purs, le mélange se trouve sous forme de poudre très fine. Ce n'était pas le cas des blocs qui avaient des classes plus grossières. Ce qui apparait semble démontrer qu'une petite quantité de poudre fine peut totalement masquer la signature d'une roche sous-jacente. Bien que les proportions P2 et P3 n'ont pu être quantifiées avec ImageJ, la proportion P2 devrait être autour de 50 % de recouvrement. Malgré le fait qu'il y ait de moins en moins de poudre, la signature ne change que très peu et correspond au mélange de minéraux purs uniquement. La présence de la plaquette de greywacke est ici totalement masquée par la poudre. Si la poudre n'est pas de la même nature que le bloc sous-jacent, cela peut empêcher l'identification de la roche recouverte. C'est une considération importante dans un contexte minier où de nombreuses poussières de nature variées peuvent recouvrir les éventuelles roches à identifier par multi ou hyperspectral. Il semble cependant que la tendance soit différente pour un assemblage avec moins de soufre (Figure 4.34).

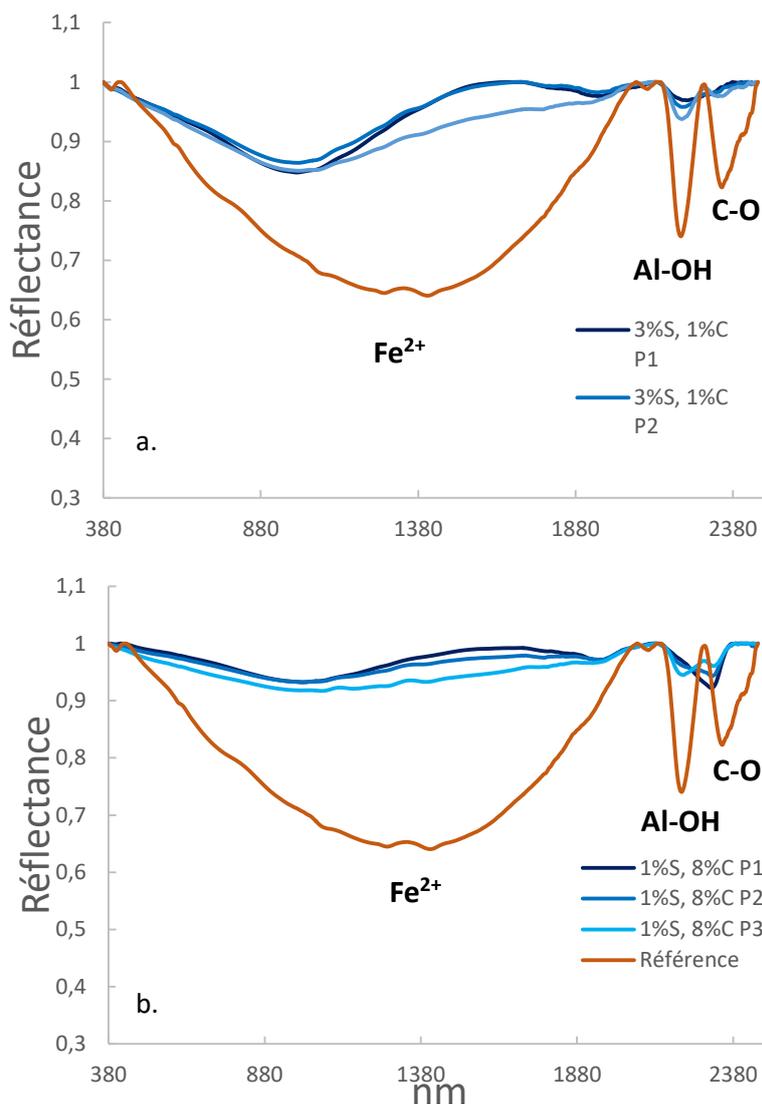


Figure 4.34 : Signature spectrale des poudres 3%S, 1%C (a.) et 1%S, 8%C (b.) vs signature du bloc référence

On voit avec la proportion P3 que la signature spectrale fini par tendre vers le bloc de greywacke. C'est vrai pour les mélanges 3 %S, 1 %C et 1 %S, 8 %C. Ici le soufre étant en concentration plus faible. Les fortes concentrations en soufre de l'échantillon précédent ont peut-être pour effet de produire un fort pic d'absorption qui prend le dessus sur la signature du bloc référence. De même que précédemment et pour des raisons identiques, les proportions P2 et P3 n'ont pu être mises en évidence avec le logiciel.

4.2.3 – Essai de teneur en eau

Un dernier essai a été mis en place avec les poudres de minéraux purs. Des mesures de l'impact de la teneur en eau sur la signature spectrale ont été faites sur l'assemblage 1 %S, 8 %C (Figure 4.35).

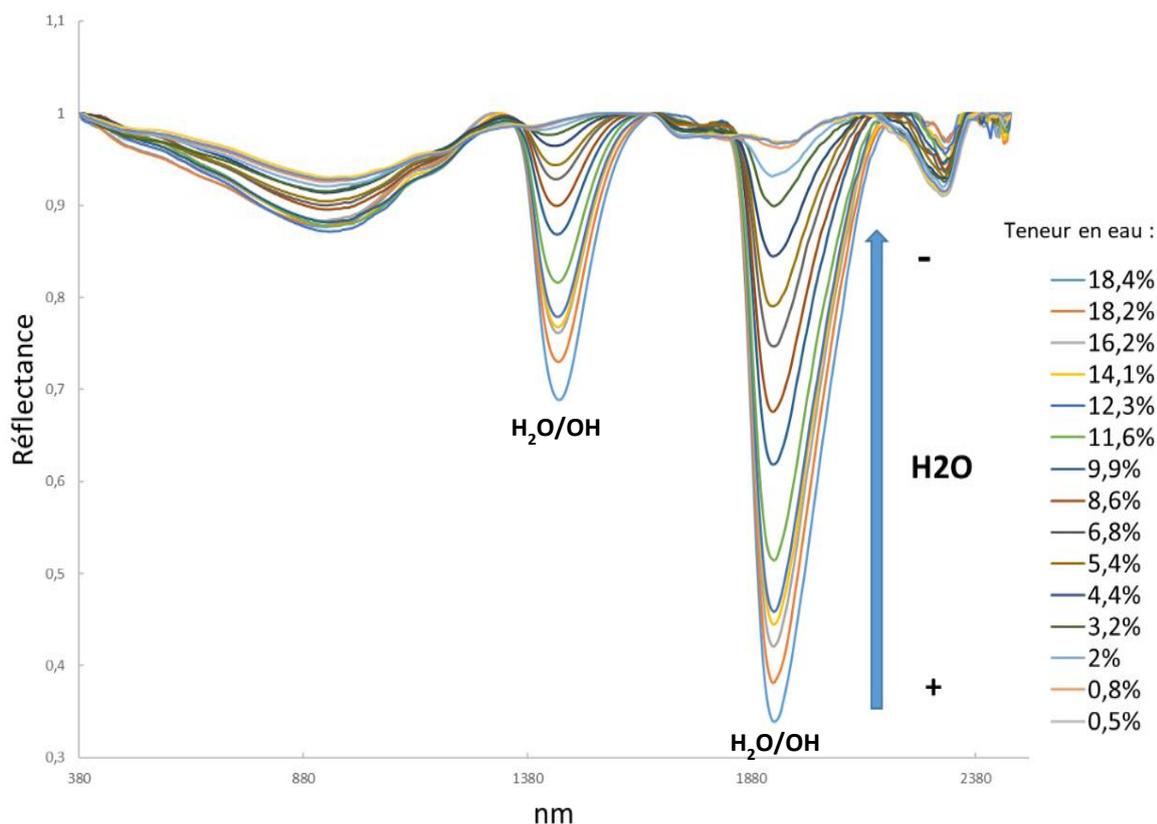


Figure 4.35 : Pics d'absorption de H₂O en fonction de la teneur en eau pour la poudre 1 %S, 8 %C

On peut noter tout d'abord les deux pics caractéristiques de l'eau situés à 1400 et 1900 nm. On peut voir que pour une teneur en eau maximale de 18,4 %, les pics d'absorptions sont à leur maximum. Au fur et à mesure que l'échantillon sèche et que la teneur en eau diminue, l'intensité des pics diminue tout autant. Les intégrales des pics ont été mesurées et ont permis de mettre en évidence une relation linéaire entre la teneur en eau de l'échantillon et l'intensité des pics, aussi bien pour le pic à 1400 nm que celui à 1900 nm (Figure 4.36).

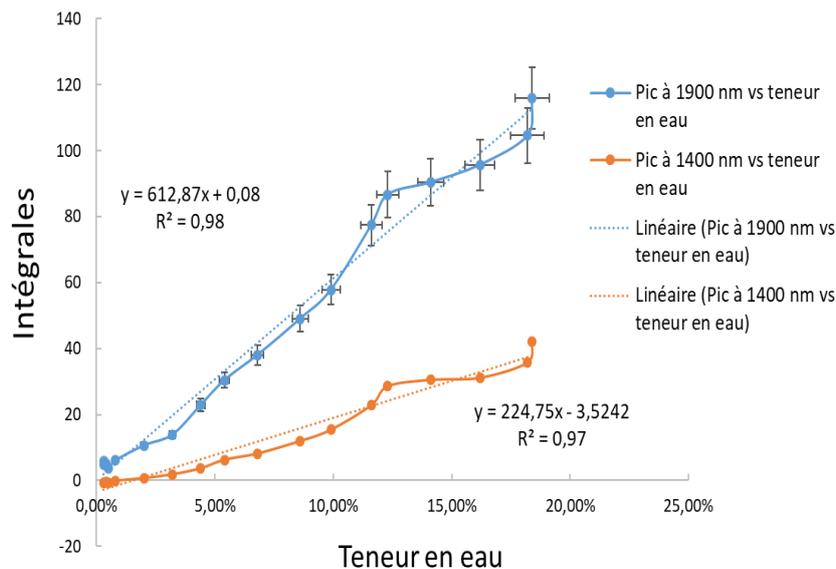


Figure 4.36 : Relation entre l'intégrale du pic de l'eau à 1400 et 1900 nm et la teneur en eau

4.3 – Discussions

On a vu que la lithologie de la Mine Canadian Malartic est relativement homogène avec principalement du greywacke et du porphyre (syénite quartzifère). Il existe de nombreuses altérations (silicification, albitisation, carbonatation, etc.). Elles se retrouvent sur les deux lithologies ; parfois seule ou bien se surimposant elles même. De plus, la pyrite, qui est le minéral d'intérêt ici, est très disséminée. Dans ces conditions, la détermination du potentiel de génération d'acide avec un spectromètre portatif n'est pas réalisable. Il est possible de faire du qualitatif, mais pas de quantitatif. Les résultats ont montré qu'il était uniquement possible de différencier le greywacke du porphyre. Cependant, l'étude des signatures des poudres de minéraux purs indique que dans un cas simple ayant des signatures bien caractéristiques, il est possible d'identifier la pyrite et la calcite. Il existe une relation logarithmique entre l'intégrale du pic du Fe^{2+} et la concentration en pyrite (Figures 4.23 et 4.25). Il semble aussi exister une relation linéaire entre l'intégrale du pic C-O et la concentration en calcite (Figure 4.25). Cela démontre aussi que sur un même échantillon contenant de la pyrite et de la calcite leur pics respectifs ne se comporte pas de la même manière. Les relations contrôlant le pic de la pyrite (Fe^{2+}) et le pic de la calcite (C-O) ne sont pas les mêmes. De plus, la proportion d'un minéral influe sur le pic d'un autre minéral même si la quantité de ce dernier est fixe. Il semble possible de déterminer le potentiel de génération d'acide dans un échantillon en poudre à l'aide d'un capteur hyperspectral de terrain. Néanmoins, comme nous l'avons vu, la technique n'est pas nécessairement applicable dans tous les cas de figure. Dans les échantillons de Mine Canadian

Malartic, la teneur en pyrite dans les échantillons prélevés dans la fosse est trop faible (<1 %) pour pouvoir déterminer sa concentration. De plus, la minéralogie est bien plus complexe que les poudres de minéraux purs. Il faut aussi prendre en compte l'effet de la granulométrie qui affecte l'intensité des pics d'absorption sur le terrain. Il n'est donc pas possible de déterminer la concentration en pyrite ou en calcite *in situ* à la Mine Canadian Malartic simplement avec cette technique.

De plus, un autre défi a été mis en évidence. L'expérience des poudres fines de minéraux purs avec une plaquette de greywacke sous-jacent a montré que la signature du bloc peut être totalement masquée par la poudre déposée à sa surface (Figure 4.33). Dans ce cas précis, même une faible quantité de poudre a pris le dessus sur la signature du bloc. C'est d'autant plus le cas que la poudre était claire et le bloc sous-jacent, sombre. Ce genre de cas de figure arrive quotidiennement dans une fosse active, où de grandes quantités de particules fines sont brassées et redéposées sur la surface des roches. La technique est prometteuse, mais beaucoup de facteurs entrent en jeu (ensoleillement, humidité, granulométrie, rugosité de surface, etc.) et sont cruciaux pour permettre de bonnes mesures. Dans le cas où le capteur est monté sur un drone, il faut aussi prendre en compte les calculs de corrections géométriques qui peuvent être complexes tant la sensibilité des capteurs est grande.

Cela dit, il est possible que cette technique soit utile dans d'autres cas de figure. Le pic Al-OH peut être facilement utilisé pour identifier la présence de mica par exemple. On a aussi vu qu'il était possible de différencier le Fe^{2+} et Fe^{3+} sur les échantillons de la mine. On peut donc imaginer d'autres contextes où la technique serait plus pertinente et efficace. Dans le cas de la teneur en eau, les résultats sont aussi intéressants. Il semble être possible de pouvoir déterminer la teneur en eau d'un échantillon en surface, si l'on connaît un tant soit peu son matériel (calibration nécessaire pour avoir l'équation exacte de la relation entre l'intégrale du pic et la teneur en eau). On peut imaginer comme application une détermination des teneurs en eau de surface d'un parc à résidus ou bien d'un recouvrement empêchant l'évaporation dans le cas d'une nappe surélevée.

CHAPITRE 5 – CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

5.1 - Conclusions

Le but du projet était de tester les opportunités offertes par la télédétection pour la gestion des stériles de la mine de Canadian Malartic. Le projet comprend quatre étudiants : deux doctorants et une maîtrise à Sherbrooke ; et mon travail de maîtrise à l'UQAT. Mes objectifs étaient de caractériser les roches et échantillons de la mine, déterminer les signatures typiques des roches et les facteurs qui influencent ces dernières et enfin déterminer l'impact des poussières sur la signature spectrale. Et enfin, d'établir la possibilité de déterminer le PGA directement par télédétection avec un capteur hyperspectral portatif.

Les résultats de la première campagne ont permis de caractériser les paramètres granulométriques des roches présentes dans la fosse après sautage, ou bien dans la halde à stérile. Les analyses S/C ont montré que le carbone avait tendance à se retrouver dans la fraction la plus fine (< 2 mm) et, en particulier, à l'échelle de la dizaine de microns. La calcite est donc surreprésentée dans les poussières, bien que la gamme de variation reste faible et comprise dans 1 %. Ce n'est pas le cas du soufre, qui ne montre pas d'enrichissement dans une fraction particulière. Le sulfure principal porteur de soufre est la pyrite et se trouve de façon disséminée à l'échelle de la mine et en particulier dans le greywacke. On peut aussi en trouver dans le porphyre.

Le défi des premières analyses spectrométriques a été d'acquérir les spectres dans des conditions optimales. Il a fallu de nombreuses étapes de corrections et calibrations. Les résultats finalement obtenus n'ont pas permis de différencier significativement les différents échantillons prélevés dans la fosse ou les stériles.

Lors de la deuxième campagne, des images hyperspectrales ont été prises sur une zone de sautage dans la fosse et des échantillons de greywacke et de porphyre, sous la forme de blocs, ont été prélevés dans le but d'essayer de les différencier avec le spectromètre. La partie concernant l'analyse des résultats des images du drone a été traitée par Javier Garcia (2017). Les images n'étaient toutefois pas suffisamment bonnes pour obtenir des résultats intéressants.

Pour la deuxième série de mesures spectrales à l'Université de Sherbrooke, la méthode du *spectrum removal* a été utilisée sur les spectres bruts afin de faire ressortir les pics d'absorption

et ainsi d'obtenir plus d'informations de type chimique. L'apport de cette méthode a été décisif pour la suite. Pour tester la pertinence de la méthode et tenter d'obtenir un modèle simplifié de la minéralogie de la Mine Canadian Malartic, des assemblages de minéraux purs ont été confectionnés. En effet, la minéralogie réelle est trop complexe pour pouvoir isoler l'impact de la signature de la pyrite, par exemple. Cela a pu être fait avec les assemblages de minéraux purs, et notamment en appliquant la technique du *continuum removal*. De cette manière, les pics caractéristiques de la pyrite et de la calcite ont pu être mis en évidence. La présence de pyrite est signalée par le pic d'absorption du Fe^{2+} autour de 900 nm et celle de la calcite par les pics des liaisons C-O autour de 2200 nm. Les mesures spectrales ont ensuite été faites sur les blocs échantillonnés lors de la deuxième campagne. Avec la nouvelle méthode, il a été possible de différencier le greywacke du porphyre. De plus, la présence de pyrite et de calcite a pu être mise en évidence dans ces échantillons par leurs pics d'absorption caractéristiques. L'étude de l'intégrale des pics d'absorption du Fe^{2+} pour la pyrite a montré qu'une quantification de la pyrite semble possible. En effet, il existe une relation logarithmique entre l'intégrale du pic du Fe^{2+} et la concentration en soufre. De même, il semble également qu'il existe une relation linéaire entre l'intégrale du pic C-O et la concentration en calcite. Ces observations, à un niveau très fondamental, constitue une première à notre connaissance. Des tests ont aussi été faits pour déterminer l'impact des particules plus fines et des poussières sur la signature d'une roche. Ces expériences ont montré que les poudres pouvaient altérer ou totalement masquer la signature d'une roche sous-jacente. Finalement, des essais de teneur en eau ont été faits pour déterminer l'impact de l'humidité sur la signature spectrale. Ils ont montré que la présence d'eau accentue, en fonction de sa teneur, les pics caractéristiques de cette dernière à 1400 et 1900 nm. Plus la teneur en eau de la poudre est importante, plus les pics de l'eau seront marqués. Ces grands pics d'absorption pourraient masquer de l'information présente aux mêmes longueurs d'ondes (1400 et 1900 nm). Cependant il a été montré qu'il existe une relation linéaire entre l'intégrale du pic de l'eau à 1400 et 1900 nm et la teneur en eau de la poudre. Le fait qu'il y ait une relation de type linéaire entre la teneur en eau d'un échantillon de sol et son impact sur les spectres de réflectance était déjà connus (Carlson et al., 1994 ; Shengfang et al., 2019). Toutefois, à notre connaissance, cette relation n'avait pas été mesurée de façon fondamentale avec un capteur hyperspectral portatif ASD FieldSpec Pro 3 sur du matériel géologique à l'image de l'échantillon utilisé (1 %, 8 %C).

Jusqu'à présent, la télédétection n'était pas un outil particulièrement utilisé en exploitation. L'apport de la méthode dans ce contexte est nouveau et présente de nombreux défis que l'on ne

retrouve pas en exploration, par exemple. L'étude d'une fosse à ciel ouvert est un défi important, une fosse active est un environnement en perpétuel évolution. Un des principaux défis est de pouvoir obtenir des images en simultané avec l'acquisition d'échantillons (roches et spectres) de terrains. En effet, s'il est possible de prendre des images avec un drone, puis après son passage, faire l'échantillonnage ; il est bien plus complexe d'obtenir des images satellites, tout en ayant un échantillonnage représentatif de l'état d'avancement de la fosse au moment de l'acquisition de ces images. De plus, les capteurs spectraux sont très sensibles, la présence de poussière, omniprésentes dans une fosse active, perturbent ou masquent le signal des roches sous-jacente. Il faut aussi ajouter que l'humidité des roches peut aussi poser un problème, d'autant que des camions citerne déversent de l'eau en continu sur les surfaces exposées pour limiter la production de poussière. Cette action a un rôle positif sur les poussières mais pose le problème de l'eau. Ces éléments, propres à l'étude d'une fosse active, montrent la difficulté et les limitations de l'utilisation de la télédétection dans un tel contexte. Cette étude démontre néanmoins que la télédétection peut tout de même apporter des solutions dans d'autres cas de figure. Chaque site d'étude est différent et comprend des avantages et des inconvénients qui lui sont propres, ce qui est vrai pour un site ne l'est pas forcément pour un autre.

5.2 - Recommandations

Ce travail a finalement permis de mettre en lumière des aspects cruciaux pour la bonne mise en œuvre d'une étude multi- ou hyperspectrale en contexte minier :

- Le choix du site d'étude doit être déterminé en connaissance de cause et en fonction des moyens utilisés. L'étude a montré que le site de la Mine Canadian Malartic comporte de nombreux défis en termes de géochimie, de granulométrie ou bien de logistique. L'étude d'une fosse à ciel ouvert implique de travailler dans un environnement changeant en permanence avec des poussières, ce qui est problématique. Il est, de plus, impossible de retourner sur le terrain pour valider des résultats, dans la mesure où le niveau étudié sera probablement déjà excavé.
- L'acquisition des images satellites doit être coordonnée avec l'échantillonnage sur le terrain pour avoir des données concordantes. L'acquisition des images spectrales est une phase hautement importante et très sensible à de nombreux paramètres comme l'ensoleillement ou l'humidité. De plus, quand des images satellites sont récupérées via

les fournisseurs, elles ne sont plus représentatives de l'état d'avancement de l'exploitation d'une fosse active.

- Quand des images spectrales sont prises avec un drone, il faut s'assurer que les capteurs équipés couvrent bien la bonne gamme de longueurs d'ondes nécessaire aux objectifs de l'étude. Les conditions extérieures en terme d'ensoleillement et d'humidité sont, là aussi, déterminantes au moment de prendre les images.
- Toujours dans le cas d'un drone, le capteur devrait être monté sur un système de type *steadicam* pour stabiliser le capteur. Les capteurs multi- et hyperspectraux sont très sensibles et si le drone bouge trop ou dévie de sa ligne de vol, les images peuvent être tout simplement inexploitable.
- Cette étude a été faite avec un spectromètre hyperspectral portatif ASD FieldSpec Pro 3, couvrant une gamme spectrale allant 350 à 2500 nm. Il existe d'autres gammes de longueurs d'ondes susceptibles de donner d'autres informations sur le même matériel. Cela peut être le cas de la gamme infrarouge thermique par exemple. Cette gamme de longueur d'onde est comprise entre 3000 et 15000 nm. Les résultats de cette étude sont donc à prendre sur la gamme 350 – 2500 nm et dans le cas particulier de la Mine Canadian Malartic.

RÉFÉRENCES

- Behnia, P., Harris, J. R., Rainbird, R. H., Williamson, M. C., & Sheshpari, M. (2012). Remote predictive mapping of bedrock geology using image classification of Landsat and SPOT data, western Minto Inlier, Victoria Island, Northwest Territories, Canada. *International Journal of Remote Sensing*, 33(21), 6876-6903. doi:10.1080/01431161.2012.693219
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Dagenais, A. M., & Archambault, M. (2004). Kinetic tests comparison and interpretation for prediction of the Joutel tailings acid generation potential. *Environmental Geology*, 46(8), 1086-1101. doi:10.1007/s00254-004-1113-1
- 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. 131-190. doi:10.1016/b978-0-08-095975-7.00905-0
- Borisova, D., Nikolov, H., & Petkov, D. (2013). *Ground-based multispectral measurements for airborne data verification in non-operating open pit mine Kremikovtsi*. Paper presented at the Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications IV, Dresden.
- Bouzahzah, H., Benzaazoua, M., Bussiere, B., Plante, B., (2014). Prediction of acidmine drainage: importance of mineralogy and the test protocols for static and kinetic tests. *Mine Water Environ.* 33, 54–65.
- Bussière B., Benzaazoua M., Aubertin M., Mbonimpa M., (2003). A laboratory study of covers made of low-sulphide tailings to prevent acid mine drainage. *Environmental Geology*, 45, p. 609-622
- Buzzi, J., Riaza, A., García-Meléndez, E., Weide, S., & Bachmann, M. (2014). Mapping changes in a recovering mine site with hyperspectral airborne HyMap imagery (Sotiel, SW Spain). *Minerals*, 4(2), 313-329. doi:10.3390/min4020313
- De Souza S., Dubé B., McNicoll V.J., Dupuis C., Mercier-Langevin P., Creaser R.A., Kjarsgaard I.M., (2015). Geology, hydrothermal alteration, and genesis of the world-class Canadian Malartic stockwork-disseminated Archean gold deposit, Abitibi, Quebec. Geological Survey of Canada, Open File 7852, p.113-126
- Dalm, M., Buxton, M. W. N., & van Ruitenbeek, F. J. A. (2017). Discriminating ore and waste in a porphyry copper deposit using short-wavelength infrared (SWIR) hyperspectral imagery. *Minerals Engineering*, 105, 10-18. doi:10.1016/j.mineng.2016.12.013
- Davies, G. E., & Calvin, W. M. (2017). Quantifying Iron Concentration in Local and Synthetic Acid Mine Drainage: A New Technique Using Handheld Field Spectrometers. *Mine Water and the Environment*, 36(2), 299-309. doi:10.1007/s10230-016-0399-z
- Demers I., Bussière B., Benzaazoua M., Mbonimpa M., Blier A., (2008). Column test investigation on the performance of monolayer covers made of desulphurized tailings to prevent acid mine drainage. *Minerals Engineering*, 21, p. 317–329

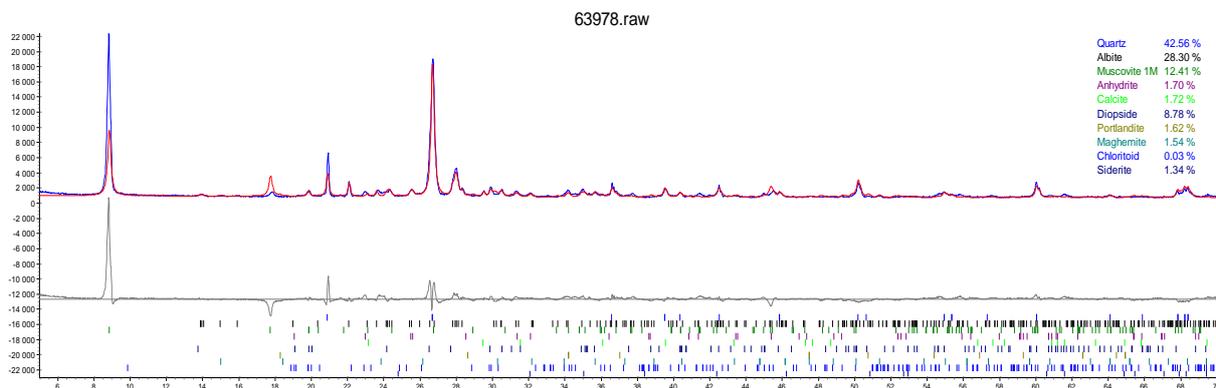
- Ferrier, G., Naden, J., Ganas, A., Kemp, S., & Pope, R. (2016). Identification of multi-style hydrothermal alteration using integrated compositional and topographic remote sensing datasets. *Geosciences (Switzerland)*, 6(3). doi:10.3390/geosciences6030036
- Fox, N., Parbhakar-Fox, A., Moltzen, J., Feig, S., Goemann, K., & Huntington, J. (2016). Applications of hyperspectral mineralogy for geoenvironmental characterisation. *Minerals Engineering*. doi:10.1016/j.mineng.2016.11.008
- Helt, (2012). The canadian malartic deposit: an example of oxidized, intrusion-related gold mineralization in the abitibi Greenstone belt, québec, canada. Mémoire de thèse. Université McGill
- Garcia Serna J., (2018). Analyse multi-échelle des spectres de réflectance dans un environnement minier. Mémoire de maîtrise. Université de Sherbrooke
- Kopačková, V. (2014). Using multiple spectral feature analysis for quantitative pH mapping in a mining environment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28, 28-42. doi:10.1016/j.jag.2013.10.008
- Lawrence, R.W., Wang, Y., (1997). Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage. p. 451–464. Proceedings from the 4th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Vancouver, BC, Canada. 31 May-6 June 1997. *Mine Environment Neutral Drainage*, Nat. Resour. Canada, Ottawa, ON vol. 1, pp. 449–464.
- Lillesand T.M., Kiffer R.W., Chipman J.W., (2015). Remote Sensing And Images Interpretation. 7th Edition. Wiley. ISBN 978-1-118-34328-9
- 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. doi:10.1016/j.apgeochem.2015.01.009
- Meer, F. v. d. (2018). Near-infrared laboratory spectroscopy of mineral chemistry: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 65, 71-78. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.10.004>
- Neal, L. C., Wilkinson, J. J., Mason, P. J., & Chang, Z. (2018). Spectral characteristics of propylitic alteration minerals as a vectoring tool for porphyry copper deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 184, 179-198. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.019>
- Nordstrom, D. K. (2011). Mine Waters: Acidic to Circumneutral. *Elements*, 7(6), 393-398. doi:10.2113/gselements.7.6.393
- Nordstrom, D. K., Blowes, D. W., & Ptacek, C. J. (2015). Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. *Applied Geochemistry*, 57, 3-16. doi:10.1016/j.apgeochem.2015.02.008
- Paktunc, A.D., (1999). Characterization of mine wastes for prediction of acid mine drainage. In: Azcue, J.M. (Ed.), *Environmental impacts of mining activities*. Springer-Verlag, New York, pp. 19–40.

- Paktunc, A.D., Leaver, M., Salley, J., Wilson, J., (2001). A new standard material for acid base accounting tests. *Securing the Future. Int. Conf. Mining and the Environment, Skelleftea, Sweden*, pp. 644–652.
- Pal, S. K., Majumdar, T. J., Bhattacharya, A. K., & Bhattacharyya, R. (2011). Utilization of landsat ETM+ data for mineral-occurrences mapping over Dalma and Dhanjori, Jharkhand, India: An advanced spectral analysis approach. *International Journal of Remote Sensing*, 32(14), 4023-4040. doi:10.1080/01431161.2010.484430
- Panteras, G. (2013). *Spectral mixture analysis of EO-1 Hyperion data for the identification and detection of clay and silicate minerals in Milos Island, Greece*. Paper presented at the 34th Asian Conference on Remote Sensing 2013, ACRS 2013, Bali.
- Plante, B., Bussière, B., & Benzaazoua, M. (2014). Lab to field scale effects on contaminated neutral drainage prediction from the Tio mine waste rocks. *Journal of Geochemical Exploration*, 137, 37-47. doi:10.1016/j.gexplo.2013.11.004
- Rajendran, S., & Nasir, S. (2017). Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of volcanogenic massive sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 88, 317-335. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.016>
- Rani, N., Mandla, V. R., & Singh, T. (2017). Spatial distribution of altered minerals in the Gadag Schist Belt (GSB) of Karnataka, Southern India using hyperspectral remote sensing data. *Geocarto International*, 32(3), 225-237. doi:10.1080/10106049.2015.1132484
- Riaza, A., Buzzi, J., García-Meléndez, E., Carrère, V., Sarmiento, A., & Müller, A. (2012). River acid mine drainage: Sediment and water mapping through hyperspectral Hymap data. *International Journal of Remote Sensing*, 33(19), 6163-6185. doi:10.1080/01431161.2012.675454
- Riaza, A., García-Meléndez, E., & Mueller, A. (2011). Spectral identification of pyrite mud weathering products: A field and laboratory evaluation. *International Journal of Remote Sensing*, 32(1), 185-208. doi:10.1080/01431160903439957
- Shalaby, M. H., Bishta, A. Z., Roz, M. E., & El Zalaky, M. A. (2010). Integration of geologic and remote sensing studies for the discovery of uranium mineralization in some granite plutons, Eastern Desert, Egypt. *Journal of King Abdulaziz University, Earth Sciences*, 21(1), 1-25. doi:10.4197/Ear.21-1.1
- Sobek, A.A., Schuller, W.A., Freeman, J.R., Smith, R.M., (1978). Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils. EPA-600/2-78-054. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Tesnerová, C., Zadinová, R., Píkl, M., Zemek, F., Kadochová, Š., Matějčíček, L., . . . Frouz, J. (2017). Predicting the toxicity of post-mining substrates, a case study based on laboratory tests, substrate chemistry, geographic information systems and remote sensing. *Ecological Engineering*, 100, 56-62. doi:10.1016/j.ecoleng.2016.12.014
- Van der Meer, F. (2004). Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(1), 55-68. doi:10.1016/j.jag.2003.09.001

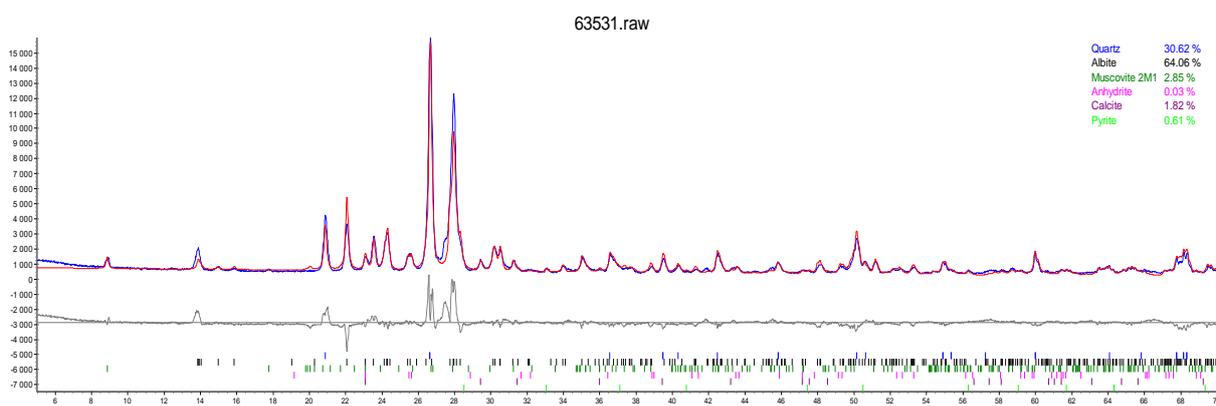
- Van der Meer, F., Kopačková, V., Koucká, L., van der Werff, H. M. A., van Ruitenbeek, F. J. A., & Bakker, W. H. (2018). Wavelength feature mapping as a proxy to mineral chemistry for investigating geologic systems: An example from the Rodalquilar epithermal system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 237-248. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.008>
- Verpoorter C., (2009). Télédétection hyperspectrale et cartographie des faciès sédimentaires en zone intertidale : application à la Baie de Bourgneuf. Océan, Atmosphère. Université de Nantes, 2009.
- Villeneuve M., Bussière B., (2009). Osisko-Canadian Malartic: Caractérisation environnementale d'échantillons post-essais minéralurgiques. USRTM.
- Wares R.. La mine Canadian Malartic, partie sud de la Ceinture de l'Abitibi, Québec, Canada : découverte et mise en valeur d'un gisement aurifère archéen à fort tonnage. Corporation Minière Osisko
- Zabcic, N., Rivard, B., Ong, C., & Mueller, A. (2014). Using airborne hyperspectral data to characterize the surface pH and mineralogy of pyrite mine tailings. *International Journal of Applied Earth Observation*

ANNEXE 1 – ANALYSES DRX

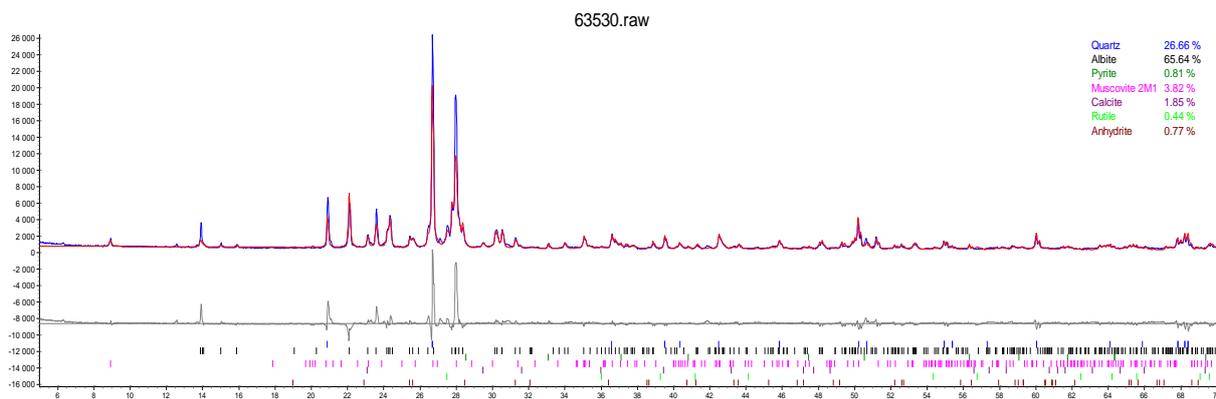
63978 = 15-1500-1-A1



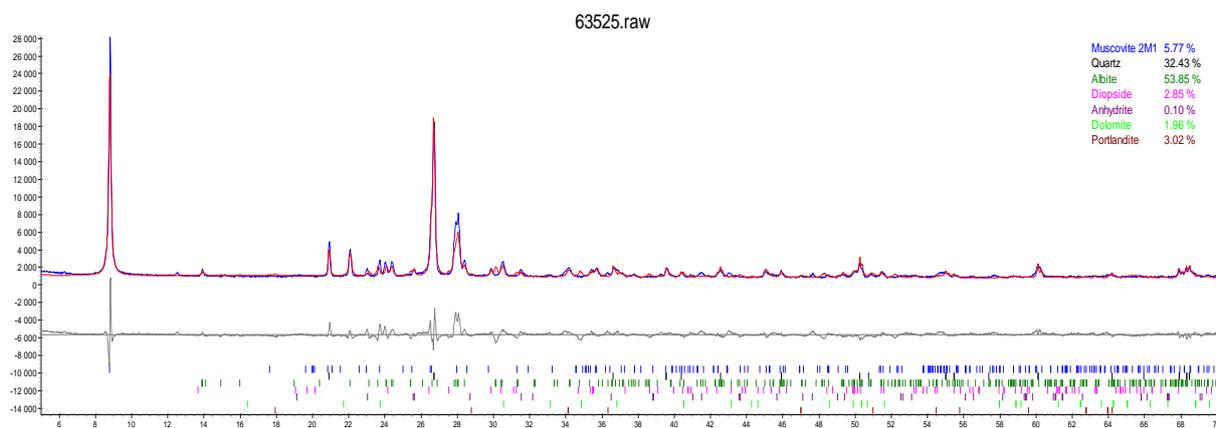
63531 = 16-ZFA-6 (B3) <106um



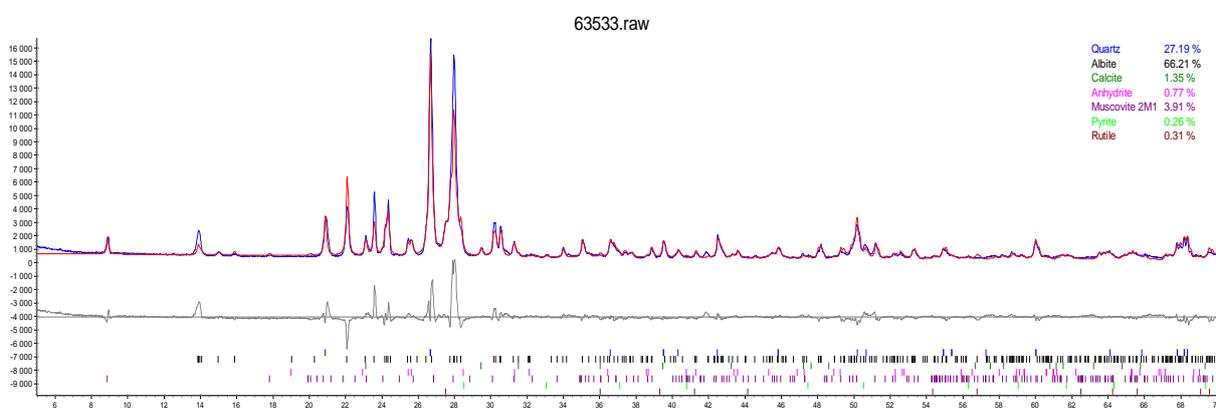
63530 = 16-ZFA-6 (B3) 212-106um



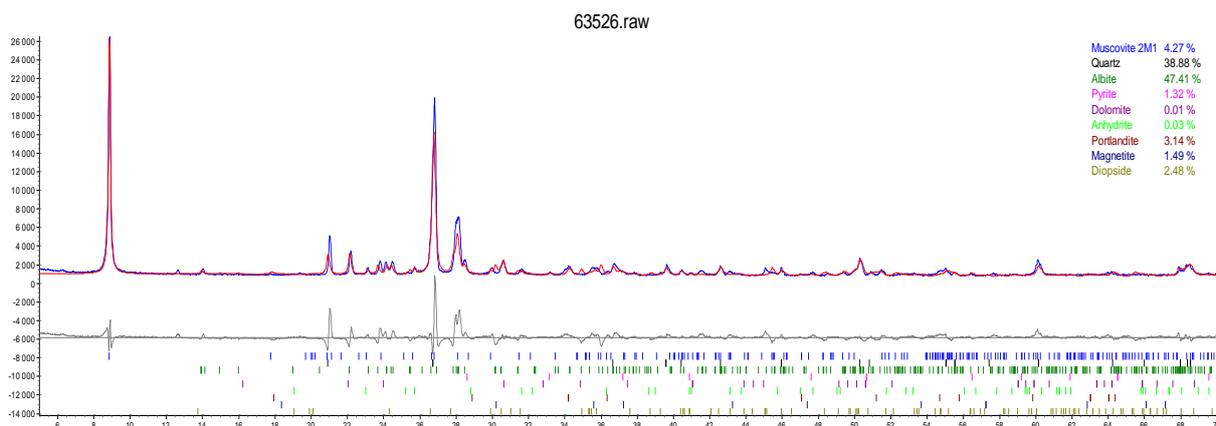
63529 = 16-ZFA-6 (B3) 630-212um



63533 = 16-ZFA-6 (B3) split 1/3

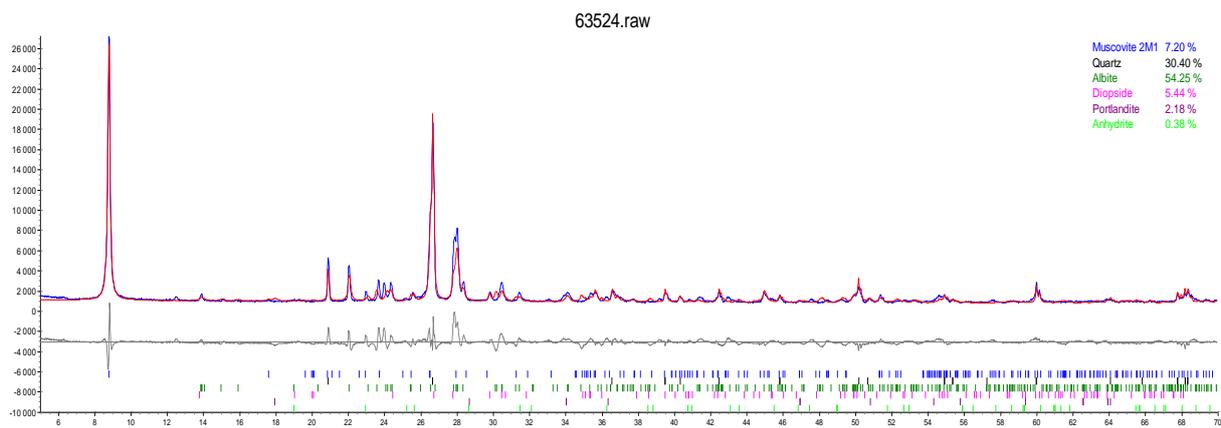


63526 = 16-ZFA-6 (B2) 212-106um

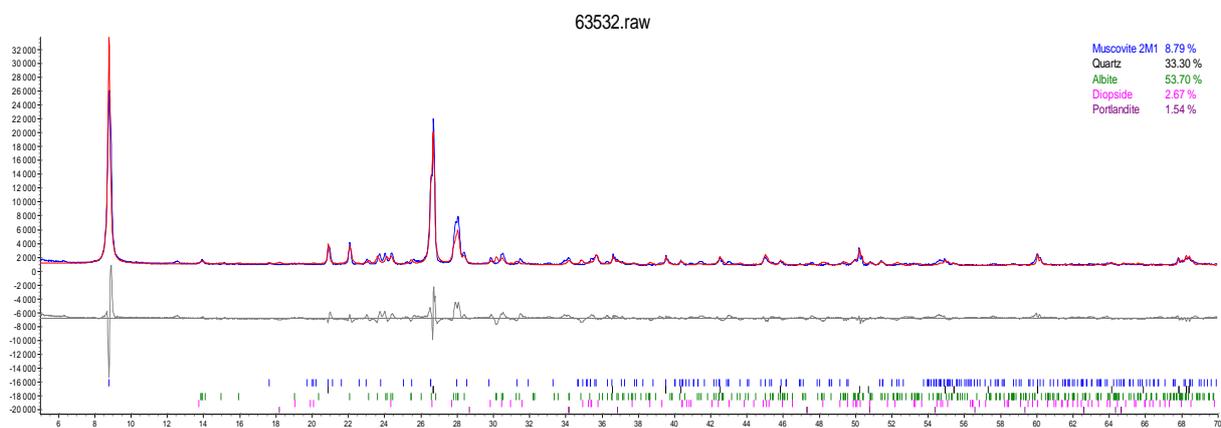


63525 = 16-ZFA-6 (B2) 630-212um

63524 = 16-ZFA-6 (B2) 2mm-630um



63532 = 16-ZFA-6 (B2) split 1/3



**ANNEXE 2 – TABLEAU PRÉPARATOIRE POUR CONFECTIONNER
LES ASSEMBLAGES DE MINÉRAUX PURS**

**ANNEXE 3 - PROTOCOLE DE MESURE DES SIGNATURES
SPECTRALES**

Assemblages mx purs :

Bas soufre (1%)
 1% S vs 0,15% C
 1% S vs 0,8% C
 1% S vs 1,25% C
 1% S vs 8% C

Bas carbone (1%)
 1% C vs 0,5% S
 1% C vs 1% S
 1% C vs 2% S
 1% C vs 8% S

Haut soufre (3%)
 3% S vs 0,5% C
 3% S vs 1% C
 3% S vs 2% C
 3% S vs 8% C

Haut carbone (8%)
 8% C vs 0,5% S
 8% C vs 2% S
 8% C vs 5% S
 8% C vs 10% S

Granulométrie blocs :

16-ZFA-6 (B2)
 2 mm - 630 µm
 630 - 212 µm
 212 - 106 µm
 ≤ 106 µm
 Référence bloc

16-ZFA-6 (B3)
 2 mm - 630 µm
 630 - 212 µm
 212 - 106 µm
 ≤ 106 µm
 Référence bloc

Bloc référence (16-ZFA-1)

→ **26** échantillons/spectres

Assemblages mx purs :

Bas soufre (1%)
 1% S vs 0,15% C
 1% S vs 0,8% C
 1% S vs 1,25% C
 1% S vs 8% C

Bas carbone (1%)
 1% C vs 0,5% S
 1% C vs 1% S
 1% C vs 2% S
 1% C vs 8% S

Haut soufre (3%)
 3% S vs 0,5% C
 3% S vs 1% C
 3% S vs 2% C
 3% S vs 8% C

Haut carbone (8%)
 8% C vs 0,5% S
 8% C vs 2% S
 8% C vs 5% S
 8% C vs 10% S

Granulométrie blocs :

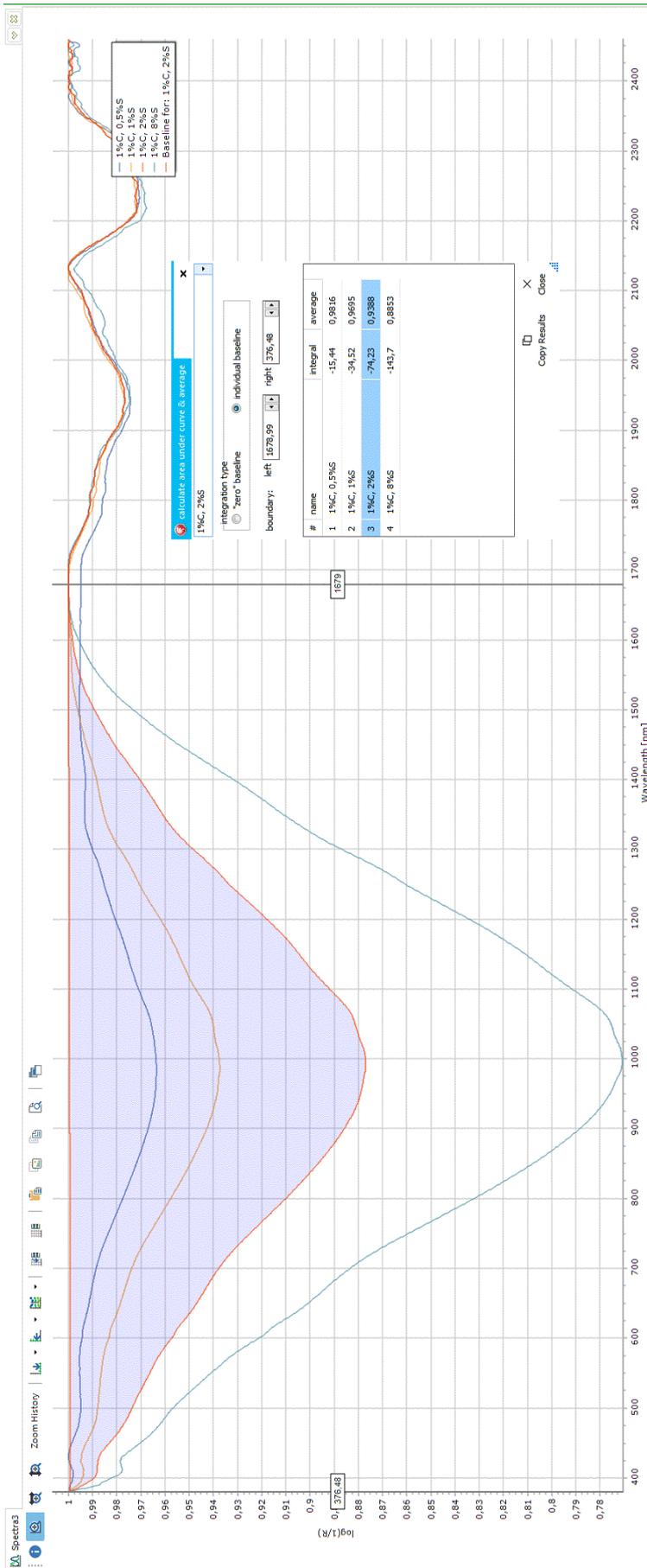
16-ZFA-6 (B2)
 2 mm - 630 µm
 630 - 212 µm
 212 - 106 µm
 ≤ 106 µm
 Référence bloc

16-ZFA-6 (B3)
 2 mm - 630 µm
 630 - 212 µm
 212 - 106 µm
 ≤ 106 µm
 Référence bloc

Bloc référence (16-ZFA-1)

→ **26** échantillons/spectres

**ANNEXE 4 - PROTOCOLE DE MESURE DES INTÉGRALES DE PICS
D'ABSORPTION**



Dr Friedrich Menges – SPECWIN32