

Département de Géomatique appliquée  
Faculté des lettres et sciences humaines  
Université de Sherbrooke

**Caractérisation lithologique par fusion évidentielle de  
résultats de démixage par ratio de bandes voisines et  
de données géochimiques**

Kevin SIEBELS

*Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph. D) en  
télétection, cheminement en physique de la télétection*

©Kevin Siebels, Mars 2020

Directeur de recherche : Pr. Kalifa Goïta

Co-directeur de recherche : Pr. Mickaël Germain

Membres du jury interne : Pr. Goze Bertin Benie, Pr. Yacine Bouroubi

Membre du jury externe : Pre. Elisabeth Levac

## RÉSUMÉ

---

L'activité minière fait partie des principales sources de matières premières utilisées en industrie. Elle constitue un des piliers indispensables à l'activité économique au Canada et dans le monde. Cet apport de matière première est cependant dépendant de gisements qui doivent être découverts et caractérisés avant leur exploitation.

Dans le secteur minier, la télédétection optique fait partie intégrante des données utilisées en exploration. Parmi les outils disponibles, les méthodes de démixage visent à fournir des informations quantitatives sur les matériaux présents dans la scène observée par le capteur. Les analyses s'appuient sur des modèles théoriques de mélange spectral pour démixer les spectres de réflectance de surfaces à plusieurs composants. Presque exclusivement utilisées en exploration, le démixage est généralement appliqué sur des images satellitaires et aéroportées. Dans cette thèse, il est envisagé comme source d'information complémentaire pour la caractérisation lithologique de mines à ciel ouvert en phase d'exploitation. Il est combiné par fusion évidentielle à l'information géochimique tirée d'analyses d'échantillons.

Le site d'étude de cette thèse est la mine d'or à ciel ouvert Canadian Malartic, située dans la province canadienne du Québec, en Abitibi. La mine utilise des méthodes conventionnelles d'exploitation avec forage, dynamitage et transport par tombereau. Ce contexte particulier entraîne cependant d'importantes difficultés dans l'application du démixage. L'activité frénétique d'une mine en exploitation produit en effet une quantité considérable de poussière, masquant les roches en place. En outre, la compagnie arrose en permanence les chemins empruntés par les véhicules afin de réduire la poussière qu'ils génèrent. Or, les variations d'humidité qui en résultent peuvent impacter les résultats du démixage. Cette thèse aborde donc également ces difficultés.

La première étape visait à évaluer les performances de cinq modèles de démixage existants ainsi que d'une nouvelle approche, appelée *Neighbor-Band Ratio Unmixing* (NBRU). La première expérience a consisté à démixer des spectres de 94 mélanges de minéraux afin d'évaluer leur aptitude à retrouver leurs abondances. Ce premier volet a ainsi mis en évidence l'avantage des modèles de transfert radiatif (MTR) de Hapke et de Shkuratov. Parmi les quatre modèles restants, NBRU s'est démarqué en fournissant les meilleures estimations pour 16 des 94 mélanges testés. Ses erreurs d'estimation

moyenne et médiane, tout mélange confondu, étaient de 9,8 et 7,4 %, respectivement. Les modèles ont ensuite été testés sur une image hyperspectral AVIRIS de Cuprite, Nevada, États-Unis. Sans accès à des données additionnelles, les MTR n'ont cependant pu être appliqués. Dans cette seconde étape, NBRU s'est largement distingué en retrouvant le plus fidèlement les distributions spatiales de sept des neuf minéraux cartographiés. Face à l'impossibilité d'application des MTR et aux bons résultats de NBRU, c'est donc ce dernier qui a été retenu dans la suite de la thèse.

Pour composer avec le problème d'humidité de la mine, l'approche NBRU a ensuite été modifiée en y intégrant une équation linéaire. Cette fonction exprime l'impact spectral de l'humidité d'après un facteur d'influence prédéfini par calibration, d'un indice d'humidité, et de la longueur d'onde considérée. Elle a été calibrée à partir de deux échantillons collectés dans la mine dont les spectres ont été mesurés à différents niveaux d'humidité. Le démixage des spectres de ces mêmes échantillons a ainsi montré un gain considérable de robustesse face aux variations d'humidité. Les différences d'abondances estimées entre les états saturés et secs restent ainsi en deçà de 4 % tout minéral confondu, contre 10 à plus de 90 % sans l'ajout de la fonction. L'application de l'approche modifiée sur une image Worldview-3 de la mine a cependant abouti à des résultats mitigés. Alors que les abondances de certains minéraux ont paru s'affranchir des variations d'humidité, d'autres, au contraire, ont vu leur sensibilité s'accroître. Ces cartes d'abondance minéralogique ont ensuite été utilisées dans le reste du processus de recherche.

Les données géochimiques utilisées dans cette thèse sont des analyses simulées à partir des analyses d'échantillons réels. Ces simulations ont ensuite été interpolées par krigeage universel dans tout l'espace du gisement. Les prédictions ainsi produites ont constitué la deuxième source d'information pour la caractérisation lithologique.

Les résultats de démixage et d'interpolation ont dans un premier temps été classifiés par arbre de décision avec ensachement. Plusieurs jeux d'entraînement ont été testés pour les deux sources. Ces classifications ont produit des probabilités d'appartenance pour chaque pixel et pour chacune des quatre classes lithologiques considérées. Ces probabilités ont ensuite été fusionnées d'après la théorie de Dezert-Smarandache (DSmT). Le résultat final est une carte lithologique combinant les informations

géochimiques et de démixage. L'amélioration obtenue par addition du démixage s'est cependant avérée limitée, atteignant 6,4 % dans le meilleur des cas.

## ABSTRACT

---

Mining activity is one of the main sources of raw material used in the industry and is therefore essential for the economic activity of Canada and around the world. This source of raw materials relies, however, on deposits which must be discovered, explored and exploited.

In the mining sector, optical remote sensing takes a key role in the exploration process. Among the methods available, spectral unmixing aims at providing quantitative information on the materials covered by the field of view of the sensor. The analyses are based on spectral mixture models to unmix multi-component reflectance spectra. Almost exclusively used for exploration purposes, spectral unmixing is classically performed on airborne and satellite images. In this thesis, spectral unmixing is used as a complementary source of information to better retrieve the lithological information in an active open pit mine. This source is combined to geochemical analysis using evidential fusion.

The study site is the Canadian Malartic Mine. This open pit gold mine is located in Abitibi, in the Canadian province of Québec, between Val-d'Or and Rouyn-Noranda. The mine uses common exploitation methods with drills, blasts and transport by trucks. The site is particularly challenging for unmixing methods. Indeed, mining activities generate a huge amount of dust, which potentially hides *in situ* rocks and considerably affects the textures of the surfaces. Additionally, the company permanently waters the tracks of the vehicles to reduce the amount of dust produced, which causes important variation of moisture across the mine, with all its spectral consequences. This thesis considers these problems as well.

The first experiment compared the results of five existing models as well as those of a new proposed approach called Neighbor-Band Ratio Unmixing (NBRU). Models ability at retrieving mineral abundances was first assessed on 94 spectra of crafted mineral mixtures. This first experiment highlights how radiative transfer models – Hapke's and Shkuratov's models – outperform the four remaining one. Among the latter, NBRU obtained the best results with 16 best abundance estimations and mean and median errors of 9.8 et 7.4%, respectively. Models' robustness was then tested on an AVIRIS hyperspectral image of Cuprite, Nevada, US. However, since insufficient

information on the samples of the spectral references were available, transfer radiative models were unworkable. NBRU obtained significantly better results than the three other models tested, retrieving most accurate spatial distributions for seven of the nine minerals mapped. Based on these results, the proposed NBRU approach was selected and applied in the rest of the research.

To handle the moisture problem encountered in Canadian Malartic Mine, the NBRU approach was modified by integrating a linear equation. The latter expresses the spectral influence of moisture as a function of a moisture index, an influence factor, and the wavelength considered. The function was calibrated based on spectra of two grinded rock samples with various moisture levels.

The unmixing of these spectra showed that the modification of the approach led to a significant improvement of robustness when facing moisture variations. However, its application on a 16-spectral-bands Worldview-3 image of the mine led to arguable results. While the abundance of some minerals appeared to overcome the influence of moisture, other minerals displayed an opposite behavior, showing higher contrasts in its presence. These abundance maps were used as the first source of lithological information in the fusion process.

The geochemical data used in this thesis were simulated analysis based on real samples. These virtual samples were interpolated by universal 3D kriging. The predictions were then used as the second source of information in the evidential fusion.

The results of the unmixing and of the interpolation steps were then classified using bagged decision trees with various training sets. These classifications led to probabilities for each pixel to belong to the four considered lithological classes. These probabilities were then combined following the Dezert-Smarandache Theory (DSmT). The final result of this research is a lithological map that combines both geochemical and remote sensed information. The fusion of the unmixing results led however to limited gains, improving the precisions of the lithological classifications of 6,4 %, at its best.

## TABLE DES MATIÈRES

---

|   |       |
|---|-------|
| Résumé.....   | iii   |
| Abstract.....   | vi    |
| Table des Matières .....  | viii  |
| Liste des Figures .....   | xii   |
| Liste des Tableaux .....  | xviii |
| Liste des Annexes .....   | xix   |
| Liste des Acronymes.....  | xxii  |
| Remerciements.....  | xxiii |
| Chapitre 1. Introduction.....   | 1     |
| 1.1 Contexte : activité minière et rôle de la télédétection.....                | 1     |
| 1.1.1 Activité minière au Canada et dans le monde : quelques chiffres .....     | 1     |
| 1.1.2 La télédétection en exploration minière.....                              | 2     |
| 1.1.3 Méthodes conventionnelles de caractérisation en phase d'exploitation ..   | 4     |
| 1.2 Problématique .....   | 5     |
| 1.3 Objectifs et Hypothèses .....   | 6     |
| 1.4 Organisation de la thèse .....  | 7     |
| Chapitre 2. Cadre Théorique – Le démixage spectral et la fusion de données..... | 8     |
| 2.1 Démixage spectral : de la réflectance à la minéralogie.....                 | 8     |
| 2.1.1 Spectroscopie des minéraux.....   | 8     |
| 2.1.2 Le démixage spectral .....  | 10    |
| A. Résolution du problème de démixage.....                                      | 10    |
| B. Problème de variabilité spectrale .....                                      | 11    |
| C. Le choix du modèle de mélange spectral .....                                 | 13    |
| 2.1.3 Composer avec la question de l'humidité.....                              | 18    |
| 2.2 Fusion de plusieurs sources de données.....                                 | 19    |



|             |   |    |
|-------------|---|----|
| 2.2.1       | La théorie des croyances .....  | 20 |
| 2.2.2       | La théorie de Dezert-Smarandache .....                                | 21 |
| A.          | Assignment des niveaux de confiance .....                             | 22 |
| a.          | Pondération des niveaux de confiance par un critère de fiabilité..... | 23 |
| B.          | L'étape de Combinaison .....  | 24 |
| C.          | Fonctions de croyance généralisées .....                              | 24 |
| D.          | L'étape de Décision .....   | 26 |
| 2.3         | Comment appliquer le démixage en exploitation minière ? .....         | 26 |
| 2.3.1       | Mise en perspective des objectifs principaux et secondaires.....      | 27 |
| 2.3.2       | Limites de l'étude .....  | 28 |
| Chapitre 3. | Cadre expérimental .....  | 29 |
| 3.1         | Site d'étude .....  | 29 |
| 3.1.1       | Méthodes d'exploitation et conséquences .....                         | 33 |
| 3.2         | Données.....  | 35 |
| 3.2.1       | Données spectrales.....   | 35 |
| A.          | Spectres de mélanges de minéraux RELAB .....                          | 35 |
| B.          | Image hyperspectrale AVIRIS.....                                      | 35 |
| C.          | Spectres des bibliothèques spectrales .....                           | 36 |
| D.          | Image superspectrale WorldView-3 .....                                | 36 |
| E.          | Spectres ASD de la Mine Canadian Malartic .....                       | 37 |
| F.          | Spectres ASD acquis en laboratoire.....                               | 38 |
| 3.2.2       | Données de la mine.....   | 38 |
| A.          | Données lithologiques.....  | 38 |
| B.          | Données géochimiques .....  | 40 |
| 3.3         | Méthodologie .....  | 42 |
| 3.3.1       | Comparaison des modèles de démixage .....                             | 43 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| A.          | Proposition d'une nouvelle approche : le <i>Neighbor-Band Ratio Unmixing</i>  |    |
|             | 43  |    |
| B.          | Évaluation des performances quantitatives.....  | 48 |
| C.          | Sensibilité des modèles face au problème de variabilité spectrale. ....   | 48 |
| 3.3.2       | Intégration de la fonction d'humidité dans le processus de démixage ..  | 53 |
| A.          | Modification du modèle de démixage.....   | 54 |
| B.          | Calibration de la fonction d'humidité .....   | 56 |
| C.          | Intégration de la fonction d'humidité .....   | 56 |
| D.          | Évaluation du modèle de démixage modifié.....   | 57 |
| 3.3.3       | Interpolation des données géochimiques .....  | 59 |
| A.          | Simulation d'échantillons .....   | 59 |
| a.          | Génération d'analyses géochimiques.....   | 60 |
| b.          | Simulation d'une variation spatiale géochimique .....   | 62 |
| c.          | Génération de mailles d'échantillonnage .....   | 64 |
| B.          | Interpolation des échantillons par krigeage .....   | 65 |
| 3.3.4       | Fusion des résultats de démixage avec les données géochimiques.....   | 66 |
| A.          | Attribution des masses .....  | 66 |
| a.          | Côté géochimie.....   | 66 |
| b.          | Côté télédétection.....   | 67 |
| B.          | Fusion des masses, probabilité pignistique et décision.....   | 67 |
| Chapitre 4. | Résultats et Analyse .....  | 70 |
| 4.1         | Comparaison des performances des méthodes de démixage .....   | 70 |
| 4.2         | Résultats de NBRU appliqué à l'image WV3 de la Mine Canadian Malartic et de l'intégration d'une fonction d'humidité ..... | 74 |
| 4.2.1       | Résultats de calibration de la fonction d'humidité .....  | 75 |
| 4.2.2       | Démixage des spectres des échantillons avec et sans la fonction d'humidité.....   | 76 |

|                 |   |     |
|-----------------|---|-----|
| 4.2.3           | Démixage de l'image WorldView-3 .....   | 80  |
| 4.3             | Résultats des simulations d'analyses géochimiques et de leur interpolation<br>83                                    |     |
| 4.4             | Résultats de la fusion évidentielle.....  | 88  |
| 4.4.1           | Attribution des masses par classification.....  | 88  |
| A.              | Classification des résultats de démixage.....   | 88  |
| B.              | Classification des données géochimiques interpolées .....   | 92  |
| 4.5             | Fusion évidentielle des données satellitaires et géochimiques .....   | 96  |
| Chapitre 5.     | Interprétation et Discussion .....  | 104 |
| 5.1             | Évaluation des méthodes de démixage spectral.....   | 104 |
| 5.2             | Améliorer le démixage en corrigeant l'effet de l'humidité .....   | 105 |
| 5.3             | Simulation de données et interpolation par krigeage.....  | 108 |
| 5.4             | Le démixage peut-il aider à la caractérisation dans ce contexte ? .....   | 109 |
| Chapitre 6.     | Conclusion et perspectives.....   | 111 |
| 6.1             | Conclusion .....  | 111 |
| 6.2             | Perspectives.....   | 113 |
| Références..... |   | 115 |
| Annexes.....    |   | 138 |
| Annexe A :      | Erreurs moyennes d'estimation des abondances estimées par les modèles<br>de démixage sur les 94 mélanges RELAB..... | 138 |
| Annexe B :      | Données de la mine.....   | 140 |
| Annexe C :      | Résultats de fusion complémentaires.....  | 148 |

## LISTE DES FIGURES

---

|  |    |
|--|----|
| Figure 1.1 : Proportion moyenne de matière recyclée dans les produits manufacturés (Graedel <i>et al.</i> , 2011a). .....  | 1  |
| Figure 1.2 : Production minière mondiale de 1984 à 2015 (Reichl <i>et al.</i> , 2017).....   | 2  |
| Figure 1.3 : Cartographie lithologique par démixage de pulpes de forage. Les différents gris représentent les proportions estimées de chaque <i>endmember</i> lithologique (barres verticales). Une lithologie est d'autant plus sombre que sa présence est importante. Les deux sections de droite illustrent un résultat de classification d'après le démixage. Extrait de Taylor (2000).....  | 6  |
| Figure 2.1 : Exemple de spectres de réflectance de minéraux. La calcite (bleu) montre nettement des pics d'absorption entre 1800 nm et 2400 nm liés aux liaisons CO <sub>3</sub> . La kaolinite (rouge) affiche deux bandes d'absorption autour de 1400 et 2200 nm liées aux liaisons OH. Enfin, l'hématite (jaune) montre une large bande d'absorption en début de spectre avec un pic de réflectance autour de 750 nm. C'est ce pic qui est à l'origine de la couleur rouge de l'hématite.....   | 9  |
| Figure 3.1 : A : Les Grands Ensembles Géologiques du Québec (modifié; MERN, 2012). La flèche verte et l'encadré vert indiquent l'emplacement de la mine ; B : Carte modifiée de la Sous-province de Pontiac (Perrouy <i>et al.</i> , 2017), elle-même modifiée d'après Derry (1939), Fallara (2000), Gunning et Ambrose (1940), Sansfaçon <i>et al.</i> (1987), MERN (2016), Base de Données SIGEOM, 2016 <a href="http://sigeom.mines.gouv.qc.ca/">http://sigeom.mines.gouv.qc.ca/</a> , Minerais Lac Limited : rapports et cartes non publiées, et Canadian Malartic Exploration, 2012, données non publiées. .... | 30 |
| Figure 3.2 : Paragenèse d'altération et de minéralisation des roches métasédimentaires et des intrusions de quartz-monzodiorite porphyriques (Helt <i>et al.</i> , 2014). ....   | 32 |
| Figure 3.3: Image panchromatique WorldView-3 de la Mine Canadian Malartic. Les zones plus claires sont essentiellement dues à la poussière importante déposée sur les surfaces rocheuses. Les mailles de points à droite de la fosse sont des trous de sautage. Au sud de la fosse, trois tombereaux (camions) sont visibles montant la rampe d'accès. ....  | 34 |
| Figure 3.4 : Sous-échantillon de 300 x 300 pixels en couleurs RVB augmentées de l'image AVIRIS de Cuprite. ....  | 36 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 3.5 : Image RVB (Rouge = bande 5, Vert = bande 3, Bleu = bande 2) Worldview-3 centrée sur les haldes à stériles de la mine.....  | 37 |
| Figure 3.6 : Carte des lithologies définies par la Mine Canadian Malartic, reconstruite à partir des coupes horizontales du modèle lithologique produit par la compagnie. Une couleur est attribuée à chacune des quatre lithologies observables, à savoir : bleu pour le grauwacke altéré (AGR), vert pour le grauwacke carbonaté (CGR), orange pour le porphyre silicifié (SPO) et bordeaux pour le porphyre carbonaté (CPO)..... | 39 |
| Figure 3.7 : Extrait d'une section transversale de la mine le long de laquelle des forages d'exploration ont été réalisés. Les couleurs des traits définissent la lithologie des carottes. Chaque section échantillonnée est identifiée par un numéro. ....   | 40 |
| Figure 3.8 : Plan de répartition des échantillons projetés sur le plan horizontal. L'alignement des points dans la direction NS est dû à la distribution des forages le long des coupes transversales (Projection NAD83, UTM 17). Extrait de Golder et Associés (2014).....   | 41 |
| Figure 3.9 : Organigramme général de la méthodologie. ....  | 42 |
| Figure 3.10 : Organigramme du processus de comparaison et de sélection des modèles de démixage. Les éléments en reliefs correspondent aux intrants. ....  | 43 |
| Figure 3.11 : Evolution de ratios de bandes voisines ( $s_i^*$ , axe des ordonnées) pour cinq différences de réflectance $\Delta$ avec la réflectance de la première bande ( $s_i$ , axe des abscisses) allant de zéro à sa valeur maximum. La transformation en SSA du modèle d'Hapke est également illustrée pour comparaison. ....   | 46 |
| Figure 3.12 : Comparaison entre des mélanges linéaires de valeurs de réflectances (disques blancs) et des mélanges linéaires de ratios de bandes NBR (losanges noirs). ....   | 47 |
| Figure 3.13 : Spectre des <i>endmembers</i> tirés des bibliothèques spectrales splib07a et ECOSTRESS, après conversion aux résolutions spectrales AVIRIS et remplacement des bandes bruitées. Le point est utilisé dans la figure à la place de la virgule comme symbole décimal. ....  | 49 |
| Figure 3.14 : Extrait de la carte minéralogique générée par l'algorithme Tetracorder (Clark <i>et al.</i> , 2003) issue de Swayze <i>et al.</i> (2014) montrant les argiles, micas, sulfates  |    |

|  |    |
|--|----|
| et carbonates spectralement dominants. Les flèches indiquent les localisations d'échantillons dans l'article d'origine. ....   | 51 |
| Figure 3.15 : Extrait de la carte minéralogique générée par l'algorithme Tetracorder (Clark <i>et al.</i> , 2003) issue de Swayze <i>et al.</i> (2014) montrant les minéraux contenant du fer spectralement dominants. Les flèches indiquent les localisations d'échantillons dans l'article d'origine. .... | 52 |
| Figure 3.16 : Organigramme du processus de modification d'un modèle de démixage par calibration et intégration d'une fonction d'humidité. ....   | 54 |
| Figure 3.17 : Illustration des <i>endmembers</i> retenus par meilleure reconstruction des spectres des échantillons MG (gauche) et MP (droite). Le spectre de la biotite est commun aux deux échantillons.....   | 55 |
| Figure 3.18 : Courbes des réponses radiométriques relatives des 16 bandes du capteur Worldview-3 (Kuester, 2016). La bande panchromatique n'est pas incluse dans la figure. ....   | 58 |
| Figure 3.19 : Image RGB de la mine Canadian Malartic. ....   | 59 |
| Figure 3.20 : Distribution des valeurs d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> et de SiO <sub>2</sub> pour les 193 échantillons disponibles. ....   | 61 |
| Figure 3.21 : Gauche : distribution originale en SiO <sub>2</sub> et Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> pour la lithologie AGR ; Droite : nouvelle distribution après normalisation et uniformisation. ....  | 61 |
| Figure 3.22 : Gauche : Mille échantillons simulés aléatoirement d'après la fonction copule, et de distribution uniforme. Droite : Reprojection des échantillons simulés vers la fonction de densité cumulée d'origine. ....  | 62 |
| Figure 3.23 : Organigramme du processus de création d'une variation géochimique dans l'espace de la mine. Les flèches illustrent les intrants.....   | 63 |
| Figure 3.24 : Variation spatiale du MgO à 230 m d'altitude, générée par interpolation IDW de 414 échantillons (114 réels, 300 virtuels). Les discontinuités sont dues aux changements de lithologie metagrauwacke – porphyre. ....   | 64 |
| Figure 3.25 : Organigramme de la création d'une maille systématique d'échantillons simulés. ....   | 65 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 3.26 : Organigramme des processus de classification et de fusion des données .....   | 68 |
| Figure 4.1 : Histogrammes des erreurs moyennes d'estimation par mélange, obtenues par les six méthodes de démixage. Les valeurs en abscisse correspondent aux erreurs d'abondances moyennes. Les valeurs en ordonnées correspondent aux fréquences de mélanges appartenant aux différentes classes d'erreur, répartis en intervalles de 5 % (0,05). Les valeurs moyennes et médianes des distributions sont également indiquées à titre d'information. .... | 70 |
| Figure 4.2 : Cartes minéralogiques obtenues par seuillage des cartes d'abondance des quatre méthodes de démixage. ....  | 74 |
| Figure 4.3 : Gauche : Indices d'humidité obtenus lors du processus de calibration. Les courbes montrent le passage progressif des échantillons de leur état saturé (spectre numéro un) à sec ; Droite : Facteur d'influence de l'humidité pour les 2151 bandes spectrales. ....   | 75 |
| Figure 4.4 : Spectres de réflectance mesurés (gauche) et modélisés (droite) de l'échantillon MG. Le spectre de l'échantillon sec (ligne noire épaisse) est le paramètre $s$ de la fonction d'humidité. ....   | 75 |
| Figure 4.5 : Spectres de réflectance mesurés (gauche) et modélisés (droite) de l'échantillon MP. Le spectre de l'échantillon sec (ligne noire épaisse) est le paramètre $s$ de la fonction d'humidité. ....   | 76 |
| Figure 4.6 : Abondances minéralogiques estimées par l'approche NBRU sur les spectres ASD complets des échantillons MG (gauche) et MP (droite), de leur état saturé (première mesure) à sec. La FH n'a pas été intégrée dans le processus. ....  | 77 |
| Figure 4.7 : Abondances minéralogiques estimées par l'approche NBRU avec FH sur les spectres ASD complets des échantillons MG (gauche) et MP (droite), de leur état saturé (première mesure) à sec. ....  | 77 |
| Figure 4.8 : Abondances minéralogiques estimées par l'approche NBRU avec FH sur les spectres ASD sans les bandes d'absorption de l'eau des échantillons MG (gauche) et MP (droite), de leur état saturé (première mesure) à sec. ....   | 78 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 4.9 : Abondances minéralogiques estimées par l’approche NBRU sur les spectres WV3 des échantillons MG (gauche) et MP (droite), de leur état saturé (première mesure) à sec. La FH n’a pas été intégrée dans le processus. ....   | 78 |
| Figure 4.10 : Abondances minéralogiques estimées par l’approche NBRU avec FH sur les spectres WV3 des échantillons MG (gauche) et MP (droite), de leur état saturé (première mesure) à sec. ....  | 79 |
| Figure 4.11: Écarts entre les abondances estimées par démixage des états saturés (première mesure) et secs (dernière mesure) lors des tests en laboratoire sur l’échantillon MG. ....   | 80 |
| Figure 4.12 : Écarts entre les abondances estimées par démixage des états saturés (première mesure) et secs (dernière mesure) lors des tests en laboratoire sur l’échantillon MP. ....  | 80 |
| Figure 4.13 : Carte d’indices d’humidité $w$ retrouvés par l’approche NBRU combinée à la FH. ....   | 81 |
| Figure 4.14 : Carte d’abondance de huit des 11 <i>endmembers</i> associés à six minéraux et utilisés dans le démixage de la mine. Les trois <i>endmembers</i> manquants ayant abouti à des abondances systématiquement nulles ne sont pas présentés. La colonne de gauche illustre les résultats de l’approche NBRU sans FH, et la colonne de droite, avec FH. .... | 82 |
| Figure 4.15 : Matrice illustrant les valeurs absolues des corrélations entre les oxydes des échantillons réels de la lithologie AGR. Les éléments encadrés en rouge sont les valeurs des corrélations les plus élevées, utilisées pour l’évaluation de la méthode. ...  | 84 |
| Figure 4.16 : Nuages de points et histogrammes des oxydes des 98 échantillons AGR réels (colonne de gauche) et de 1000 échantillons AGR simulés (colonne de droite). ....   | 85 |
| Figure 4.17 : Erreur moyenne de prédiction de la géochimie des points prédits par krigeage, pour sept oxydes. ....  | 86 |
| Figure 4.18 : Exemples de variogrammes produits lors de l’interpolation par krigeage. Le variogramme de droite, calculé avec les échantillons de la maille 120x120x10 m, n’atteint pas de palier. ....  | 87 |
| Figure 4.19 : Carte d’erreur de l’interpolation par krigeage de l’oxyde $P_2O_5$ pour la maille d’échantillonnage 30x30x10 m. ....  | 88 |



|  |     |
|--|-----|
| Figure 4.20 : Précisions (axe des ordonnées) de classification du démixage d'après les scores (abscisse) attribués par le classifieur pour chaque jeu d'entraînement. L'histogramme indique la fréquence des scores en proportion de pixels.....   | 90  |
| Figure 4.21 : Gauche : Cartes des masses (ou probabilités d'appartenance) les plus élevées définies par classification en arbre de décision, Droite : Cartes lithologiques. ....   | 91  |
| Figure 4.22 : Précisions (axe des ordonnées) de classification du krigeage d'après les scores (axe des abscisses) attribués par le classifieur pour chaque jeu d'entraînement. L'histogramme indique la fréquence des scores. La ligne noire a une pente de valeur 1, illustrant une situation où les scores traduiraient parfaitement la précision. Les résultats de la maille 120 x 120 x 20 m ne sont pas repris, aucun échantillon SPO n'étant présent dans ce jeu d'entraînement..... | 94  |
| Figure 4.23 : Exemple de carte de masses et de cartes de lithologie obtenues par classification des résultats de krigeage. ....  | 95  |
| Figure 4.24 : Erreur de classification lithologique (en rouge) du krigeage de la maille 30 x 30 x 10 m. ....   | 96  |
| Figure 4.26 : Résultats de classification lithologique par fusion évidentielle. Le critère de classification est le maximum de probabilité pignistique <i>BetP</i> dont les valeurs sont illustrées dans les cartes de la colonne de gauche.....   | 98  |
| Figure 4.27 : Cartes de changements lithologiques des pixels entre les classifications des résultats de krigeage et de la fusion évidentielle. Les carrés verts indiquent un changement bénéfique apporté par la fusion. Les carrés rouges indiquent un changement néfaste.....  | 100 |
| Figure 4.28 : Précisions de classification de la fusion par centile d'incertitude pour différents jeux d'entraînement. ....  | 103 |
| Figure 5.1 : Spectres de réflectance de quatre pixels de l'image WV3. Les deux spectres plus élevés proviennent de zones plus claires couvertes de poussière. Les deux spectres les plus bas proviennent de zones sombres, dominées par une texture rocheuse. ....   | 107 |

## LISTE DES TABLEAUX

---

|   |    |
|---|----|
| Tableau 4.1 : Fréquence de meilleurs résultats obtenus par les six méthodes testées sur les 94 mélanges du RELAB.....   | 71 |
| Tableau 4.2 : Erreurs moyennes des abondances obtenues par les six méthodes de démixage sur des mélanges binaires calcite-chlorite. Les spectres ont été mesurés par Carle M. Pieters avec les installations RELAB de la NASA.....  | 71 |
| Tableau 4.3 : Erreurs moyennes des abondances obtenues par les six méthodes de démixage sur des mélanges binaires quartz-alunite et quartz-muscovite. Les spectres ont été mesurés par Carle M. Pieters avec les installations RELAB de la NASA.....  | 72 |
| Tableau 4.4 : Interprétation des valeurs de kappa, d'après (Landis & Koch (1977)) :   | 72 |
| Tableau 4.5 : Coefficients kappa obtenus entre les classifications binaires des minéraux cartographiés et les cartes minéralogiques extraites de Swayze <i>et al.</i> (2014), utilisées comme référence.....  | 73 |
| Tableau 4.6 : Performances des classifications lithologiques des abondances issues du démixage, entraînées avec différents nombres de pixels sélectionnés aléatoirement..   | 89 |
| Tableau 4.7 : Améliorations des classifications des résultats de démixage avec l'augmentation des nombres d'échantillons utilisés dans l'entraînement.....  | 92 |
| Tableau 4.8 : Performances de classification des prédictions géochimiques par krigeage à hauteur du plancher, pour différentes mailles d'échantillonnage. Les résultats de la maille 120 x 120 x 20 m ne sont pas repris, aucun échantillon SPO n'étant présent dans ce jeu d'entraînement..... | 93 |
| Tableau 4.9 : Différence de précision (%) entre les résultats de classification des données géochimiques krigées et les résultats de fusion. ....   | 97 |
| Tableau 4.10 : Différence de coefficient kappa entre les résultats de classification des données géochimiques krigées et les résultats de fusion. ....  | 97 |

## LISTE DES ANNEXES

---

|  |     |
|--|-----|
| Annexe A 1 : Erreurs d'abondance calculées pour les mélanges RELAB hypersthène-augite-olivine-labradorite. Les spectres ont été acquis par Tim McCoy avec les infrastructures du RELAB. Les ID du catalogue RELAB sont également présentés à des fins de reproductibilité..... | 138 |
| Annexe A 2 : Erreurs d'abondance calculées pour les mélanges RELAB magnésite-nontronite-forstérite. Les spectres ont été acquis par Janice L. Bishop avec les infrastructures du RELAB. Les ID du catalogue RELAB sont également présentés à des fins de reproductibilité..... | 139 |
| Annexe A 3 : Erreurs d'abondance calculées pour les mélanges RELAB gypse-quartz. Les spectres ont été acquis par Janice L. Bishop avec les infrastructures du RELAB. Les ID du catalogue RELAB sont également présentés à des fins de reproductibilité. ....                   | 139 |
| Annexe A 4 : Erreurs d'abondance calculées pour les mélanges RELAB olivine-anorthite-bronzite. Les spectres ont été acquis par Carle M. Pieters avec les infrastructures du RELAB. Les ID du catalogue RELAB sont également présentés à des fins de reproductibilité.....      | 139 |
| Annexe B 1 : Sections horizontales du modèle-bloc lithologique de la mine à 240 m d'altitude. ....   | 140 |
| Annexe B 2 ; Sections horizontales du modèle-bloc lithologique de la mine à 230 m d'altitude. ....   | 140 |
| Annexe B 3 : Sections horizontales du modèle-bloc lithologique de la mine à 220 m d'altitude. ....   | 140 |
| Annexe B 4 : Sections horizontales du modèle-bloc lithologique de la mine à 210 m d'altitude. ....   | 141 |
| Annexe B 5 : Sections horizontales du modèle-bloc lithologique de la mine à 200 m d'altitude. ....   | 141 |

|   |     |
|---|-----|
| Annexe B 6 : Analyses géochimiques utilisées dans la simulation d'échantillons. Les 114 échantillons dont l'identifiant commencent par « CM » (pour la fosse Canadian Malartic) sont ceux intégrés dans l'interpolation. « BA » Correspond à l'ancienne fosse <i>Barnat</i> et GL à la fosse <i>Gouldie</i> située au sud-est et aujourd'hui remblayée..... | 142 |
| Annexe B 7 : Illustrations d'un extrait de plan d'exploitation (haut) et de l'image panchromatique WV3 (bas) utilisés pour produire la carte d'élévation du plancher.   | 147 |
| Annexe B 8 : Illustration de la carte d'élévation reconstituée à partir de l'image WV3 et du plan d'exploitation de la Mine Canadian Malartic.....  | 147 |
| <br>  |     |
| Annexe C 1 : Résultats de fusion exprimés en précisions après transformation pignistique des masses. ....   | 148 |
| Annexe C 2 : Résultats de fusion exprimés en kappa après transformation pignistique des masses. ....  | 148 |
| Annexe C 3 : Résultats de fusion exprimés en précision après transformation par la fonction de croyance généralisée. ....   | 149 |
| Annexe C 4 : Résultats de fusion exprimés en kappa après transformation par la fonction de croyance généralisée. ....   | 149 |
| Annexe C 5 : Amélioration par fusion exprimée en précision après transformation par la fonction de croyance généralisée. ....   | 150 |
| Annexe C 6 : Amélioration par fusion exprimée en kappa après transformation par la fonction de croyance généralisée. ....   | 150 |
| Annexe C 7 : Résultats de fusion exprimés en précision après transformation par la fonction de plausibilité généralisée.....  | 151 |
| Annexe C 8 : Résultats de fusion exprimés en kappa après transformation par la fonction de plausibilité généralisée.....  | 151 |
| Annexe C 9 : Amélioration par fusion exprimée en précision après transformation par la fonction de plausibilité généralisée.....  | 152 |
| Annexe C 10 : Amélioration par fusion exprimée en kappa après transformation par la fonction de plausibilité généralisée.....   | 152 |

|   |     |
|---|-----|
| Annexe C 11 : Résultats de fusion exprimés en précision après transformation par la probabiliste DSmP. .... | 153 |
| Annexe C 12 : Résultats de fusion exprimés en kappa après transformation par la probabiliste DSmP. ....     | 153 |
| Annexe C 13 : Amélioration par fusion exprimée en précision après transformation probabiliste DSmP. ....    | 154 |
| Annexe C 14 : Amélioration par fusion exprimée en kappa après transformation probabiliste DSmP. ....        | 154 |

## LISTE DES ACRONYMES

---

|        |   |
|--------|---|
| AEE    | Algorithme d'Extraction de Endmember                          |
| AGR    | Altered Greywacke   |
| ASD    | Analytical Spectral Device                                    |
| ASTER  | Advanced Spaceborne Thermal Emission et Reflection Radiometer |
| AVIRIS | Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer              |
| CGR    | Carbonated Greywacke  |
| CPO    | Carbonated Porphyry   |
| DRX    | Driffractomètre à Rayons-X                                    |
| DSmT   | Dezert-Smarandach Theory                                      |
| DST    | Dempster-Shafer Theory  |
| FDC    | Fonction de Distribution Cumulative                           |
| FH     | Fonction d'Humidité   |
| FM     | Fan Model   |
| FRX    | Fluorescence à Rayons-X                                       |
| GBM    | Generalized Bilinear Model                                    |
| IDW    | Inverse Distance Weighting                                    |
| LMM    | Linear Mixing Model   |
| MCM    | Mine Canadian Malartic  |
| MG     | Metagrauwacke   |
| MLM    | Multi-Linear mixing Model                                     |
| MP     | Monzodiorite Porphyrique                                      |
| MTR    | Modèle de Transfert Radiatif                                  |
| NASA   | National Aeronautics and Space Administration                 |
| NBRU   | Neighbor-Band Ratio Unmixing                                  |
| NIR    | Near Infrared   |
| PCR5   | Proportionnal Conflict Redistribution rule v. 5               |
| PNMM   | Polynomial Non-linear Mixing Model                            |
| ppb    | Part per billion  |
| RELAB  | Reflectance Experimant Laboratory                             |
| RMSE   | Root Mean Squared Error                                       |
| SGR    | Silicified Greywacke  |
| SPO    | Silicified Porphyry   |
| SWIR   | Short-Wave-Infrared   |
| USGS   | United States Geological Survey                               |
| V-NIR  | Visible-Near Infrared   |
| WV3    | Woldrview-3   |

## REMERCIEMENTS

---

Par où commencer ? Ces dernières lignes sont l'aboutissement de cinq longues années d'effort. Je suis passé par tous les stades psychologiques classiquement décrits dans le cheminement d'une thèse : de l'ambition au soulagement, en passant par la désillusion et la résignation. Tout ce qu'on dit sur les difficultés d'une thèse est vrai, heureusement pourtant, je crois encore que ça en vaut la peine. Je tiens donc d'abord à remercier ceux qui ont rendu cette thèse possible. Merci à mes superviseurs, Kalifa et Mickaël, et à mes co-encadrants Caroline-Emmanuelle Morisset, Benoit Plante et Jérôme Théau, pour m'avoir donné cette opportunité. Enfin, merci aussi au personnel de la Mine Canadian Malartic, et particulièrement à Christian Tessier, pour leur temps, leur aide, et leur disponibilité.

Ce travail n'est cependant pas le résultat de mes seuls efforts. C'est aussi la conclusion d'une multitude d'influences et d'encouragements qui ont peut-être commencé par un « N'aie jamais peur de poser des questions. » (Marc Siebels, 1993). Les personnes qui ont contribué à ce doctorat sont donc nombreuses. Je sais que je vais en oublier et j'espère qu'elles me pardonneront.

En premier bien sûr, je tiens à remercier ma femme Astrid pour son soutien et son infinie patience maintes fois éprouvée. Voilà deux ans maintenant que je te dis que j'ai bientôt fini, cette fois-ci c'est la bonne ! Je tiens également à remercier ma maman pour ses encouragements. Je sais que ces difficultés tu les as aussi un peu vécues. Merci aussi à ma sœur Delphine pour son inaliénable optimisme.

Une thèse c'est aussi de très nombreuses rencontres. Je tiens évidemment à remercier Etienne pour toutes ces conversations, pour tes critiques sans concession, et pour ton aide. Merci aussi à Jawad et Ghofrane, les problèmes sont plus faciles à vivre quand on les partage ! Merci aussi à mes collègues et amis qui ont rendu le quotidien au lab' plus facile : Juliette, Keyvan, (quel heumme !), JB, Aurélie, Yasmin, Rémi, Samar, Justine, Bastien, Camille, et tous ceux que j'oublie mais qui se reconnaîtront.

Enfin, je tiens à remercier mes amis en dehors de l'université, ceux qui ne parlent pas (ou plus) de carte et de satellite... Un grand merci à vous Anne, Anicet, Cristina, Javier et Thomas.





# Chapitre 1. INTRODUCTION

## 1.1 Contexte : activité minière et rôle de la télédétection

### 1.1.1 Activité minière au Canada et dans le monde : quelques chiffres

Notre vie quotidienne dépend d'objets manufacturés à partir de matières premières dont une partie importante est constituée de ressources minérales. L'augmentation de la population, l'accroissement économique rapide des pays émergents, et l'amélioration générale du niveau de vie de la population mondiale (World Bank, 2017) entraînent inévitablement un accroissement de la demande envers ces mêmes matières premières.

Bien que la proportion des matériaux recyclés issus d'objets de consommation soit en augmentation permanente (Hopewell *et al.*, 2009), celle-ci reste encore bien inférieure à celle issue de la production minière (Graedel *et al.*, 2011a, 2011b). Cette insuffisance de la filière du recyclage est notamment due à la demande toujours croissante en métaux ainsi qu'à la longue durée de vie des produits manufacturés dont ils sont les constituants (Figure 1.1; Graedel *et al.*, 2011a, 2011b).

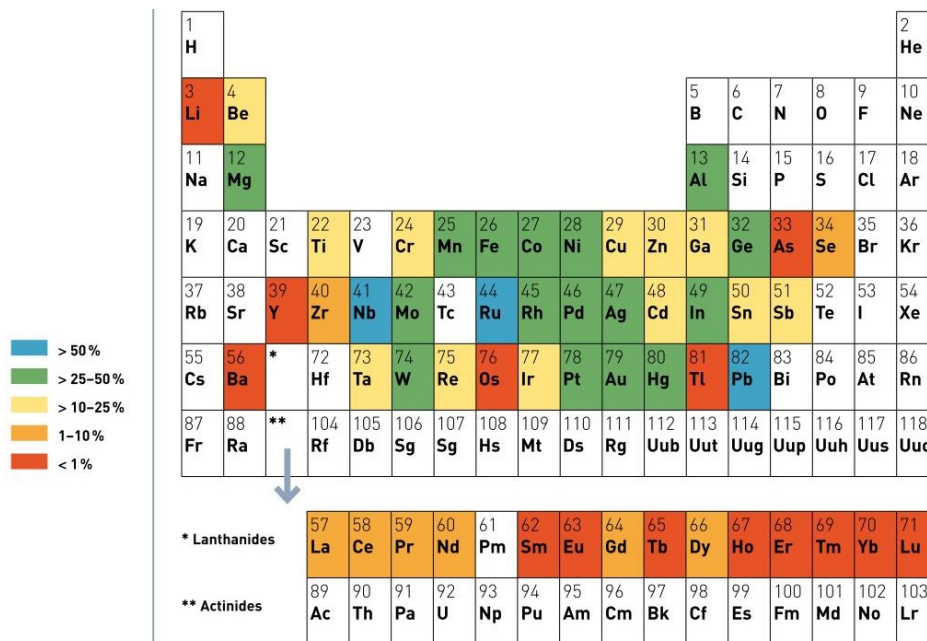


Figure 1.1 : Proportion moyenne de matière recyclée dans les produits manufacturés (Graedel *et al.*, 2011a).

La demande grandissante en matières premières entraîne donc un développement toujours plus important du secteur minier (Reichl *et al.*, 2017). Cette augmentation est clairement illustrée dans la Figure 1.2.

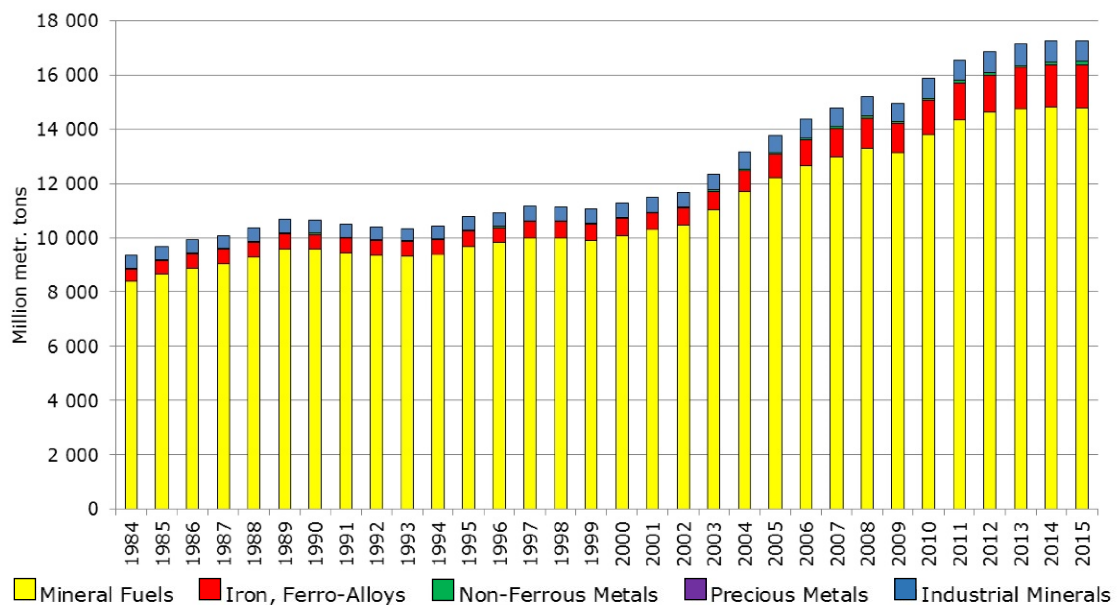


Figure 1.2 : Production minière mondiale de 1984 à 2015 (Reichl *et al.*, 2017).

Cette croissance continue implique cependant de découvrir de nouveaux gisements et de valoriser au mieux ceux actuellement exploités. Ainsi en 2018 au Canada, ce sont quelques 2 360 millions de dollars canadiens qui ont été dépensés en exploration minière et mise en valeur de gisements (Ressources Naturelles Canada, 2018a). En 2016, la vente de métaux et de non-métaux extraits du sol canadien s’est élevée à 23 302 millions et 17 734 millions de dollars, respectivement (Ressources Naturelles Canada, 2018b). Enfin, Ressources naturelles Canada a estimé à quelques 426 000 le nombre de personnes directement employées par le secteur minier en 2018 (Ressources Naturelles Canada, 2018c).

Ces faits montrent l’importance de l’activité minière dans l’économie du Canada et dans le reste du monde. La découverte de nouveaux gisements, leur caractérisation et leur exploitation sont cependant des processus particulièrement longs, complexes et coûteux.

### 1.1.2 La télédétection en exploration minière

Plusieurs phases exploratoires sont nécessaires pour établir l’existence d’un gisement et évaluer son exploitabilité. Les phases préliminaires commencent typiquement par la collecte et l’analyse d’échantillons, l’identification des principaux éléments structuraux de la géologie locale et régionale (plis, failles, etc.), la réalisation d’études géophysiques de surface (tomographie électrique, sismique, etc.) ou aéroportées

(magnétique, gravimétrique, etc.), le recensement de travaux d'exploration ou d'exploitations minières antérieurs, etc. (Gandhi et Sarkar, 2016).

L'imagerie aéroportée a été le premier outil de télédétection à faire partie intégrante de ce processus d'exploration. Ses principales utilisations sont la photo-interprétation et l'étude de la géomorphologie par stéréoscopie (Goetz *et al.*, 1983; Sabins, 1999).

Dans les années 1970 à 2000, l'avènement de l'imagerie satellitaire multispectrale civile a conduit au développement de nouveaux outils de cartographie plus sophistiqués (Marjoribanks, 2010; Sabins, 1999; Van Der Meer *et al.*, 2012). Les capteurs optiques multi- et hyperspectraux permettent en effet d'obtenir la réflectance des surfaces à différentes longueurs d'onde du spectre électromagnétique. La réflectance étant dépendante de la nature des minéraux (Clark, 1999), celle-ci donne une information directe sur la composition minéralogique des surfaces rocheuses. En outre, les plateformes satellitaires permettent d'acquérir des images couvrant de très grandes surfaces et ce même dans des régions difficiles d'accès. Ces capteurs sont donc une source d'information privilégiée dans le cadre d'études de cartographie géologique.

Les capteurs ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) et Landsat ont ainsi largement contribué au développement de méthodes de cartographie minéralogique et lithologique. Motivées pour leurs applications dans le secteur minier (Van Der Meer *et al.*, 2012), ces méthodes ont montré leur utilité pour cartographier les zones d'altération hydrothermale (Hosseinjani et Tangestani, 2011; Pour et Hashim, 2011; Pour *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2007), caractériser les résidus miniers (Farrand et Harsanyi, 1997; Ferrier, 1999; Zabcic *et al.*, 2014) et leurs conséquences environnementales (Fernández-Manso *et al.*, 2012; Kemper et Sommer, 2004; Richter *et al.*, 2008), ou encore cartographier les teneurs d'un gisement (Magendran et Sanjeevi, 2014). Il est à noter que l'imagerie radar a également montré son efficacité à faire ressortir des structures géologiques (Gandhi et Sarkar, 2016; Sabins, 1999).

Au début des années 1980, l'accès à des capteurs civils aéroportés hyperspectraux a stimulé le développement des méthodes cartographiques quantitatives (Van Der Meer *et al.*, 2012). Les méthodes de démixage spectral ont ainsi vu leur diversité et leurs

domaines d'application croître rapidement et sont encore aujourd'hui l'objet d'une recherche active. Dans la littérature scientifique actuelle, les applications de démixage au milieu minier pour la cartographie minéralogique se sont cependant presque exclusivement limitées à des échelles régionales dans des perspectives d'exploration.

En phase d'exploitation, la télédétection optique s'est essentiellement limitée à la photogrammétrie appliquée aux haldes, aux tas de minerais ou pour la cartographie des mines (Raeva *et al.*, 2016; Cryderman *et al.* 2014). Les études de démixage et de classification minérale ou lithologiques se sont par ailleurs focalisées sur les fronts d'exploitation et les déchets miniers (Zabcic *et al.*, 2014; Murphy et Monteiro, 2013; Boubanga-Tombet *et al.*, 2014; Mielke *et al.*, 2014).

### **1.1.3 Méthodes conventionnelles de caractérisation en phase d'exploitation**

L'exploitation d'un gisement nécessite une compréhension avancée de la géologie locale et régionale ainsi que des processus de mise en place de sa minéralisation. Elle s'appuie pour cela sur un flux continu d'échantillons collectés sur toute la durée de vie de la mine. La densité et les protocoles d'échantillonnage doivent garantir une bonne représentativité des volumes à caractériser et éviter les biais. Parmi les échantillons les plus couramment collectés en opération minière, on peut citer (Gandhi et Sarkar, 2016) :

- Les échantillons collectés le long de tranchées;
- Les échantillons en vrac, collectés sur des tas, des haldes ou des roches dynamitées;
- Les échantillons de rejets miniers;
- Les échantillons collectés sur les bandes transporteuses;
- Les échantillons de carottes de forage d'exploration et de développement;
- Les échantillons des rejets de forage, que ce soit sous forme de boues ou de matériaux solides.

Dépendant de la taille et de la complexité du gisement, plusieurs milliers d'échantillons et plusieurs centaines de kilomètres de forage sont ainsi classiquement nécessaires pour le caractériser (Rossi et Deutsch, 2013).

## 1.2 Problématique

Un large éventail de techniques est disponible aux compagnies minières pour analyser chimiquement ces échantillons. Le choix de la technique va essentiellement dépendre de la précision souhaitée, des éléments à quantifier, du coût, de la vitesse d'analyse et, bien entendu, de la disponibilité des installations nécessaires (Potts, 1992). La plupart de ces pratiques sont cependant lentes, coûteuses, destructives, et nécessitent d'avoir accès aux surfaces à échantillonner de façon sécuritaire ou d'effectuer des forages. En outre, ces analyses sont réalisées sur des échantillons ponctuels, posant inévitablement la question de leur représentativité (Abzalov, 2016; Rossi et Deutsch, 2013).

La composition minéralogique des roches est, avec la teneur, la géochimie, et la texture, un des plus importants paramètres à identifier dans l'exploitation d'un gisement. Une bonne connaissance de la nature et des proportions des minéraux permet en effet d'anticiper le comportement de la roche au dynamitage mais également d'adapter son traitement (broyage, flottation, lixiviation, etc.) (Rossi et Deutsch, 2013).

Le démixage spectral offre des avantages séduisants au regard des inconvénients des méthodes de caractérisation conventionnelles. Tout d'abord, les spectres de réflectance renseignent directement sur la nature et les proportions des minéraux. Ensuite, les capteurs imageurs fournissent des informations sur toute la scène observée, de façon quasi instantanée, et à faible coût.

Le démixage et les méthodes issues de la télédétection restent malgré tout anecdotiques en phase d'exploitation. L'apparition du démixage en exploitation minière s'est faite non pas comme outil de cartographie par télédétection mais pour le *log* de carottes de forage (Feng *et al.*, 2011; Kruse, 1996; Taylor, 2000). Ces outils parcourent les sections des carottes en mesurant la réflectance de leur surface. Des algorithmes de démixage et de cartographie minéralogique fournissent ensuite des résultats qui apportent des renseignements sur la minéralogie, la lithologie, le degré de minéralisation, etc. Un exemple de log par démixage est présenté dans la Figure 1.3 :

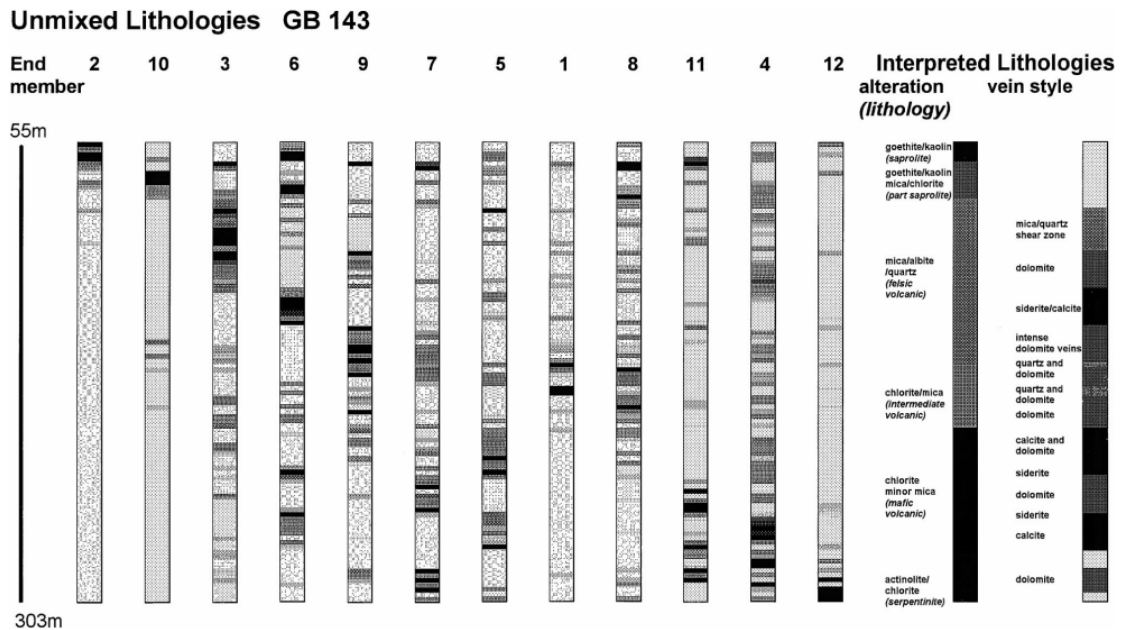


Figure 1.3 : Cartographie lithologique par démixage de pulpes de forage. Les différents gris représentent les proportions estimées de chaque *endmember* lithologique (barres verticales). Une lithologie est d'autant plus sombre que sa présence est importante. Les deux sections de droite illustrent un résultat de classification d'après le démixage. Extrait de Taylor (2000).

### 1.3 Objectifs et Hypothèses

Les enjeux économiques et sociétaux considérables liés à l'exploitation des ressources minérales en font un secteur d'activité clé au Canada et dans le reste du monde. Ce secteur est tributaire de la découverte et de la valorisation de gisements qui elles même dépendent des données et donc des techniques disponibles.

La mine Canadian Malartic correspond typiquement au cas de figure présenté précédemment. Mine à ciel ouvert située en Abitibi, à l'ouest du Québec, la compagnie gère l'extraction d'un gisement d'or d'après les analyses d'un flux tendu d'échantillons.

L'objectif principal de la thèse est d'améliorer la caractérisation des roches des mines en phase d'exploitation à l'aide de méthodes d'analyse de données satellites ou aéroportées. La combinaison des données géochimiques conventionnelles avec ces données a ainsi pour vocation d'aboutir à une caractérisation lithologique en surface supérieure à celle obtenue par la seule géochimie.

Cet objectif principal comprend deux composantes distinctes :

- 1) Réaliser un démixage spectral permettant d'obtenir une information fiable de la distribution spatiale des minéraux dans un contexte de mine à ciel ouvert.
- 2) Développer une méthode de combinaison intégrant les informations tirées des données géochimiques avec celles issues des analyses des données de télédétection.

L'hypothèse émise dans ce travail est que le démixage de mesures spectrales acquises par télédétection apportera une information complémentaire aux données géochimiques. À cette hypothèse s'ajoute celle que les deux sources d'information pourront être fusionnées efficacement, en tenant compte de leurs avantages et inconvénients respectifs.

#### **1.4 Organisation de la thèse**

Ce premier chapitre introductif a dressé un portrait général de la situation de la télédétection en milieu minier. Le chapitre qui suit présente un état de l'art des méthodes de démixage existantes, de leur fondement théorique, et des difficultés classiquement rencontrées dans leur application. Le troisième chapitre présente le cadre expérimental avec la mise en place d'une structure méthodologique et détaille les données utilisées ainsi que leur prétraitement. C'est également dans ce chapitre que le site d'étude – la *Mine Canadian Malartic* – est décrit en détail. La thèse se poursuit dans un quatrième chapitre avec la présentation et l'analyse des résultats. Les discussions et critiques de ces résultats sont faites dans le chapitre 5. Enfin, un sixième chapitre termine cette thèse avec les conclusions tirées ainsi que les perspectives d'amélioration et d'application.

## **Chapitre 2. CADRE THÉORIQUE – LE DÉMIXAGE SPECTRAL ET LA FUSION DE DONNÉES**

### **2.1 Démixage spectral : de la réflectance à la minéralogie**

#### **2.1.1 Spectroscopie des minéraux**

Les capteurs optiques multi- et hyperspectraux mesurent l'intensité du rayonnement électromagnétique incident dans différents intervalles de longueurs d'onde, ou bandes spectrales. Lorsque l'intensité de la lumière mesurée est rapportée sur l'intensité de la lumière incidente, la quantité obtenue est la réflectance de la surface observée pour la bande spectrale donnée. À noter que les surfaces émettent également un rayonnement. Ce rayonnement est cependant négligeable pour les températures observées ici dans les longueurs d'onde couvertes par les capteurs utilisés.

Les spectromètres sont sensibles aux liaisons chimiques des matériaux, que ce soit sous forme solide, liquide ou gazeuse. En outre, ils sont sensibles aux matériaux tant amorphes que cristallins, ce qui n'est pas le cas d'autres méthodes de caractérisation comme la diffraction à rayons-X (DRX) (Clark, 1999; Hunt, 1977).

Les signatures spectrales sont donc le résultat d'interactions des ondes électromagnétiques avec la matière. Ces interactions dépendent des longueurs d'onde incidentes et des niveaux d'énergie des matériaux rencontrés (Clark, 1999; Elachi et Van Zyl, 2006).

Deux phénomènes principaux sont à l'origine des caractéristiques spectrales généralement observées en spectroscopie des minéraux (Clark, 1999; Elachi et Van Zyl, 2006). Le premier est vibrationnel. Les vibrations entre les atomes d'une molécule sont fonction du nombre d'atomes, de leur nature, de la géométrie moléculaire et des forces de liaison (Clark, 1999; Elachi et Van Zyl, 2006). Des exemples de caractéristiques spectrales dues à ce type de phénomène sont les bandes d'absorption dans l'infrarouge liées aux vibrations d'étirement des liaisons OH. Les liaisons Al-OH et Mg-OH ont ainsi des longueurs d'onde dans les infrarouges à ondes courtes (SWIR), autour de 2,2 - 2,3  $\mu\text{m}$  (Clark, 1999; Elachi et Van Zyl, 2006). Cette caractéristique spectrale est illustrée dans la Figure 2.1 par un spectre de kaolinite.



Les carbonates ont également des bandes d'absorption fondamentales caractéristiques des liaisons  $\text{CO}_3$  dans l'infrarouge thermique entre 7 et 14  $\mu\text{m}$ . On peut également trouver des harmoniques et combinaisons des bandes d'absorption des carbonates entre 1,8 et 2,5  $\mu\text{m}$  (Clark, 1999). Ces longueurs d'onde sont donc particulièrement utiles pour la détection de lithologies silicatées et carbonatées (Clark, 1999; Elachi et Van Zyl, 2006).

Un exemple de spectre de calcite est également illustré dans la Figure 2.1. Le deuxième type de phénomène à l'origine de l'essentiel des caractéristiques spectrales observées est le transfert de charge. Dans de nombreuses situations, les paires d'électrons d'une orbitale ne sont pas limitées à une liaison atomique mais peuvent se déplacer sur des distances plus grandes. L'absorption de photons entraîne le déplacement d'électrons entre ions ou entre ions et liaisons. Le phénomène peut être observé entre les deux ions d'un même métal à des valences différentes, tel que le  $\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{Fe}^{3+}$ . Ces phénomènes ont typiquement lieu dans les longueurs d'onde de l'ultraviolet au proche infrarouge en passant par le visible (voir Figure 2.1). Ils sont ainsi à l'origine de la couleur rouge des oxydes et hydroxydes de fer (Clark, 1999; Elachi et Van Zyl, 2006).

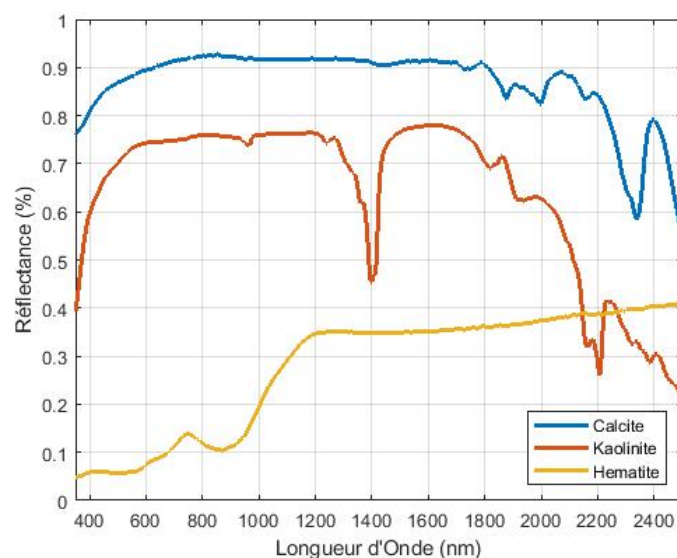


Figure 2.1 : Exemple de spectres de réflectance de minéraux. La calcite (bleu) montre nettement des pics d'absorption entre 1800 nm et 2400 nm liés aux liaisons  $\text{CO}_3$ . La kaolinite (rouge) affiche deux bandes d'absorption autour de 1400 et 2200 nm liées aux liaisons OH. Enfin, l'hématite (jaune) montre une large bande d'absorption en début de spectre avec un pic de réflectance autour de 750 nm. C'est ce pic qui est à l'origine de la couleur rouge de l'hématite.

Les capteurs optiques sont donc sensibles à des caractéristiques spectrales propres à identifier les minéraux et les capteurs imageurs peuvent renseigner sur leur distribution spatiale.

### 2.1.2 Le démixage spectral

Lorsque plusieurs matériaux sont présents, le spectre mesuré devient un mélange de leurs caractéristiques spectrales. C'est de ce problème de *mixels* (pour *mixed pixels*) qu'est venue la nécessité de développer des méthodes d'identification et de quantification.

Le démixage spectral vise à retrouver les abondances (ou *proportions*, ou *fractions surfaciques*) des matériaux constitutifs de la surface observée. Les méthodes de démixage se basent sur des modèles de mélange spectral pour identifier et/ou quantifier les matériaux observés par le capteur. Un modèle permet donc, théoriquement, de reconstruire un spectre à partir des signatures spectrales de référence des matériaux présents (appelées *endmembers*) et de leur abondance. En fonction du modèle, d'autres paramètres peuvent également être nécessaires. À noter que dans la littérature, le terme *endmember* peut désigner sans distinction le matériau et sa signature spectrale.

#### A. Résolution du problème de démixage

“*Démixer*” un spectre consiste à inverser le modèle de mélange spectral pour retrouver les abondances des matériaux. Les algorithmes cherchent généralement à reconstruire un spectre mesuré à partir des spectres des *endmembers*. Le problème est donc de minimiser la différence (ou maximiser la similitude) entre le spectre mesuré et le spectre reconstruit. Cette différence est classiquement exprimée en distance euclidienne ou en racine carrée de la moyenne des écarts au carré (RMSE).

À noter que d'autres critères de similitude, notamment basés sur la forme, ont été proposés. Ceux-ci ont montré une plus grande robustesse face à l'importante variabilité constatée des *endmembers* dans des scènes naturelles (Chen *et al.*, 2009a; Somers *et al.*, 2011; Somers, Delalieux, *et al.*, 2009; Tits *et al.*, 2012).

La fonction exprimant l'écart  $d$  entre les spectres mesurés et modélisés est donc la *fonction coût* que l'on cherche à minimiser. Le problème peut être résumé par :

$$\min d(s, \gamma) = G(a, s, \gamma) \quad (1)$$

Où  $G$  est la *fonction coût* dépendant des abondances  $a$ , du spectre mesuré  $s$ , et d'éventuels hyperparamètres  $\gamma$  du modèle.

Le problème peut être résolu par des méthodes de minimisation avec contraintes comme la programmation quadratique séquentielle (PQS) (Bazaraa *et al.*, 2013). Le principe de la PQS est de résoudre une succession de sous-problèmes où la solution de chaque séquence amène au sous-problème suivant, convergeant vers un minimum. La PQS permet de résoudre des problèmes non linéaires (avec des contraintes d'inégalité et d'égalité) (Bazaraa *et al.*, 2013) et est largement utilisée en démixage (Chen *et al.*, 2009a; Heylen et Scheunders, 2016).

## **B. Problème de variabilité spectrale**

Les méthodes de démixage doivent cependant respecter deux conditions pour atteindre un résultat optimum :

1. Les *endmembers* doivent être représentatifs des matériaux observés dans la scène par le capteur.
2. Le modèle de mélange spectral utilisé doit reproduire adéquatement le comportement spectral des matériaux en fonction de leur abondance.

Cependant, du fait de contraintes pratiques, ces deux conditions ne sont que très rarement respectées dans le cadre de démixage en télédétection; des approximations sont faites avec, comme conséquence, une dégradation des performances.

Classiquement, les *endmembers* sont tirés d'une bibliothèque spectrale, directement extraits de l'image traitée via un algorithme d'extraction de *endmembers* (AEE), ou collectés préalablement durant une campagne de terrain. Chacune de ces stratégies a ses avantages et inconvénients :

- 1) Les bibliothèques spectrales, comme celle de l'USGS *splib07* (Kokaly *et al.*, 2017) ou la bibliothèque *ECOSTRESS* (Meerdink *et al.*, s.d.), permettent d'accéder facilement à un grand nombre de spectres de référence. Souvent mesurées en laboratoire, l'environnement contrôlé et les outils d'analyse

permettent d'avoir une excellente connaissance des spectres mesurés et de la composition des échantillons. Leur inconvénient majeur est que les propriétés physico-chimiques des échantillons ne sont pas représentatives des matériaux observés dans la scène à traiter. De plus, les conditions d'illumination et les caractéristiques des capteurs utilisés pour constituer la bibliothèque et pour acquérir l'image sont également différentes.

- 2) Les AEE extraient les *endmembers* directement de l'image à démixer. Ceux-ci sont donc acquis avec le même capteur et dans les mêmes conditions d'illumination que la scène observée. Cependant, ces algorithmes s'appuient généralement sur des suppositions importantes. Une large catégorie d'AEE se base par exemple sur l'hypothèse qu'il existe au moins un pixel couvrant exclusivement chaque matériau de la scène (Du *et al.*, 2008; Plaza *et al.*, 2004, 2012). Une autre hypothèse forte fréquemment invoquée est que les spectres de ces matériaux se mélangent de façon linéaire, proportionnellement à leur abondance (Du *et al.*, 2008; Plaza *et al.*, 2004, 2012). Sans échantillonnage *in situ*, une difficulté majeure des AEE est également de devoir identifier les matériaux correspondants aux spectres extraits.
- 3) Enfin, le travail de terrain permet de directement échantillonner les matériaux présents dans la scène. Les analyses en laboratoire fournissent une caractérisation détaillée des matériaux collectés et les conditions de laboratoire permettent d'acquérir des spectres dans un environnement contrôlé. Cependant, cette méthode comprend encore une fois plusieurs inconvénients. Elle est coûteuse en temps et financièrement; elle implique d'avoir accès au site d'étude, les spectres ne sont pas acquis dans les mêmes conditions que l'image.

Ces trois stratégies sont des façons différentes de composer avec la question de la représentativité des *endmembers* et de leur variabilité.

La variabilité des *endmembers* est en effet une des principales causes de dégradation des performances des méthodes de démixage (Somers *et al.*, 2011). Ainsi, dans le cas du démixage d'essences d'arbres, les variations d'illumination entraînent une variabilité intraclasse supérieure à la variabilité interclasse (Somers *et al.*, 2011).

Dans le cas de minéraux, pour des surfaces particulières, un facteur majeur de variabilité est l'élévation des spectres avec la réduction de la taille des particules. Cette relation est non linéaire et dépend aussi bien du minéral que de la longueur d'onde considérée (Adams et Filice, 1967; Hapke, 1981, 2012; Hunt, 1977; Yon et Pieters, 1988).

### C. Le choix du modèle de mélange spectral

En plus de composer avec le problème de variabilité, le modèle doit reproduire adéquatement la contribution spectrale des matériaux en fonction de leur abondance. La plupart des approches de démixage se basent sur le modèle de mélange linéaire (LMM). L'hypothèse à l'origine du LMM est que la contribution spectrale des matériaux est linéairement proportionnelle à leur abondance. Cette relation peut être résumée par l'équation (2) :

$$y_i = \sum_{r=1}^N (a_r * e_{r,i}) + \eta \quad (2)$$

Où  $y_i$  est la  $i^{\text{ème}}$  bande spectrale du spectre de réflectance modélisé  $y$ ,  $i$  allant de 1 au nombre total de bandes  $B$ ;  $N$  est le nombre de *endmembers* impliqués dans le modèle;  $e_r$  correspond au  $r^{\text{ème}}$  *endmember* (spectre de réflectance de référence),  $r$  allant de un à  $N$ ;  $a_r$  est l'abondance associée à  $e_r$ . Enfin, le paramètre  $\eta$  inclut le bruit et l'erreur du modèle. Pour être pleinement interprétable physiquement, le LMM doit respecter deux contraintes : des abondances positives (ANC, pour *abundance nonnegativity constraint*) et une somme des abondances égale à 1 (ASC, pour *abundance sum-to-one constraint*).

$$\begin{cases} a_r \geq 0 \forall r \\ \sum_{r=1}^N a_r = 1 \end{cases} \quad (3)$$

L'hypothèse de linéarité est valide lorsque le rayonnement incident interagit avec un seul matériau avant d'atteindre le capteur (Keshava et Mustard, 2002; Singer et McCord, 1979). La partie réfléchi du rayonnement transporte alors l'information des fractions de surface vers le capteur. Simple et intuitif, ce modèle a mené au

développement de beaucoup de variantes en démixage (Drumetz *et al.*, 2016; Xu et Shi, 2017; Zhong *et al.*, 2016).

Cependant, lorsque le rayonnement incident interagit avec plusieurs matériaux, la relation entre abondances et contributions spectrales devient non linéaire (Hapke, 2012; Mustard *et al.*, 1998; Nash et Conel, 1974). Ces diffusions multiples sont rencontrées dans de nombreux contextes comme les milieux forestiers ou en agriculture (Chakravorty et Sinha, 2016; Fan *et al.*, 2009; Nascimento et Bioucas-Dias, 2009; Ray et Murray, 1996; Wang *et al.*, 2016), en milieu urbain (Marinoni et Gamba, 2016; Mitraka *et al.*, 2016; Pu *et al.*, 2008; Voorde *et al.*, 2009), dans les déserts et régolithes planétaires (Lin et Zhang, 2017; Mustard et Pieters, 1987a; Rommel *et al.*, 2017), etc. Ces derniers forment des surfaces particulières dans lesquelles l'échelle du mélange est plus petite que la longueur du chemin moyen parcouru par les photons (Hapke, 1981, 2012). Ces mélanges dits *intimes* sont à l'origine d'un comportement spectral complexe non linéaire. Celui-ci dépend de nombreux facteurs comme la taille, la taille relative et la forme des particules (Adams et Filice, 1967; Hapke et Hoen, 1963; T. Hiroi et Pieters, 1994; Moroz et Arnold, 1999; Nash et Conel, 1974; Poulet et Erard, 2004; Yon et Pieters, 1988), le tassement du matériau (Adams et Filice, 1967; Hapke et Hoen, 1963), l'angle d'illumination (Hapke, 1981; Yon et Pieters, 1988), etc.

Un modèle de transfert radiatif (MTR) a été proposé par Bruce Hapke (Hapke, 1981, 2012) pour traduire le comportement spectral des minéraux dans le cadre de ces mélanges intimes. L'inversion du modèle de Hapke, pour des minéraux silicatés communs et avec des tailles de grains connus, a montré des erreurs d'estimation d'abondance inférieures à 10 % (Mustard et Pieters, 1987b, 1989). Bien que des approximations raisonnables soient possibles (Hapke, 1981, 2012) certains paramètres du modèle ne sont accessibles qu'en laboratoire, rendant ainsi l'inversion du modèle difficile dans le cadre d'étude par télédétection.

En conséquence, l'inaptitude du modèle linéaire à capturer les abondances de mélanges de minéraux et les difficultés à inverser les MTR ont conduit au développement de nombreux modèles non linéaires. Plusieurs de ces approches considèrent le phénomène de diffusion multiple comme une série de combinaisons linéaires. Alors que les modèles bilinéaires ne considèrent que les deux premières interactions comme spectralement

significatives, d'autres intègrent davantage d'interactions (Dobigeon *et al.*, 2014; Heylen *et al.*, 2014).

Les modèles bilinéaires additionnent deux mélanges linéaires pour intégrer les interactions de premier et de deuxième ordre dans le spectre reconstruit. Plusieurs modèles ont été proposés au cours de la dernière décennie : le modèle de Nascimento et Bioucas-Dias (Nascimento et Bioucas-Dias, 2009); le modèle de Wenyi Fan et coauteurs (Fan *et al.*, 2009); le *Generalized Bilinear Model* (GBM) (Halimi *et al.*, 2011); le *Linear Quadratic Model* (LQM) (Meganem *et al.*, 2013); le *partitionning Nonlinear Spectral Mixture Model* (pNSMM) (Somers, Cools, *et al.*, 2009); ou encore le *PostNonlinear Mixing Model* (PPNMM) (Altmann *et al.*, 2012).

Le modèle PPNMM additionne au LMM un second LMM transformé par une fonction polynomiale de second degré. Ses possibilités de modélisation incluent celles du LMM, du FM, du LQM et du GBM. Les interactions d'ordre supérieur ont été considérées comme négligeables par les auteurs ou difficilement séparables du bruit. Un unique paramètre ( $\beta$ ) quantifie l'influence des interactions de second ordre :

$$y_i = \sum_{r=1}^N a_r * e_{r,i} + \beta \left[ \sum_{r=1}^N (a_r * e_{r,i}) \right] \odot \left[ \sum_{r=1}^N (a_r * e_{r,i}) \right] + \eta \quad (4)$$

Où  $y_i$  est la  $i^{\text{ème}}$  valeur de réflectance du spectre reconstruit  $y$ .  $N$  est le nombre de *endmembers* considérés. Les paramètres  $a_r$  et  $e_r$  correspondent à l'abondance et au spectre du  $r^{\text{ième}}$  *endmember*.  $\beta$  est un scalaire quantifiant la contribution du produit des valeurs deux à deux (produit d'Hadamard,  $\odot$ ) des *endmembers*. Enfin,  $\eta$  exprime le bruit et l'erreur de reconstruction du spectre.

Les auteurs du PPNMM (Altmann *et al.*, 2012), ont comparé les performances de leur modèle avec celles du LMM, du FM, et du GBM sur des données synthétiques générées par ces mêmes modèles. Dans ces données simulées, les abondances et hyperparamètres ont été définis aléatoirement. Alors que chaque modèle montre de bons résultats dans le démixage des spectres qu'il a lui-même généré, le PPNMM a également montré une plus grande aptitude à démixer les spectres produits par les autres modèles.

Le *Multilinear Mixing Model* (MLM) (Heylen et Scheunders, 2015) ne se limite pas aux interactions de premier et deuxième ordres mais additionne une infinité d'interactions linéaires. Le MLM se base sur un raisonnement probabiliste d'interactions qui sont fonction des abondances des *endmembers*.

$$y_i = \frac{(1 - P) \sum_{r=1}^N a_r w_{r,i}}{1 - P \sum_{r=1}^N a_r * w_{r,i}} + \eta \quad (5)$$

Où  $w_i$  est l'albédo du  $i^{\text{ème}}$  matériau et  $P$  est la probabilité qu'un rayon incident subisse une nouvelle interaction.  $P$  exprime donc le degré de non-linéarité du modèle. Lorsque  $P$  vaut zéro, le modèle se réduit au LMM. Bien que ce paramètre n'ait de sens physique qu'entre 0 et 1, les auteurs l'ont laissé libre dans les processus d'inversion :

$$\begin{cases} a_r \geq 0 \forall r \\ \sum_{r=1}^N a_r = 1 \end{cases} \quad (6)$$

Pour le démixage de l'image AVIRIS de Cuprite, Heylen et Scheunders (2016) ont utilisé un AEE pour identifier les *endmembers* et ont appliqué le modèle tel que décrit par l'équation (6).

Pour les cas de mélanges particulières intimes, les auteurs ont inclus dans leur modèle une transformation du *endmember* en albédo. Cette transformation dépend uniquement du paramètre  $P$ . Le MLM devient dès lors :

$$y_i = \frac{(1 - P) \sum_{r=1}^N \frac{a_r e_{r,i}}{P e_{r,i} + 1 - P}}{1 - P \sum_{r=1}^N \frac{a_r e_{r,i}}{P * e_{r,i} + 1 - P}} + \eta \quad (7)$$

Dans les comparaisons avec le LMM, le GBM et le PPNMM, le MLM a montré de meilleures performances en estimations d'abondances d'un mélange binaire quartz-alunite. Un important écart avec les abondances réelles subsistait cependant.

Alors que les modèles précédents se basent sur des approches conceptuelles du phénomène de réflexion multiple, d'autres méthodes s'appuient sur des théories et grandeurs physiques. Le prochain modèle envisagé dans cette thèse est une



simplification du MTR de Hapke (Hapke, 2012). Le modèle, dans sa version complète, requiert de connaître la taille des grains, leur coefficient de diffusion interne, leur indice optique (parties réelle et imaginaire), etc. Cependant, plusieurs simplifications peuvent être faites lorsque les *endmembers* exacts sont connus et qu'ils sont directement utilisés pour produire les mélanges. Dans une telle situation, seuls les *endmembers* et les angles de mesures et d'illumination sont donc nécessaires.

Cette version simplifiée se réduit à un démixage linéaire des spectres d'albédo de simple diffusion (SSA). La transformation des spectres de réflectance en SSA linéarise la relation entre abondance et influence spectrale. Elle peut être résumée par l'équation (Mustard et Pieters, 1987b) :

$$y(i, e) = \frac{w}{4(\mu + \mu_o)} [H(\mu)H(\mu_o)] \quad (8)$$

Où  $\mu_o = \cos(i)$ ,  $i$  étant l'angle de radiation incidente,  $\mu = \sin(e)$ ,  $e$  étant l'angle de réflexion et  $w$  est le SSA moyen du matériau particulière. Enfin,  $H$  est l'approximation de Hapke des équations de Chandrasekhar (Chandrasekhar, 1960) décrivant la diffusion multiple entre des particules :

$$H(\mu) = \frac{(1 + 2\mu)}{(1 + 2\mu\gamma)} \quad (9)$$

Avec  $\gamma = (1-w)^{1/2}$ .

Le modèle simplifié de Hapke est probablement la version la plus couramment utilisée. Il a été validé sur des mélanges de laboratoire (Hiroi et Pieters, 1994; Mustard et Pieters, 1987b, 1989) avec des erreurs d'estimation d'abondances inférieures à 10 %.

En 1999, Yuriy Shkuratov a présenté un MTR optique géométrique de spectres d'albédo pour les surfaces particulières (Shkuratov *et al.*, 1999). Le modèle de Shkuratov propose de reconstruire les spectres de réflectance (appelés « albédo »,  $A$  dans son article) par une fonction de l'indice de réfraction (parties réelle  $n$  et imaginaire  $k$ ), de la longueur moyenne du chemin du rayonnement au sein du matériau  $S$ , et de la fraction volumique occupée par les particules  $q$  :  $A(n, k, S, q)$ . Les différentes équations du modèle de Shkuratov ne sont pas détaillées ici.

### 2.1.3 Composer avec la question de l'humidité

La teneur en eau est un paramètre majeur dans les sciences des sols pour son rôle fondamental en agriculture et en environnement. L'eau est présente dans les sols et les surfaces rocheuses sous trois formes : sous forme d'eau libre dans les pores, sous forme hygroscopique (ou adsorbée) et dans les structures cristallines des minéraux (Ben-Dor *et al.*, 2002; Hunt, 1977).

Deux effets spectraux sont généralement symptomatiques de sa présence :

- 1) Un abaissement général et systématique des réflectances avec l'augmentation des teneurs en eau (Whalley *et al.*, 1991).
- 2) La présence de bandes d'absorption autour de 1,875, 1,454, 1,38, 1,135, et 0,942  $\mu\text{m}$ . Les deux premières sont systématiquement observées en présence d'humidité (Hunt, 1977). À noter que la profondeur des bandes d'absorption n'est pas linéairement dépendante de la teneur en eau (Knadel *et al.*, 2014).

L'influence de l'humidité sur les spectres de réflectance est à l'origine de plusieurs publications visant à estimer la teneur en eau des sols à partir de spectres de réflectance (Bach et Mauser, 1994; Lobell et Asner, 2002; Weidong *et al.*, 2002). Classiquement, les techniques de cartographie par télédétection sont testées dans des régions arides ou semi-arides (Hosseinjani et Tangestani, 2011; Hubbard et Crowley, 2005; Pour et Hashim, 2011; Pour *et al.*, 2011; Rowan *et al.*, 2005, 2006). Ces régions ont les avantages majeurs d'une faible végétation, d'une présence humaine moindre, et d'une absence ou *quasi*-absence d'humidité de surface. La question de l'humidité en cartographie par télédétection n'est donc que rarement évoquée. Ne pas en tenir compte engendre pourtant des écarts importants par rapport aux performances optimales (Farifteh *et al.*, 2007; Vicente et Souza Filho, 2011; Wijewardane *et al.*, 2016). Lorsqu'elle est prise en compte, la stratégie généralement utilisée est d'ajouter des *endmembers* représentatifs des surfaces humides observées (Asner et Lobell, 2000; Galvão *et al.*, 2001).

Dans l'article de Lobell et Asner (2002), les auteurs calibrent empiriquement une relation exponentielle reliant la profondeur des pics d'absorption avec la teneur volumique en eau de quatre échantillons de sols. Les comparaisons entre les spectres

modélisés et les mesures ont montré qu'une relation exponentielle traduit adéquatement l'évolution de la réflectance des bandes d'absorption avec les teneurs en eau. Afin d'intégrer l'influence de l'humidité lors du démixage, une équation similaire peut donc potentiellement être intégrée au processus de reconstruction du spectre mesuré.

## 2.2 Fusion de plusieurs sources de données

Les méthodes géochimiques conventionnelles de caractérisation et les méthodes de démixage ont des avantages et des inconvénients différents. Pour exploiter au mieux leur complémentarité, il est nécessaire de combiner leurs informations de telle sorte que leurs imprécisions, leurs incertitudes et leurs incomplétudes soient prises en compte. Plusieurs méthodes existent pour fusionner les informations issues de jeux de données de natures différentes.

- L'approche probabiliste bayésienne modélise les informations par des distributions de probabilités définies le plus souvent via les statistiques des données (Bloch *et al.*, 2003). Cette méthode a cependant l'inconvénient qu'elle ne donne pas ou difficilement la possibilité d'exprimer l'imprécision. De plus, elle exige des contraintes très strictes sur les mesures et les classes. Elle peut également entraîner des incohérences du fait des dépendances complexes pouvant exister entre les jeux de données (Bloch et Maitre, 1994).
- La théorie des ensembles flous (Klir et Yuan, 1995) offre l'avantage de ne pas imposer de contraintes et une plus grande liberté de modélisation. Cette grande souplesse peut cependant être un inconvénient puisqu'elle laisse l'utilisateur démuni pour définir les fonctions. De plus, à l'inverse de l'approche probabiliste, les ensembles flous représentent efficacement l'imprécision, mais l'incertitude, elle, n'est représentée que de manière implicite (Bloch et Maitre, 1994).
- La théorie des croyances (ou théorie de Dempster-Shafer; DST) permet de représenter à la fois l'imprécision et l'incertitude à l'aide de fonctions (Dempster, 1968a; Shafer, 1976a). Celles-ci sont définies sur l'ensemble du cadre de discernement (toutes les classes ou hypothèses envisagées) ainsi que sur les hypothèses composées issues de leurs unions (Dempster, 1968a; Shafer, 1976a). Cette possibilité d'affecter une masse aux hypothèses composées permet une modélisation plus souple et plus riche, particulièrement dans le cas

d'ambiguïtés entre plusieurs classes. Elle fournit également une mesure explicite de l'ignorance que l'on a sur une hypothèse ainsi qu'un formalisme mathématique pour exprimer le conflit entre les sources (Bloch et Maitre, 1994). Une extension de la DST a également été proposée par Jean Dezert et Florentin Smarandache (Dezert, 2002; Smarandache et Dezert, 2004) pour répondre aux limitations et incohérences de cette dernière, particulièrement lorsque les sources fusionnées sont fortement conflictuelles.

De nombreuses recherches ont ainsi validé l'utilisation de DST dans le cadre d'études géologiques. À titre d'indication, on peut notamment citer la cartographie pour la prospection minière (Carranza et Hale, 2003; Carranza *et al.*, 2008; Carranza, 2011, 2015; He *et al.*, 2011; Likkason *et al.*, 1997; Liu *et al.*, 2015; Tangestani et Moore, 2002), en risques de glissements de terrain (Althuwaynee *et al.*, 2012; Feizizadeh *et al.*, 2014; Jebur *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2013; Park, 2011), en surveillance de l'occupation des sols (Du *et al.*, 2011; Ran *et al.*, 2012), pour la prédiction des eaux souterraines (Mogaji *et al.*, 2015; Nampak *et al.*, 2014), etc. La théorie des croyances offre donc un cadre propice à la combinaison des données géochimiques conventionnelles avec celles issues de la télédétection.

### **2.2.1 La théorie des croyances**

Les fonctions de croyance ont été proposées par Shafer (1976) pour quantifier le degré de certitude qu'un jeu de données exprime envers une hypothèse. Elle est particulièrement appropriée en cas de conflits entre deux sources et lorsque l'absence de données ne permet pas l'utilisation de méthodes probabilistes (Smets, 1999).

Au contraire des méthodes bayésiennes qui n'intègrent que la notion d'incertitude, la théorie évidentielle permet de tenir compte d'autres sources d'imperfection. Elle permet en effet d'exprimer également l'imprécision, l'ignorance et le conflit (Bloch *et al.*, 2003). La théorie appelée Théorie de Dempster-Shafer (DST) est un modèle qui associe à cette conceptualisation de G. Shafer les règles de conditionnement et de combinaison de Dempster. Ces règles sont équivalentes aux règles de conditionnement et d'agrégation de Bayes (Dempster, 1968b; Shafer, 1976a).

Cependant, les contraintes imposées par la DST pour la formalisation des croyances et des hypothèses peuvent être difficiles à appliquer dans certaines situations (Dezert et Smarandache, 2004, 2009; Dezert et Tchamova, 2011; Dezert, 2002). Les contraintes en question sont :

- Un cadre de discernement composé d'hypothèses exclusives et exhaustives (principe de tiers exclu).
- L'acceptation de la règle de Dempster pour la combinaison de sources indépendantes.
- Des sources d'information indépendantes et avec une même interprétation des hypothèses.

Par ailleurs, la règle de combinaison de Dempster a montré des comportements contre-intuitifs, particulièrement lorsque les différentes sources montrent des contradictions importantes (Dezert et Tchamova, 2011; Zadeh, 1979, 1986).

### 2.2.2 La théorie de Dezert-Smarandache

La théorie de Dezert-Smarandache (DSmT) proposée par Jean Dezert et Florentin Smarandache est un modèle de fusion évidentielle qui s'affranchit des contraintes précédentes et dans le cadre duquel d'autres opérateurs de fusion sont possibles (Dezert, 2002; Smarandache et Dezert, 2004).

Soit, le *cadre de discernement*  $\Theta$  formant l'ensemble de toutes les hypothèses et concepts envisagés dans le problème de fusion considéré. La distribution de croyances dans le cadre de la DST s'applique sur un *power-set* (symbolisé par  $2^\Theta$ ) de  $\Theta$ , constitué des hypothèses simples et des hypothèses composées issues de leurs *unions*. Le cardinal d'un tel ensemble, soit le nombre d'hypothèses qu'il contient, est de  $2^n$  où  $n$  est le cardinal du cadre de discernement  $\Theta$ .

La DSmT considère un ensemble d'hypothèses plus large que celui de la DST. En effet, cette théorie intègre également les hypothèses composées formées avec les opérateurs *union* et *intersection*. Un tel ensemble est appelé *hyper power-set* et est symbolisé par  $G^\Theta$ . Lorsque toutes les hypothèses composées sont envisagées, on parle de modèle de fusion *libre*. Dans la DSmT, cet ensemble d'hypothèses a un cardinal de  $2^{2^n}$ . Cependant, la DSmT permet de construire des ensembles dans lesquels certaines

hypothèses sont exclues. On parle alors de modèle *hybride*. Un *hyper power-set* dans lequel la contrainte d'exclusivité est appliquée à toutes les hypothèses se réduit au modèle de la DST.

À noter que toutes les propositions de  $G^\ominus$  doivent être dans leur forme canonique, soit leur forme disjonctive normale. Ainsi,  $X=A\cap B\cap(A\cup B\cup C)$  se réduit à  $X=A\cap B$  sous sa forme canonique (Onera et Smarandache, 2012).

Outre la plus grande liberté de modélisation, les fonctions de combinaison développées dans le cadre de DSmT ont montré des résultats meilleurs et plus cohérents que l'opérateur de fusion de Dempster dans le cadre de la DST (Dezert et Smarandache, 2004, 2006, 2009; Dezert, 2002).

Sur la base des observations précédentes, c'est donc la DSmT qui est utilisée dans cette étude pour fusionner les résultats de démixage avec des données géochimiques. La fusion des données et l'expression de leur confiance sous forme de croyance comprennent plusieurs étapes :

- L'assignation par chaque source de leurs niveaux de confiance envers les hypothèses.
- La combinaison de ces niveaux de confiance par un opérateur de fusion.
- La transformation de ces niveaux de confiance fusionnés en termes de croyance, plausibilité, ou autre fonction.
- L'étape de décision, soit la sélection d'une hypothèse sur base des résultats des fonctions précédentes.

Ces étapes sont détaillées dans les prochaines sections.

#### **A. Assignation des niveaux de confiance**

Comme la DST, la DSmT commence par assigner un niveau de confiance, également appelé *masse* ou *assignation généralisée de croyance de base (gbba)*, envers les hypothèses d'après la source d'information considérée. Ces niveaux de confiance sont attribués aux différents éléments de l'*hyper-power set*, qu'il soit libre ou hybride.

En pratique, il s'agit d'attribuer la confiance exprimée par la source envers une hypothèse  $B$  donnée dans l'espace de fusion  $G^\theta$ . Cette attribution n'intègre pas la croyance en une hypothèse plus générale  $C$  dans laquelle  $B$  serait incluse, ni en une hypothèse  $A$  qui serait incluse dans  $B$ .

Pour un modèle de fusion  $G^\theta$  formé à partir du cadre de discernement  $\Theta$ , l'attribution des masses d'après une source peut s'écrire (Dezert et Smarandache, 2010; Smarandache et Dezert, 2006a, 2014) :

$$m(\emptyset) = 0 \text{ et } \sum_{A \in G^\theta} m(A) = 1 \quad (10)$$

Où  $m(B)$  est la masse assignée à  $B$  et  $\emptyset$  désigne l'ensemble vide.

La solution la plus simple est d'utiliser les statistiques pour attribuer ces masses d'après les relations observées *a posteriori* entre un facteur mesuré et l'occurrence de l'hypothèse. Dans de tels procédés, les disjonctions d'hypothèses, soit les hypothèses composées issues d'unions d'hypothèses simples, ne sont cependant pas modélisées. Pour pallier ce problème, de nombreux auteurs réalisent leur apprentissage via des classifications préalables effectuées sur chaque source séparément (Liu *et al.*, 2013; Mora *et al.*, 2011). C'est cette dernière méthode qui a été retenue pour attribuer une masse aux différentes lithologies pour chaque pixel.

#### a. Pondération des niveaux de confiance par un critère de fiabilité

En plus de l'assignation conventionnelle des masses, un critère de fiabilité peut être ajouté aux scores issus des classifications. Cette notion de fiabilité a été introduite par Shafer (1976) pour traduire la confiance que l'on accorde en une source de donnée. Cette fiabilité  $\alpha$  varie de 0 à 1. Une fiabilité de 0,7 entraîne ainsi une redistribution de 30 % des masses vers les hypothèses plus générales. Le facteur de fiabilité se définit :

$$\begin{cases} m_\alpha(X) = \alpha \cdot m(X), & \text{pour } X \neq \Theta \\ m_\alpha(\Theta) = \alpha \cdot m(\Theta) + (1 - \alpha) \end{cases} \quad (11)$$

Où  $\Theta$  est l'ensemble des hypothèses simples du cadre de discernement.

## B. L'étape de Combinaison

Lorsque plusieurs sources d'information sont disponibles, une étape de combinaison doit être réalisée. C'est l'étape de fusion à proprement parler. La méthode classiquement utilisée dans la DST et initialement proposée par G. Shafer est la règle de combinaison orthogonale de Dempster (Dempster, 1968a):

$$m_{\oplus}(A) = \frac{\sum_{B \cap C = A} m_1(B) \cdot m_2(C)}{1 - \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) \cdot m_2(C)} \quad (12)$$

Où le dénominateur peut également être écrit  $1 - K$ ,  $K$  définissant le degré de conflit des deux sources.

Dans le cadre de la DSmT, la règle ayant montré les meilleurs résultats (Smarandache et Dezert, 2006a, 2014) est la 5<sup>ème</sup> version de la *Proportional Conflict Redistribution rule*, ou *PCR5* (Dezert et Smarandache, 2006). PCR5 redistribue les masses d'un conflit aux éléments impliqués dans ce conflit. La formule de PCR5 pour la combinaison de deux sources s'écrit sous la forme (Dezert et Smarandache, 2006; Smarandache et Dezert, 2006a, 2014):

$$m_{PCR5}(X) = m_{12}(X) + \sum_{\substack{Y \in G^{\ominus X} \\ X \cap Y = \emptyset}} \left[ \frac{m_1(X)^2 m_2(Y)}{m_1(X) + m_2(Y)} \right] + \left[ \frac{m_2(X)^2 m_1(Y)}{m_2(X) + m_1(Y)} \right] \quad (13)$$

Avec  $m_{PCR5}(\emptyset) = 0$  et  $\forall X \in G^{\ominus} \setminus \{\emptyset\}$ . Où tous les ensembles impliqués sont sous leur forme canonique et où  $G^{\ominus}$  correspond au modèle (libre, hybride ou de Shafer) utilisé dans le problème de fusion.

Dans le cadre de cette thèse, c'est donc la règle PCR5 qui a été retenue pour combiner les informations issues du démixage avec celles issues de la géochimie.

## C. Fonctions de croyance généralisées

L'utilisation des fonctions de croyance et de plausibilité a été proposée par G. Shafer (Shafer, 1976a) pour traduire l'imprécision et l'incertitude d'une ou plusieurs sources.



La fonction de croyance généralisée  $Bel$  consiste en la somme des masses des ensembles  $B$  inclus ou égaux à l'ensemble  $A$  considéré (Dezert et Smarandache, 2004, 2009; Dezert, 2002) :

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (14)$$

Il s'agit donc de la croyance minimale obtenue lorsque l'imprécision et l'incertitude sont considérées de la façon la plus pessimiste.

La Plausibilité  $Pl$  exprime quant à elle la croyance dans le cas où toutes les inconnues et imprécisions sont considérées de la façon la plus optimiste (Dezert et Smarandache, 2004, 2009; Dezert, 2002) :

$$Pl(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B) = 1 - Bel(A) \quad (15)$$

Le degré d'incertitude en une hypothèse se traduit par la différence entre sa croyance et sa plausibilité. L'intervalle  $[Bel(A), Pl(A)]$  est appelé « *intervalle de confiance* » et sa longueur mesure l'ignorance que l'on a sur un événement. La Croyance et la Plausibilité sont donc deux positionnements extrêmes face à l'incertitude.

La Transformation Pignistique classique pour la DST (Smets, 2000) et sa forme généralisée pour la DSMT (Dezert et Smarandache, 2009) sont considérées comme un compromis prudent aux extrêmes que sont ces maximums de croyance et de plausibilité (Smarandache et Dezert, 2006b).

Dans la vision de Philippe Smets, deux niveaux de réflexion ont lieu lorsqu'une personne doit prendre une décision. Le premier niveau, le niveau *credal*, combine les preuves, et le second niveau, le niveau *pignistique*, prend une décision. La fonction de transformation en probabilité pignistique (Smets, 2000) construit cette réflexion :

$$\forall A \in D^\theta, BetP\{A\} = \sum_{X \in D^\theta} \frac{C_M(X \cap A)}{C_M(X)} m(X) \quad (16)$$

Où  $C_M(X)$  est le cardinal de la proposition  $X$ .

D'autres fonctions de transformation probabilistique existent pour exprimer une probabilité subjective à partir des croyances. La DSMP (Dezert et Smarandache, 2008) est ainsi proposée comme une alternative à la transformation pignistique.

#### **D. L'étape de Décision**

Une fois la croyance exprimée vient donc la prise de décision. Celle-ci vise à répondre à la question: « *D'après les différentes sources d'information, à quelle hypothèse appartient l'élément considéré? Avec quel degré de confiance ?* ».

Cette décision peut être accompagnée d'une mesure de sa qualité, pouvant éventuellement conduire à la rejeter. Dans cette thèse la décision porte sur la lithologie à laquelle un pixel de l'image devrait être attribué. Bien que les critères de décision puissent varier fondamentalement dans leur manière de gérer les incertitudes et les ignorances, il est apparu que ces différences n'affectent pas de façon conséquente les performances de classification (Tian et Dezert, 2019). Face à ce manque de contraste, c'est le maximum de probabilité pignistique qui a été arbitrairement choisi comme critère de classification.

#### **2.3 Comment appliquer le démixage en exploitation minière ?**

Les mines à ciel ouvert présentent donc des difficultés particulières pour l'application du démixage. Les différentes phases d'excavation des roches engendrent des quantités importantes de poussière qui s'épandent sur le plancher de la mine. Les surfaces observées présentent donc des textures très variables, allant de la poussière micrométrique aux blocs de taille métrique.

De plus, les spectres de référence des minéraux sont fonction de leur composition et de leur structure cristalline (Clark *et al.*, 1990; Kokaly *et al.*, 2017). Ainsi, des éléments en trace, des inclusions, ou des distorsions du réseau cristallin vont faire varier le spectre de réflectance qui les caractérise. Cette variabilité est particulièrement vraie pour les minéraux ayant une large distribution de compositions chimiques possibles, comme les solutions solides (Kokaly *et al.*, 2017; Mustard, 1992).

Pour être applicables dans un tel contexte, les méthodes de démixage doivent donc être robustes à ces variations. Elles doivent également capturer adéquatement le caractère non linéaire du mélange spectral.

Par ailleurs, le climat de l'Abitibi n'offre pas le luxe de négliger l'influence de l'humidité. Cependant, aucune méthode n'a à ce jour été proposée pour résoudre ce problème. Face à ces difficultés, plusieurs questions se posent : Quel modèle choisir? À quel point est-il fiable? Comment composer avec le problème de non-linéarité et avec l'importante variabilité des *endmembers*? Comment gérer le problème d'humidité? Le démixage peut-il apporter une information complémentaire aux données géochimiques? Si oui, comment les fusionner ?

### **2.3.1 Mise en perspective des objectifs principaux et secondaires**

Répondre à ces questions implique dans un premier temps de recenser les modèles d'analyse spectrale disponibles et d'identifier les plus aptes à être appliqués en milieu minier. Ce premier volet du processus de recherche vise donc à faire une étude comparative de leurs performances. Leur applicabilité en télédétection, leur aptitude à retrouver les abondances des minéraux, et leur robustesse face à des problèmes de variabilité spectrale sont autant de critères qui vont peser dans la sélection. L'hypothèse est que le modèle de démixage ainsi retenu sera le plus à même de fournir une information minéralogique fiable dans un contexte de grande variabilité des *endmembers*.

Le modèle sélectionné restera malgré tout sensible aux variations d'humidité. Ce projet s'appuie sur l'hypothèse que l'intégration, lors du démixage, d'une équation de correction de l'effet de l'humidité comme celle de Lobell et Asner (2002) permettra de le corriger. Le second objectif est donc de définir et de calibrer cette fonction afin de l'intégrer à un modèle de démixage. Ce modèle modifié doit également être validé expérimentalement.

Enfin, une fois le modèle sélectionné, modifié, et appliqué, les résultats produits devront compléter les données géochimiques de la mine pour en améliorer la caractérisation lithologique. La dernière hypothèse sur laquelle s'appuie la méthodologie développée dans cette thèse est que la théorie des croyances est à même

de fusionner les deux sources d'information. Le développement et l'application d'une méthode de fusion basée sur la DSMT dans ce contexte forment donc le troisième objectif et dernier volet du processus de recherche.

### **2.3.2 Limites de l'étude**

Face aux difficultés d'application du démixage sur des scènes naturelles, il est important de cerner les limites de ces méthodes dans le contexte de cette thèse. Les méthodes de démixage spectral sont loin des précisions atteintes par les techniques géochimiques en laboratoire. Alors que plusieurs de ces dernières atteignent des précisions de l'ordre de la partie par milliard (ppb) (Potts, 1992), les meilleures performances de démixage ont des taux d'erreur de plusieurs pourcents (Mustard et Pieters, 1987b, 1989).

Les méthodes et résultats présentés sont également tributaires des données géochimiques disponibles. Comme expliqué dans le cadre expérimental, des approximations et suppositions importantes sont faites pour mener à bien ce projet de recherche. Une partie des résultats sont également issus de données simulées. Le volet "fusion" du projet vise donc davantage à proposer une démarche qu'à présenter des résultats. Les conclusions devront donc être tirées avec toute la prudence nécessaire.

## Chapitre 3. CADRE EXPÉRIMENTAL

### 3.1 Site d'étude

Le site d'étude pour la réalisation de cette thèse est la mine à ciel ouvert Canadian Malartic. Le site est situé au Québec dans la région administrative de l'Abitibi-Témiscamingue, à 450 km au nord-ouest de Montréal, entre les villes de Val-d'Or et de Rouyn-Noranda. La mine Canadian Malartic est la plus grande mine d'or en exploitation du Canada. Elle a débuté sa production en avril 2011, sous la direction de la compagnie Osisko. Depuis juin 2014, elle est exploitée par le Partenariat Canadian Malartic après l'acquisition de la mine par les compagnies Yamana Gold Inc. et Agnico Eagle Limitée (Mine Canadian Malartic, 2019).

Le gisement aurifère exploité est situé dans le craton canadien, dans la province géologique du Supérieur, près de la bordure nord de la sous-province de Pontiac et du groupe stratigraphique de même nom (voir Figure 3.1A). Cette bordure est définie par la Zone de Déformation Cadillac–Lac Larder (ZDCLL, ou *CLLDZ* pour *Cadillac – Lake Larder Deformation Zone*) dans laquelle se trouve le Groupe stratigraphique de Piché (voir Figure 3.1B). Cette zone de déformation définit la limite entre la sous-province de l'Abitibi au nord et la sous-province du Pontiac au sud (Robert, 1989). Dans la voir Figure 3.1B, les délimitations de la Mine Canadian Malartic (ligne rouge) englobent les futures extensions du nord-est. Les points noirs, et gris sont les localisations des relevés structuraux des études antérieures (voir Perrouty *et al.*, 2017 et citations).

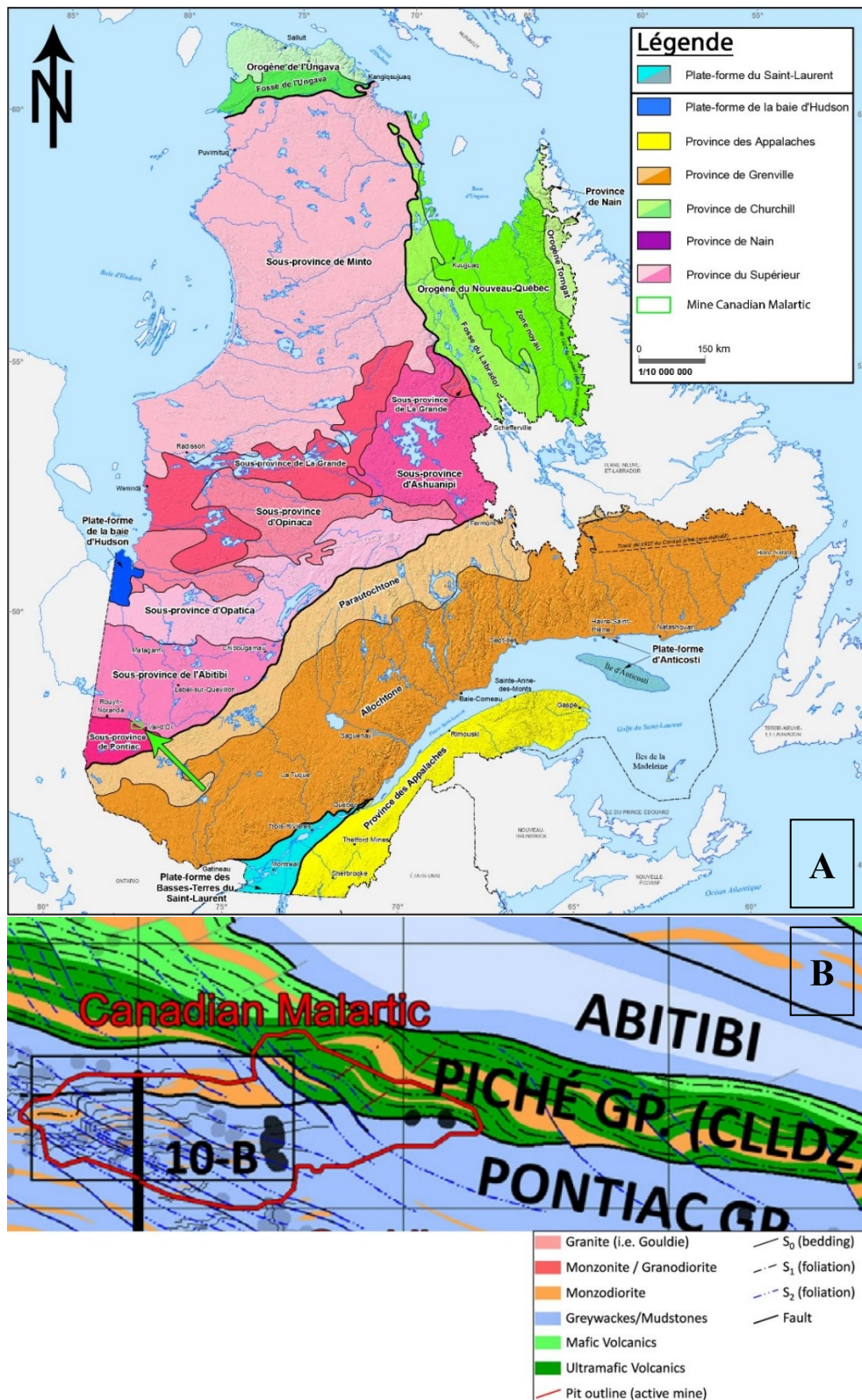


Figure 3.1 : A : Les Grands Ensembles Géologiques du Québec (modifié; MERN, 2012). La flèche verte et l'encadré vert indiquent l'emplacement de la mine ; B : Carte modifiée de la Sous-province de Pontiac (Perrouy *et al.*, 2017), elle-même modifiée d'après Derry (1939), Fallara (2000), Gunning et Ambrose (1940), Sansfaçon *et al.* (1987), MERN (2016), Base de Données SIGEOM, 2016 <http://sigeom.mines.gouv.qc.ca/>, Minerais Lac Limited : rapports et cartes non publiées, et Canadian Malartic Exploration, 2012, données non publiées.

Mine Canadian Malartic exploite un gisement archéen de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi associé à des intrusions magmatiques subalkalines à alcalines (Helt *et al.*, 2014; Robert, 2001). Près de 70 % du minerai exploité par la mine est situé dans les roches sédimentaires du groupe de Pontiac (De Souza *et al.*, 2015, 2017). L'or est présent sous forme de grains de taille inférieure à 20 µm et sous forme d'inclusions dans la pyrite. Cette dernière est essentiellement distribuée dans les stockwerks et de façon disséminée dans les roches altérées (De Souza *et al.*, 2015, 2017).

Les roches sédimentaires du groupe de Pontiac sont essentiellement constituées de grauwacke turbiditiques et de mudstone (De Souza *et al.*, 2015, 2017). La minéralogie de ces roches sédimentaires comprend majoritairement la biotite, la muscovite, l'oligoclase, la chlorite et l'épidote. De plus faibles quantités de pyrite, pyrrhotite, ilménite, magnétite et apatite peuvent également être présentes dans des proportions variables (De Souza *et al.*, 2015; Helt *et al.*, 2014).

La mine est également traversée par des intrusions de quartz-monzodiorite porphyrique. Ces intrusions sont essentiellement présentes au nord-est et à l'ouest de la fosse et comprennent des phénocristaux d'orthoclase dans une matrice de plagioclases, biotite, hornblende, épidote, quartz, et muscovite (De Souza *et al.*, 2015; Helt *et al.*, 2014).

Tant les roches sédimentaires que les roches intrusives ont été affectées par différentes phases d'altération hydrothermales. Des altérations carbonatées et potassiques sont à l'origine d'un accroissement des proportions en calcite, dolomite, et ankérite pour la première, et en biotite et feldspaths potassique pour la seconde. Des phénomènes d'albitisation et de silicification ont également eu lieu (De Souza *et al.*, 2015; Helt *et al.*, 2014).

Les roches métasédimentaires et intrusives présentent donc toutes les deux un assemblage minéralogique semblable. Leur paragenèse est illustrée par la Figure 3.2.

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

Figure 3.2 : Paragenèse d'altération et de minéralisation des roches métasédimentaires et des intrusions de quartz-monzodiorite porphyriques (Helt *et al.*, 2014).

Les faciès d'altération vont également varier en fonction des distances avec les éléments structuraux comme la faille de Sladen près de la bordure nord de la fosse (De Souza *et al.*, 2015, 2017). Cette faille, d'orientation ouest-est, est visible dans la Figure 3.1B. On va ainsi distinguer des faciès d'altérations proximaux et distaux (De Souza *et al.*, 2015, 2017; Helt *et al.*, 2014) :

- Les roches métasédimentaires ont un faciès d'altération distal qui se distingue essentiellement par une plus grande proportion en biotite, mica blanc, plagioclases et calcite. L'évolution vers un faciès proximal va se traduire par une augmentation en carbonates, avec un assemblage dominé par l'albite, le microcline, le quartz et la phlogopite.
- Les intrusions porphyriques présentent un faciès distal gris-rougeâtre plus riche en calcite, hématite, biotite, microcline, avec dans une moindre mesure de la magnétite, pyrite et chlorite. Le faciès proximal se présente comme une roche



plus riche en albite, quartz, microcline avec, encore une fois, un enrichissement en carbonates.

Les altérations se retrouvent donc tant dans les roches sédimentaires que les intrusions de quartz-monzodiorite. À noter que, bien que ces roches soient de composition minéralogique similaire, leur texture, héritage de leur processus de formation, leur donne une apparence différente. Ce contraste est illustré par la Figure 3.3.

### **3.1.1 Méthodes d'exploitation et conséquences**

La Mine Canadian Malartic utilise des méthodes conventionnelles d'exploitation. Le gisement est divisé en paliers de 10 mètres de haut qui sont excavés par dynamitage. Les roches sont ensuite chargées par pelleteuse dans des tombereaux et transportées vers des concasseurs.

Comme on peut s'y attendre, la frénésie d'une mine en activité produit une quantité importante de poussière. Par l'action des vents, cette poussière se dépose à de grandes distances de son origine, masquant les roches *in situ* et biaisant les mesures des surfaces rocheuses. Toutes ces activités génèrent par ailleurs une importante variabilité de textures, celles-ci allant de la poussière micrométrique aux blocs de taille métrique.

Pour limiter l'impact de l'exploitation sur la ville de Malartic adjacente, la compagnie doit donc réduire la poussière qu'elle génère. La stratégie appliquée est d'arroser les camions lors de leur chargement ainsi que les chemins qu'ils empruntent. S'ensuit une importante hétérogénéité de l'humidité en surface.

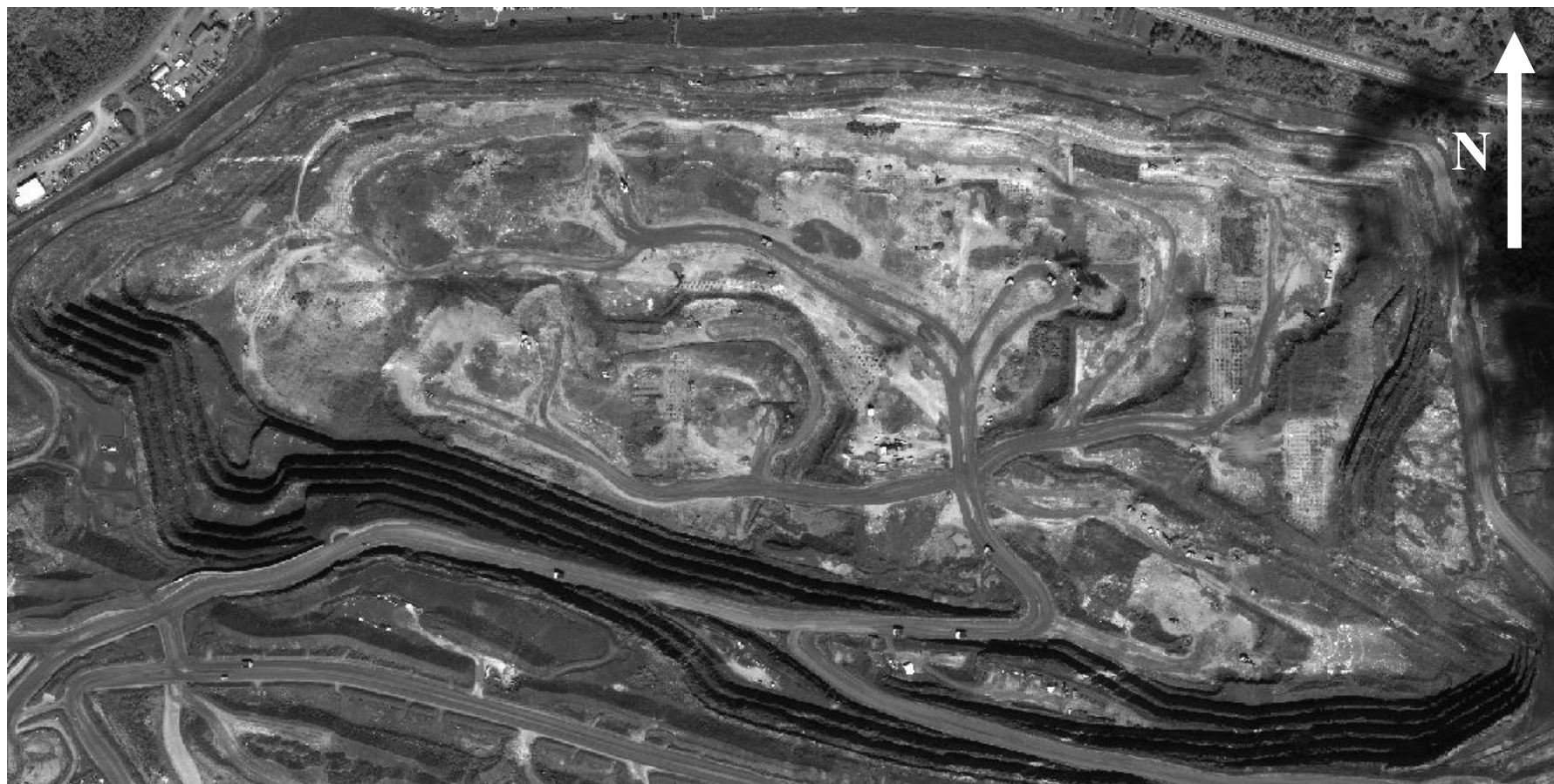


Figure 3.3: Image panchromatique WorldView-3 de la Mine Canadian Malartic. Les zones plus claires sont essentiellement dues à la poussière importante déposée sur les surfaces rocheuses. Les mailles de points à droite de la fosse sont des trous de sautage. Au sud de la fosse, trois tombereaux (camions) sont visibles montant la rampe d'accès.

## **3.2 Données**

### **3.2.1 Données spectrales**

Ce projet de recherche a nécessité plusieurs jeux de données spectrales afin de tester et d'appliquer les méthodes de démixage. Parmi ces données, on peut distinguer les images satellitaires, les spectres acquis en laboratoire, et ceux acquis sur le terrain. Certaines de ces données ont été recueillies auprès de sources publiques alors que d'autres ont été acquises spécifiquement dans le cadre de cette thèse. Dans le texte qui suit, et afin de faciliter la correspondance avec la méthodologie, ces données spectrales sont décrites par ordre chronologique d'utilisation.

#### **A. Spectres de mélanges de minéraux RELAB**

Les premiers spectres de réflectance utilisés sont issus de la bibliothèque spectrale *Reflectance Experiment Laboratory* (RELAB) de l'Université Brown. La bibliothèque est disponible gratuitement à [www.planetary.brown.edu/relab/](http://www.planetary.brown.edu/relab/). Le jeu de données sélectionné pour cette thèse comprend 94 spectres de mélanges binaires, ternaires ou quaternaires ainsi que les 20 spectres des minéraux purs qui les constituent. Les tailles de grains (sous forme d'intervalles), les proportions massiques, et les géométries de mesures sont également fournies. Ces données de référence sont destinées à évaluer les aptitudes des méthodes de démixage à retrouver les abondances des minéraux.

#### **B. Image hyperspectrale AVIRIS**

La première image satellite utilisée dans le cadre de cette thèse est un sous-échantillon de 300 x 300 pixels d'une image hyperspectrale AVIRIS de Cuprite, Nevada, US, acquise en juin 1997, et disponible librement en réflectance à l'adresse [https://aviris.jpl.nasa.gov/data/free\\_data.html](https://aviris.jpl.nasa.gov/data/free_data.html). Ce site d'étude est sans doute le site de test et de validation le plus connu pour la cartographie minéralogique. L'excellente exposition d'affleurements rocheux, l'importante variabilité minéralogique, l'absence de végétation, et la bonne connaissance des lieux en font en effet un site privilégié. Cette image est destinée à tester les méthodes de démixage sur des spectres de scènes naturelles acquis par télédétection.

L'image AVIRIS (Figure 3.4) comprend 224 bandes spectrales allant de 370 à 2500 nm pour une largeur de bande d'environ 10 nm. La zone de test présente une importante

variabilité minéralogique avec deux zones montrant de fortes altérations hydrothermales (Ashley et Abrams, 1980; Swayze *et al.*, 2014).

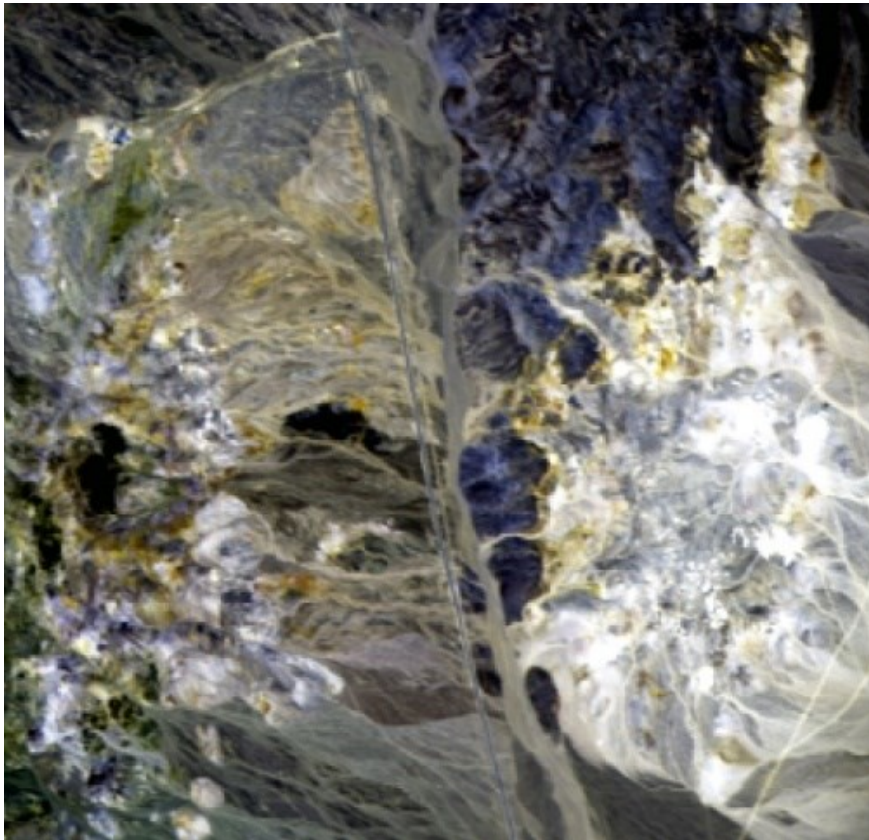


Figure 3.4 : Sous-échantillon de 300 x 300 pixels en couleurs RVB augmentées de l'image AVIRIS de Cuprite.

### C. Spectres des bibliothèques spectrales

Le démixage nécessite cependant de connaître les spectres des matériaux purs présents dans la scène. Les *endmembers* des minéraux ont été tirés des bibliothèques spectrales de l'USGS *splib07* (Kokaly *et al.*, 2017) et ECOSTRESS (Meerdink *et al.*, s.d.). Seuls les spectres d'échantillons de pureté 'a' ou 'b' de *splib07*, soit des échantillons purs ou presque purs sans altération spectrale significative, ont été considérés.

### D. Image superspectrale WorldView-3

Pour son application sur le site d'étude, le démixage a été réalisé sur une image superspectrale WorldView-3 (WV3) centrée sur la Mine Canadian Malartic (Figure 3.5). L'image a été acquise le 30 juillet 2016 et ses dimensions au sol sont de 10 km x 10 km. Elle comprend 16 bandes spectrales s'étendant du visible à l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) en passant par le proche infrarouge (NIR). Elle inclut également une

bande panchromatique. Ses résolutions spatiales au sol sont de 1,24 m pour les huit bandes dans le visible-proche infrarouge (V-NIR) et de 7,5 m pour les huit bandes dans le SWIR. L'image est fournie par la compagnie *DigitalGlobe* en nombre digital (données brutes) après correction radiométrique relative.



Figure 3.5 : Image RVB (Rouge = bande 5, Vert = bande 3, Bleu = bande 2) Worldview-3 centrée sur les haldes à stériles de la mine.

### **E. Spectres ASD de la Mine Canadian Malartic**

L'image WV3 a requis plusieurs étapes de prétraitement en vue de son démixage. Parmi ces étapes, la conversion en réflectance a nécessité l'acquisition de spectres de référence. Ainsi, six spectres de réflectance ont été acquis dans la mine avec un *Analytical Spectral Device (ASD) FieldSpec* le 20 juillet 2016, soit 10 jours avant l'acquisition de l'image satellite. Ces spectres sont constitués de 2151 bandes situées entre 350 et 2500 nm de longueur d'onde pour une largeur de bande d'environ 1 nm. Les endroits retenus pour l'acquisition de ces spectres ont été sélectionnés d'après leur surface et leur homogénéité. En effet, les spectres devaient être représentatifs des

surfaces couvertes par les pixels. L'image ayant une résolution spatiale au sol de 7,5 m, des surfaces homogènes d'au moins 15 m de côté étaient ainsi nécessaires.

## **F. Spectres ASD acquis en laboratoire**

La question de l'humidité a été abordée en analysant des spectres d'échantillons acquis en laboratoire. Pour ce faire, deux blocs de roche ont été collectés dans la mine durant la campagne de terrain du 10 juillet 2016 : un de type metagrauwacke (MG) et un de type porphyre monzodiorite (MP). Les deux échantillons ont été broyés dans leur intégralité à une taille de grains inférieure à deux millimètres. Les échantillons ont servi à remplir deux boîtes de Petri. Leur surface a ensuite été égalisée à l'aide d'une règle. La préparation s'est terminée en arrosant les échantillons d'eau jusqu'à saturation apparente.

Les échantillons ont été éclairés par un spot halogène commercial avec un angle de 30° par rapport à la normale. Les mesures ont été prises au nadir à l'aide du même ASD que celui utilisé en terrain. L'acquisition des spectres a été réalisée automatiquement toutes les minutes depuis leur état saturé jusqu'à ce que plus aucune variation spectrale n'était constatée. L'évaporation de l'eau a été considérablement accélérée par la chaleur de la lampe. Pour chaque acquisition, 50 spectres étaient mesurés et moyennés afin d'en réduire le bruit. À noter qu'à aucun moment la teneur réelle en eau n'a été mesurée. Au total, 43 spectres ont été acquis pour l'échantillon MG et 61 pour l'échantillon MP.

### **3.2.2 Données de la mine**

La finalité de cette thèse étant d'améliorer la caractérisation des roches, des données de référence *in situ* ont également été nécessaires. Deux types de données ont été manipulées : des données géochimiques et des données lithologiques. Les détails de ces données suivent ci-après.

#### **A. Données lithologiques**

Cinq coupes horizontales du modèle-bloc lithologique du gisement ont été utilisées dans ce projet (voir . Le modèle-bloc a été réalisé par la compagnie *Mine Canadian Malartic* par interpolation d'analyses d'échantillons et de logs de forages collectés au cours des neuf dernières années d'activité. Ces coupes se situent respectivement aux élévations 200, 210, 220, 230 et 240 mètres. Elles illustrent la répartition des lithologies

définies par la compagnie dans l'espace du gisement, subdivisée en unités de volume (blocs). Cinq de ces lithologies étaient visibles au moment de l'étude : les metagrauwackes altérés (AGR), les metagrauwackes carbonatés (CGR), les metagrauwackes silicifiés (SGR), les monzodiorites porphyriques silicifiés (SPO) et les monzodiorites porphyriques carbonatés (CPO).

Une carte d'élévation du plancher au moment de l'acquisition de l'image satellite a également été exploitée. Cette carte a été reconstituée en croisant les valeurs d'élévation d'un plan d'exploitation hebdomadaire, fournie par la compagnie le 20 juillet 2016, avec l'image panchromatique de WV3 (voir Annexe B 7). La lecture attentive du plan a permis d'attribuer des valeurs d'altitude aux différents paliers identifiés dans l'image et ainsi de reconstituer la carte d'élévation (Annexe B 8). C'est à partir de cette carte d'élévation et des coupes du modèle décrit plus haut que la carte lithologique à hauteur du plancher a été reconstruite :

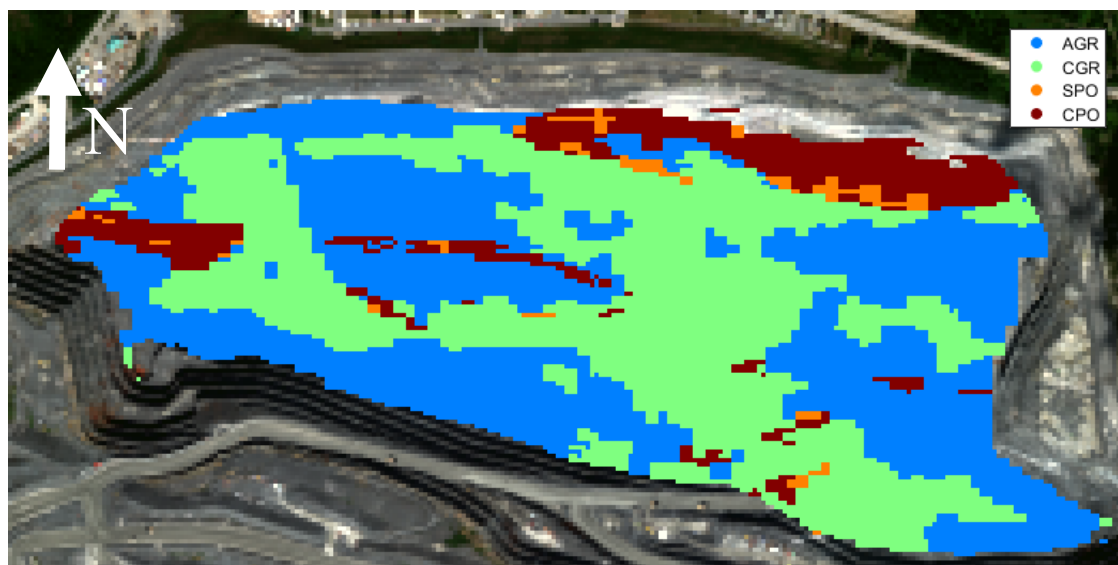


Figure 3.6 : Carte des lithologies définies par la Mine Canadian Malartic, reconstruite à partir des coupes horizontales du modèle lithologique produit par la compagnie. Une couleur est attribuée à chacune des quatre lithologies observées, à savoir : bleu pour le grauwacke altéré (AGR), vert pour le grauwacke carbonaté (CGR), orange pour le porphyre silicifié (SPO) et bordeaux pour le porphyre carbonaté (CPO).

Dans le reste du travail de recherche, cette carte a été utilisée comme référence pour évaluer les performances des caractérisations lithologiques.

## B. Données géochimiques

Enfin, les analyses géochimiques et les lithologies de 193 échantillons étaient également disponibles pour cette étude (voir Annexe B 6). Ces échantillons ont été collectés par *Golder et Associés Ltée* en 2012 et 2013 sur des carottes de forages d'exploration (Golder Associés, 2014).

Ces analyses comportent les proportions massiques en éléments sous forme d'oxyde. Les oxydes analysés sont : SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, MnO, TiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Les analyses ont été réalisées par Fluorescence à Rayons-X (FRX) (Golder Associés, 2014). Sur les 193 échantillons, 114 proviennent de la fosse étudiée. Les 79 échantillons restants proviennent de zones extérieures.

Les localisations spatiales (XYZ) de ces 114 échantillons ont été estimées par croisement de différentes sources, toutes fournies par *Golder et Associés Ltée* :

- La distance des échantillons par rapport au col de forage (données non présentées ici) ;
- La position des échantillons sur des illustrations de sections transversales de la mine. Ces sections verticales d'orientation N-S et séparées de 150 m sont les plans le long desquels les forages d'exploration ont été réalisés et sur lesquels les échantillons ont été collectés ;

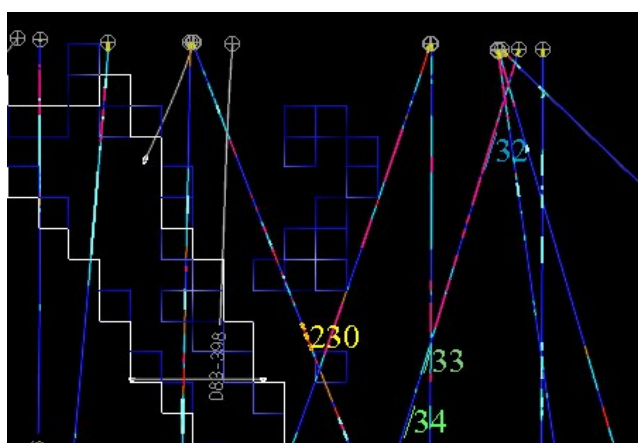


Figure 3.7 : Extrait d'une section transversale de la mine le long de laquelle des forages d'exploration ont été réalisés. Les couleurs des traits définissent la lithologie des carottes. Chaque section échantillonnée est identifiée par un numéro.

- Une image de la répartition des échantillons projetés verticalement sur un plan horizontal.



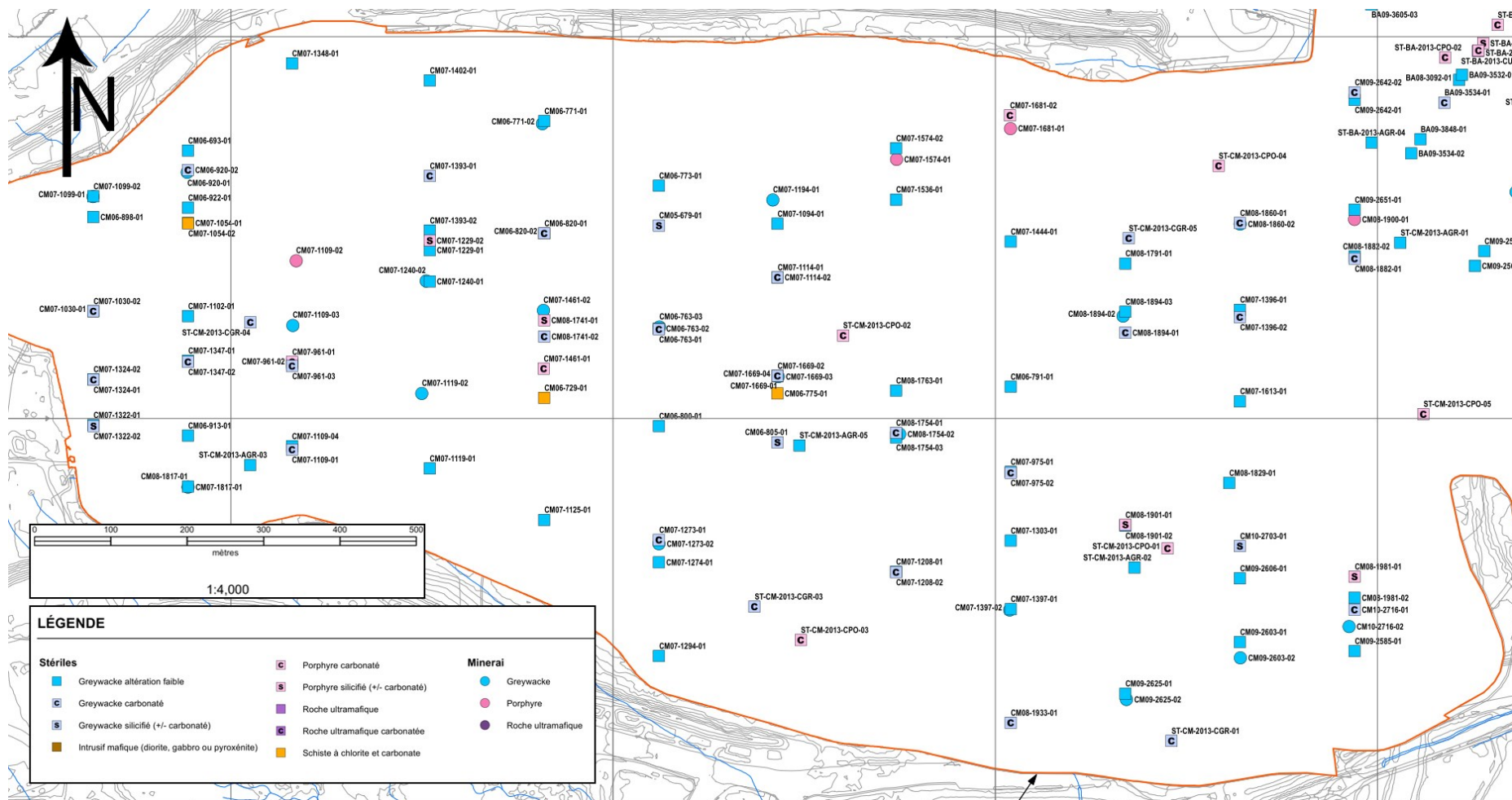


Figure 3.8 : Plan de répartition des échantillons projetés sur le plan horizontal. L'alignement des points dans la direction NS est dû à la distribution des forages le long des coupes transversales (Projection NAD83, UTM 17). Extrait de Golder et Associés (2014)

Ce sont ainsi 114 analyses géochimiques et leur localisation qui étaient disponibles pour la réalisation de cette thèse. Les analyses des 79 échantillons supplémentaires, extérieurs à la fosse étudiée, ont également été utilisées.

### 3.3 Méthodologie

La méthodologie est subdivisée d'après les quatre étapes du processus de recherche :

- 1) La comparaison des performances des modèles de démixage. Une nouvelle méthode développée dans cette thèse, l'approche *Neighbor-Bands Ratio Unmixing* (NBRU), est également proposée.
- 2) La modification de l'algorithme de démixage retenu par l'ajout d'une fonction de correction de l'effet de l'humidité.
- 3) L'interpolation des données géochimiques de la mine. Cette partie inclut également une étape importante de simulation de données.
- 4) La caractérisation lithologique par fusion des classifications des résultats de démixage et des données géochimiques interpolées.

Ces quatre étapes sont schématisées dans l'organigramme général de la Figure 3.9. Pour chacune des étapes, des organigrammes détaillés sont également présentés dans leur section respective.

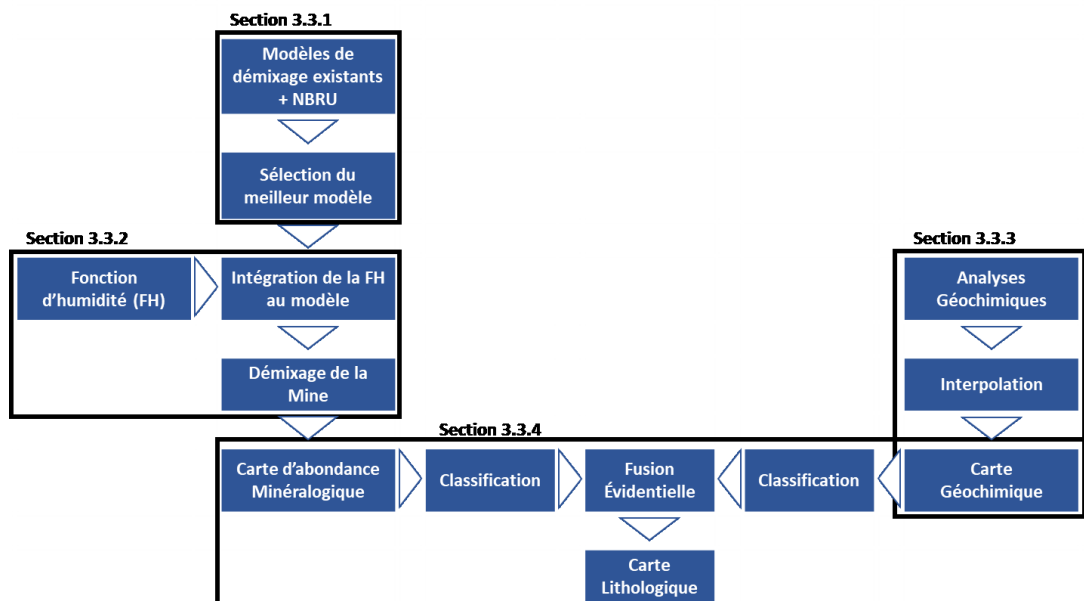


Figure 3.9 : Organigramme général de la méthodologie.

### 3.3.1 Comparaison des modèles de démixage

Le premier volet expérimental consiste à comparer les aptitudes des différents modèles à retrouver les abondances minéralogiques et à évaluer leur robustesse face au problème de variabilité spectrale. Le processus de sélection du modèle est schématisé dans l'organigramme de la Figure 3.10 :

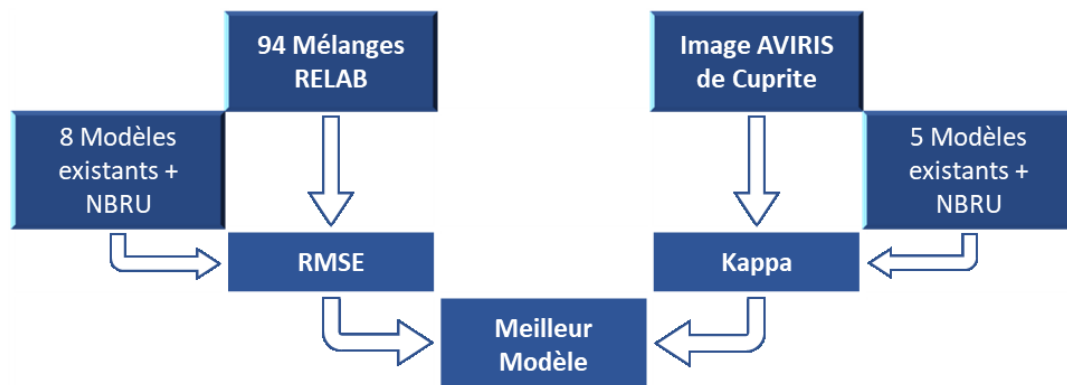


Figure 3.10 : Organigramme du processus de comparaison et de sélection des modèles de démixage. Les éléments en reliefs correspondent aux intrants.

La partie gauche de l'organigramme est détaillée dans la section B et la partie de droite dans la section C.

#### A. Proposition d'une nouvelle approche : le *Neighbor-Band Ratio Unmixing*

En plus des modèles présentés dans la partie 2.1.2C, une nouvelle approche est proposée pour tenter de démixer les surfaces rocheuses. Cette approche vise à composer à la fois avec les problèmes de non linéarité et avec les variabilités spectrales rencontrées lors du démixage de scènes naturelles.

La transformation de spectres de réflectance en dérivée première ou supérieure a montré des avantages intéressants en démixage (Somers 2009, Debba 2006, Zhang 2004). Étant indépendantes de l'amplitude des spectres, les dérivées ne permettent cependant pas de tenir compte du caractère non linéaire des mélanges intimes. Une approche offrant à la fois la robustesse des méthodes basées sur la forme et une bonne estimation des abondances des minéraux serait cependant d'une grande utilité pratique.

Soient  $s_i$  la valeur de réflectance à la  $i^e$  bande spectrale,  $s_{i+1}$  la valeur de la bande suivante et  $\Delta$  la constante définissant la différence entre les deux paramètres

précédents :  $\Delta = s_{i+1} - s_i$ . Enfin, soit  $s_i^*$  la nouvelle variable résultant de la fonction de transformation  $f(.)$  appliquée sur  $s_i$  :  $s_i^* = f(s_i)$ .

Afin de répondre aux difficultés énoncées plus haut, l'approche proposée doit répondre aux deux conditions suivantes :

- 1) Rehausser les caractéristiques des spectres de faible amplitude, afin d'améliorer l'estimation des abondances minéralogiques correspondantes lors du démixage spectral. Mathématiquement parlant, cela revient au fait que la dérivée  $f'(s_i)$  de  $f(.)$  soit inversement proportionnelle à  $s_i$ .
- 2) Garder ces caractéristiques nulles lorsque la différence entre  $s_i$  et  $s_{i+1}$  ( $\Delta$ ) est égale à zéro. Dans ce cas, la pente de  $f$  pour  $s_i$ , exprimée par la dérivée  $f'(s_i)$  doit donc être égale à zéro.

Les fonctions avec pour dérivée une relation inverse multiplicative correspondent à ces critères :

$$f'(s_i) = \frac{\Delta}{(s_i + \Delta)^n} \text{ avec } n \geq 1 \quad (17)$$

Où  $n$  définissant l'amplification produite par la transformation. Lorsque  $n=1$ , la transformation proposée devient alors :

$$\begin{aligned} f(s_i) &= \int f'(s_i) ds_i = \int \frac{\Delta}{s_i + \Delta} ds_i \\ &= \Delta \ln(s_i + \Delta) + K \end{aligned} \quad (18)$$

Où  $K$  est une constante réelle définissant la valeur du spectre transformé pour un spectre de réflectance plat ( $\Delta=0$ ). L'équation générale pour des valeurs de  $n$  supérieures à 1 est :

$$\begin{aligned} f(s_i) &= \int f'(s_i) ds_i = \int \frac{\Delta}{(s_i + \Delta)^n} ds_i \\ &= K - \frac{\Delta}{(n-1)(s_i + \Delta)^{n-1}} \end{aligned} \quad (19)$$

Pour faciliter l'intégration et l'application de la transformation en démixage, considérons ici  $n=2$ . D'autres valeurs peuvent cependant être appliquées. La fonction de transformation devient alors :

$$f(s_i) = \int f'(s_i) ds_i = \int \frac{\Delta}{(s_i + \Delta)^2} ds_i = K - \frac{\Delta}{(s_i + \Delta)} \quad (20)$$

Pour une constante  $K=1$ , la transformation devient alors :

$$s_i^* = f(s_i) = 1 - \frac{\Delta}{s_i + \Delta} = \frac{s_i}{s_{i+1}} \quad (21)$$

Où  $s_i^*$  est la  $i^e$  valeur du spectre transformé. La transformation proposée peut donc être résumé par un ratio de bandes voisines (NBR).

Les ratios fournissent ainsi une amplitude des pentes du spectre de réflectance d'origine. Une valeur supérieure à 1 indique une pente descendante et une valeur inférieure à 1 une pente ascendante. Ces valeurs seront d'autant plus distantes de 1 que ces pentes sont fortes. Une même différence entre deux paires de bandes spectrales voisines aboutira à des ratios différents si les réflectances d'origine sont différentes. C'est cette relation entre ratio de bandes et hauteur du spectre qui est à l'origine du caractère non linéaire de l'approche NBRU. Cette relation est illustrée par la Figure 3.11. À noter que dans cette figure est celles qui suivent, le point est utilisé comme symbole décimal.

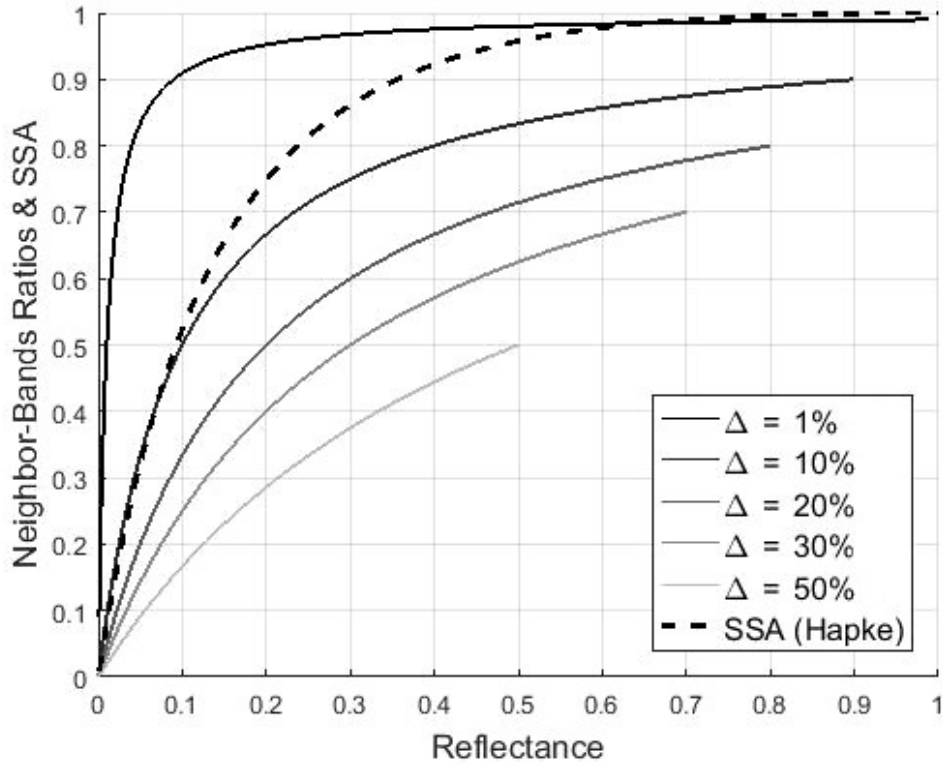


Figure 3.11 : Evolution de ratios de bandes voisines ( $s_i^*$ , axe des ordonnées) pour cinq différences de réflectance  $\Delta$  avec la réflectance de la première bande ( $s_i$ , axe des abscisse) allant de zéro à sa valeur maximum. La transformation en SSA du modèle d'Hapke est également illustrée pour comparaison.

Pour une même différence de réflectance  $\Delta$ , on voit dans la figure précédente qu'un spectre de réflectance « bas » aura un ratio de bandes plus éloigné de 1 qu'un spectre « haut ». Une caractéristique spectrale comme un pic de réflectance sera donc d'autant plus marquée en termes de NBR que le spectre est sombre.

La stratégie proposée pour démixer des spectres de réflectance avec l'approche NBRU consiste à appliquer directement la transformation NBR sur les spectres des *endmembers* et sur les spectres à démixer. Puisque cette transformation capture les relations non linéaires entre les abondances des *endmembers* et leur influence spectrale, la relation entre les NBR devient donc linéaire. Le démixage consiste donc à utiliser la relation :

$$y_i^* = \sum_{r=1}^N e_i^* * a_r + \eta^* = \sum_{r=1}^N \frac{e_i}{e_{i+1}} * a_r + \eta^* \quad (22)$$

Avec  $y^*$  le spectre NBR modélisé et  $e_r^*$  est le  $r^e$  *endmember* sous sa forme NBR. Le paramètre d'abondance  $a$  respecte les contraintes ASC et ANC. Enfin,  $\eta^*$  exprime le bruit résiduel du spectre et l'erreur de modélisation.

La prochaine figure montre comment la relation non linéaire de l'approche NBRU exprime la sur-influence des matériaux sombres. Dans cette figure, cinq bandes  $s_i$  (disques noirs de l'axe des abscisses), de réflectance 1 %, 21 %, 41 %, 61 % et 81 %, sont mélangées deux-à-deux dans des proportions 50 %/50 %. Les résultats pour un mélange spectral par LMM classique sont indiqués par des disques blancs. La figure illustre la situation où chaque bande  $s_i$  est séparée de la bande suivante  $s_{i+1}$  d'une différence  $\Delta$  de 5 %. La transformation en ratios de bandes (Équation 21) est illustrée par la projection (traits continus) des valeurs  $s_i$  sur la courbe. Celle-ci correspond à un spectre continu de NBR pour des valeurs de  $s_i$  allant de 1 à 95 %. Les mélanges linéaires des ratios de bandes obtenus sont illustrés par des losanges blancs sur l'axe des ordonnées. L'écart entre ces résultats reprojétés dans l'espace de réflectance (losanges noirs) et les résultats des LMM (disques blancs) met en évidence la nature non linéaire du mélange et la sur-influence des *endmembers* sombres.

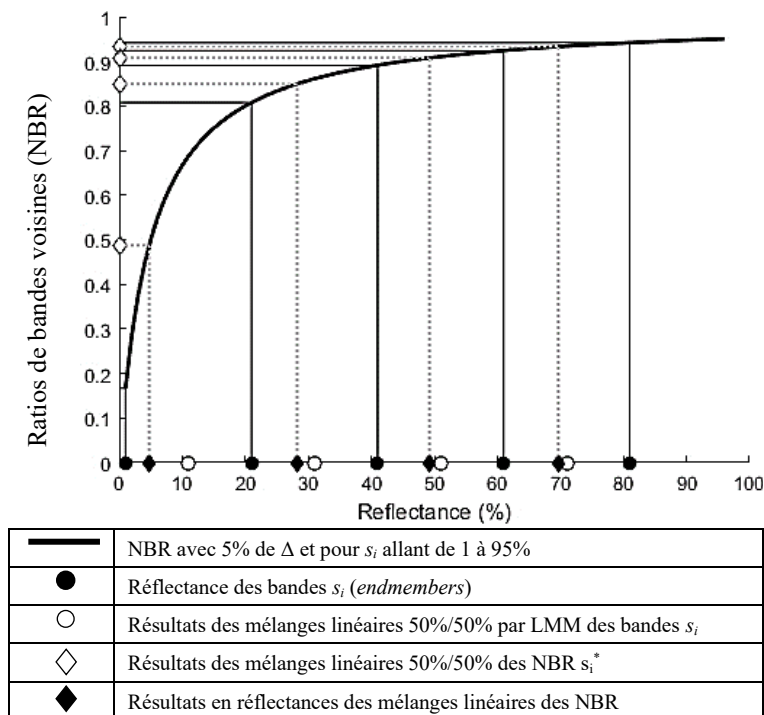


Figure 3.12 : Comparaison entre des mélanges linéaires de valeurs de réflectances (disques blancs) et des mélanges linéaires de ratios de bandes NBR (losanges noirs).

L'intérêt de la méthode NBRU pour démixer des surfaces rocheuses est double. La première est son approche basée sur la forme des spectres plutôt que leur amplitude. Cette stratégie a montré ses avantages face à des *endmembers* variables du fait de différentes illuminations. La seconde est la relation non linéaire de la transformation en NBR, induisant une linéarisation du mélange spectral. Enfin, au contraire des MTR, cette approche ne requiert aucune information additionnelle sur les propriétés physico-chimiques des *endmembers* ou des surfaces à démixer.

## **B. Évaluation des performances quantitatives**

L'analyse des performances quantitatives des modèles LMM, PPNMM, MLM, Hapke (simplifié) et Shkuratov a été réalisée sur les spectres de mélanges de minéraux issus de la bibliothèque spectrale RELAB (voir section 3.2.1A).

Les spectres des minéraux purs étant utilisés comme *endmembers*, aucune variabilité spectrale n'est possible. Les performances des modèles à retrouver les proportions des minéraux dépend donc exclusivement de leur capacité à modéliser la relation abondance - influence spectrale.

Les abondances volumiques estimées des modèles de démixage sont converties en abondances massiques en utilisant les densités tirées de Mindat.org (2018) et Anthony et al. (2003). Pour chaque mélange, l'erreur moyenne d'estimation d'abondances est calculée par rapport aux abondances réelles.

Les démixages ont été réalisés à l'aide de la fonction Matlab *fminsearchcon*. Les contraintes ASC et ANC ont été appliquées pour tous les modèles. Pour chaque démixage, cinquante répétitions ont été réalisées afin d'éviter les minimums locaux.

## **C. Sensibilité des modèles face au problème de variabilité spectrale.**

La prochaine évaluation vise à comparer le comportement des modèles lorsque les *endmembers* utilisés ne correspondent pas aux matériaux présents dans la scène démixée. Pour rappel, l'image démixée est un sous-échantillon de 300 x 300 pixels d'une image AVIRIS de Cuprite (voir section 3.2.1B).



La liste des minéraux utilisés pour démixer l'image est basée sur les travaux de Swayze *et al.* (2014). Ce sont ainsi 14 minéraux qui sont considérés : alunite, buddingtonite, calcite, dickite, hématite, goethite, jarosite, kaolinite, opale, muscovite (micas blanc), nontronite, chlorite, calcédoine, et montmorillonite. Les *endmembers* pour ces 14 minéraux ont été tirés des bibliothèques spectrales de l'USGS *splib07* (Kokaly *et al.*, 2017) et ECOSTRESS (Meerdink *et al.*, s.d.). Pour chaque minéral, le *endmember* présentant la corrélation moyenne la plus élevée avec les spectres de l'image AVIRIS a été retenu. Le critère de corrélation est notamment utilisé dans les algorithmes de *sparse unmixing* de type *Matching Pursuit* (Mallat et Zhang, 1993).

Avant le démixage, les spectres des *endmembers* ont été rééchantillonnés pour correspondre aux bandes spectrales du capteur AVIRIS. Les spectres de l'image et des *endmembers* ont également été prétraités pour éliminer les régions bruitées du fait de l'absorption atmosphérique. Les bandes 106 à 114 (1344 à 1424 nm) et 152 à 168 (1802 à 1949 nm) ont ainsi été supprimées et remplacées par interpolation linéaire des bandes valides précédentes et suivantes (Figure 3.13).

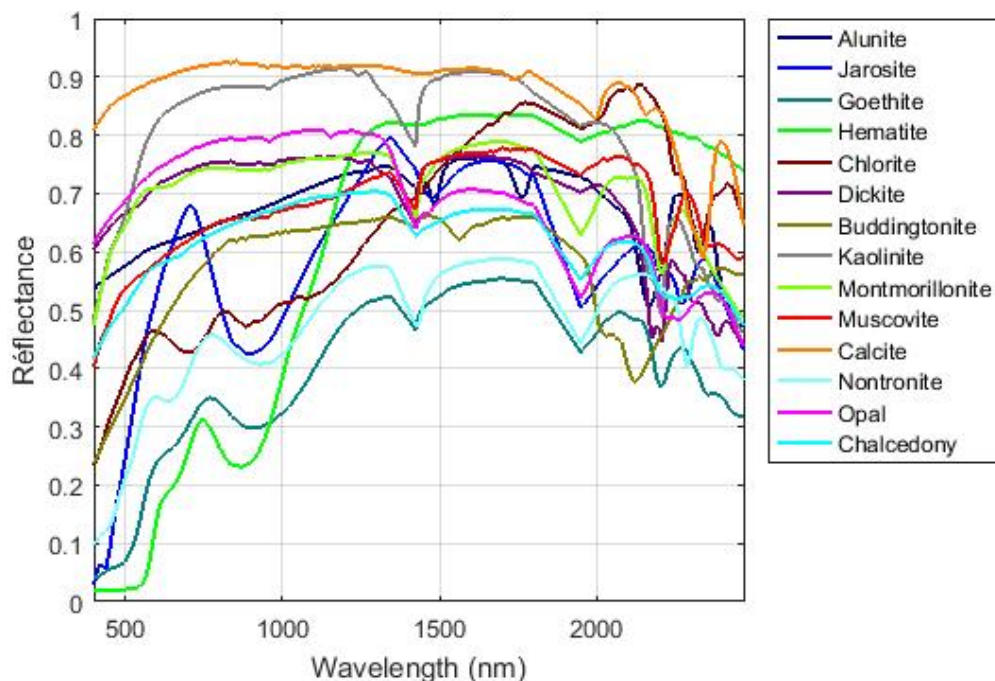


Figure 3.13 : Spectre des *endmembers* tirés des bibliothèques spectrales *splib07a* et ECOSTRESS, après conversion aux résolutions spectrales AVIRIS et remplacement des bandes bruitées. Le point est utilisé dans la figure à la place de la virgule comme symbole décimal.

Sous sa forme complète, le modèle de Hapke (et le modèle de Shkuratov) nécessite de connaître la partie imaginaire  $k$  des indices optiques des minéraux. Bien qu'elle puisse théoriquement être retrouvée par inversion du modèle, cette inversion nécessite malgré tout que les tailles des grains des échantillons soient connues dans des intervalles étroits, ou que plusieurs intervalles soient disponibles.

Dans les bibliothèques spectrales utilisées, pour huit des 14 minéraux recensés, seules huit tailles étaient renseignées de façon approximative. Les  $k$  ne pouvant être retrouvés pour ces minéraux, l'utilisation des MTR n'était donc pas possible pour démixer l'image AVIRIS. Par ailleurs, la présence de minéraux opaques, ici l'hématite, la goethite et la jarosite, rend le contexte de Cuprite inapproprié à l'application des deux MTR. En conséquence, seuls les modèles LMM, PPNMM, MLM et NBRU sont testés dans cette section.

Pour évaluer la robustesse des modèles face au problème de variabilité spectrale, les abondances estimées sont comparées à deux cartes de référence. Ces deux cartes (Figure 3.14 et Figure 3.15) sont extraites de Swayze *et al.* (2014). Elles sont les résultats de l'algorithme de cartographie minéralogique Tetracorder (Clark *et al.*, 2003) appliqué sur des spectres mesurés sur site, d'analyses minéralogiques en laboratoire, et de travaux préexistants (Swayze *et al.*, 2014).

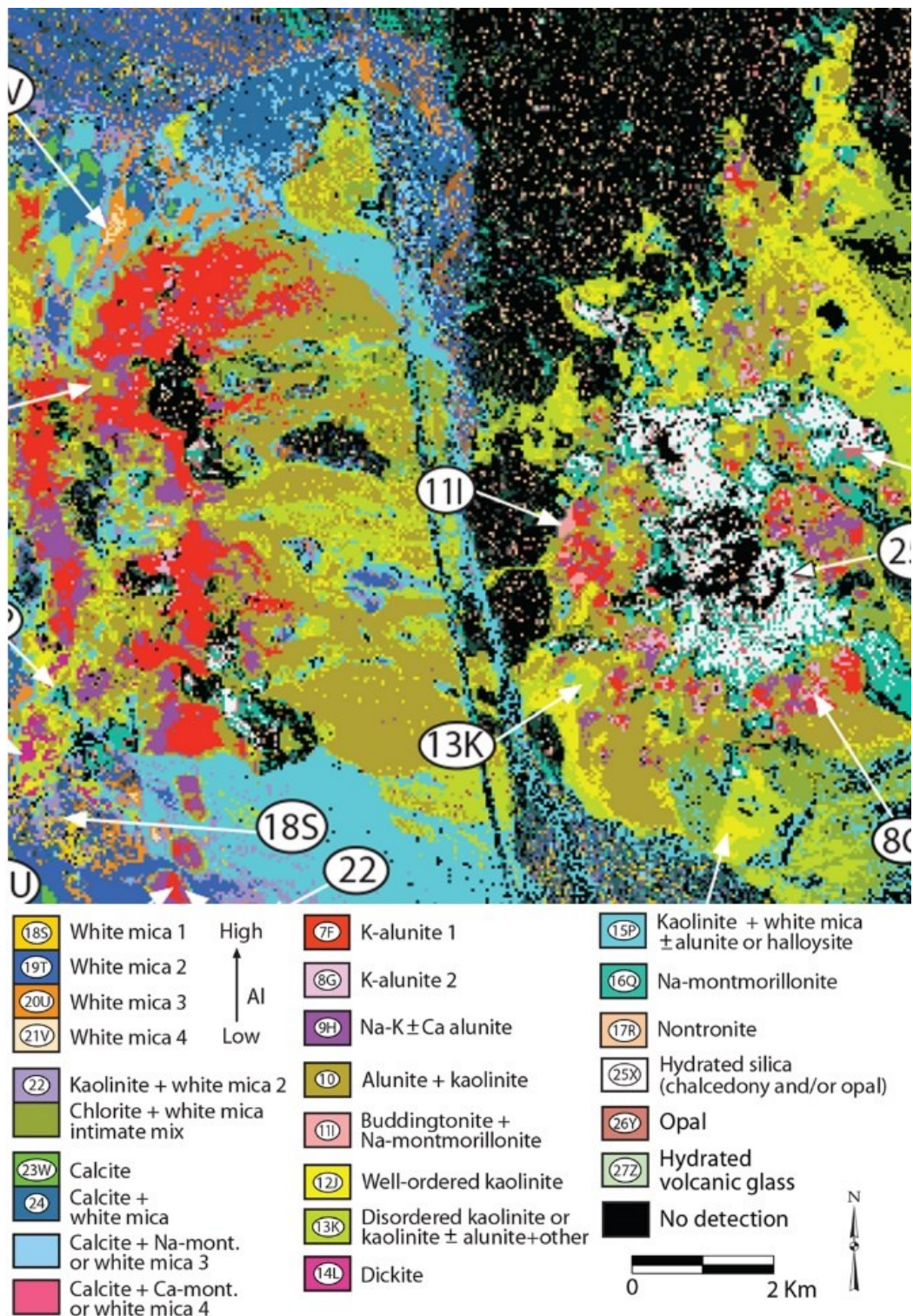


Figure 3.14 : Extrait de la carte minéralogique générée par l’algorithme Tetracorder (Clark *et al.*, 2003) issue de Swayze *et al.* (2014) montrant les argiles, micas, sulfates et carbonates spectralement dominants. Les flèches indiquent les localisations d’échantillons dans l’article d’origine.

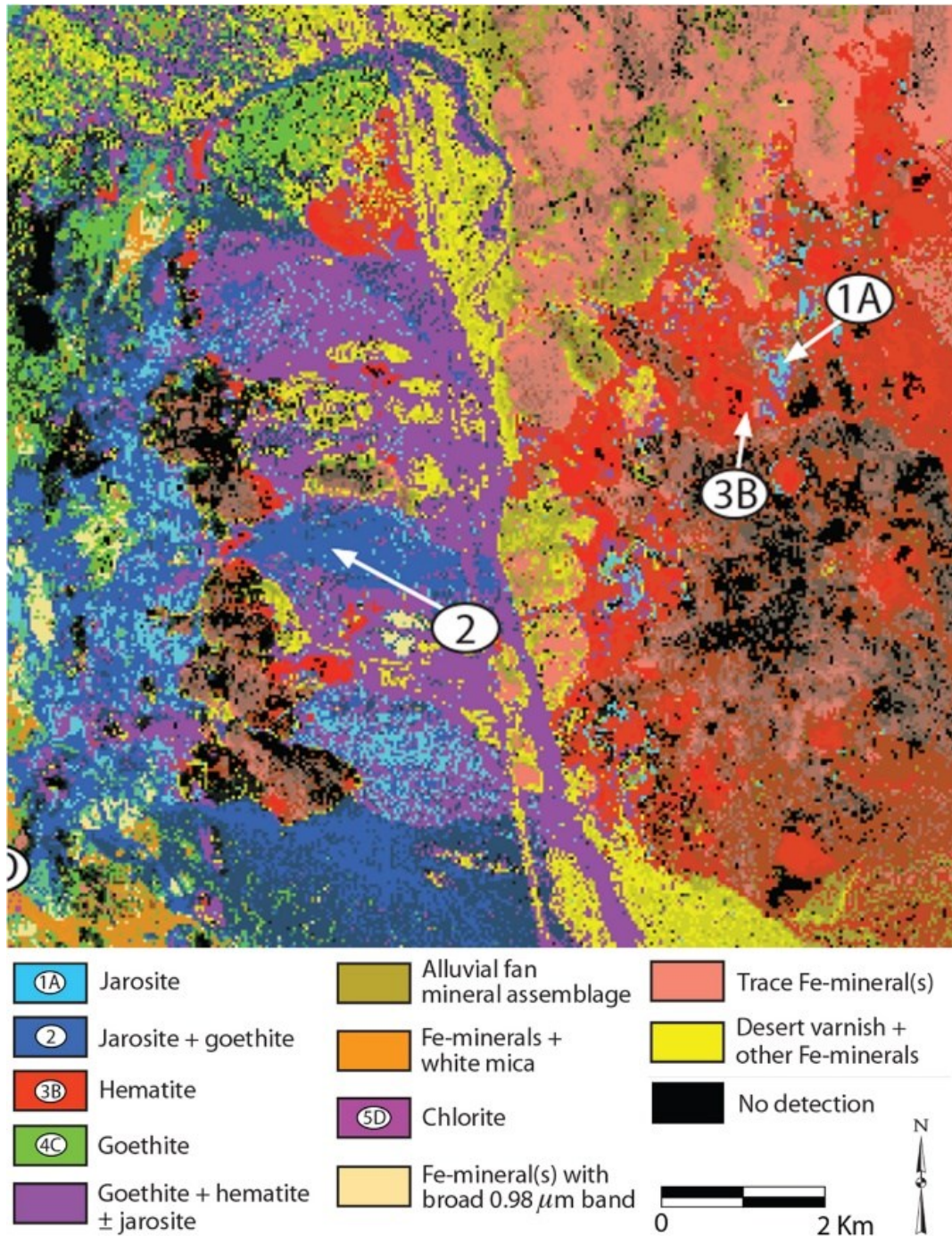


Figure 3.15 : Extrait de la carte minéralogique générée par l'algorithme Tetracorder (Clark *et al.*, 2003) issue de Swayze *et al.* (2014) montrant les minéraux contenant du fer spectralement dominants. Les flèches indiquent les localisations d'échantillons dans l'article d'origine.

Pour comparer les abondances du démixage aux informations spatiales qualitatives des cartes de référence, une étape de classification est préalablement nécessaire. Cette étape consiste à définir un seuil d'abondance au-delà duquel le minéral est considéré comme dominant. Une stratégie en deux étapes a été appliquée :

- 1) Extraction de la classe (couleur) de la carte (Figure 3.14 ou Figure 3.15) correspondant au minéral ciblé. Cette étape produit la classification binaire utilisée comme validation. Du fait que la classe *Calcite* a peu de pixels et que ceux-ci sont partiellement masqués par des éléments graphiques de la carte (flèche et numéro d'identification), la classe multiminérale *Calcite + white micas* y a été ajoutée. Seuls les minéraux montrant une distribution spatiale clairement identifiable dans les cartes de référence ont été considérés, à savoir : l'alunite, la buddingtonite, la calcite, la dickite, la goethite, l'hématite, la jarosite, la kaolinite et l'opale.
- 2) Une classification binaire par seuillage a ensuite été réalisée sur les résultats d'abondance de démixages. Pour chaque modèle et chaque minéral, le seuil avec le plus haut coefficient kappa a été sélectionné.

C'est sur la base de ces coefficients kappa et sur une appréciation visuelle des cartes obtenues que les modèles sont évalués.

### **3.3.2 Intégration de la fonction d'humidité dans le processus de démixage**

Après la sélection du modèle de démixage, celui-ci a été modifié pour tenir compte de l'influence de l'humidité. L'organigramme de cette étape est illustré dans la Figure 3.16 :

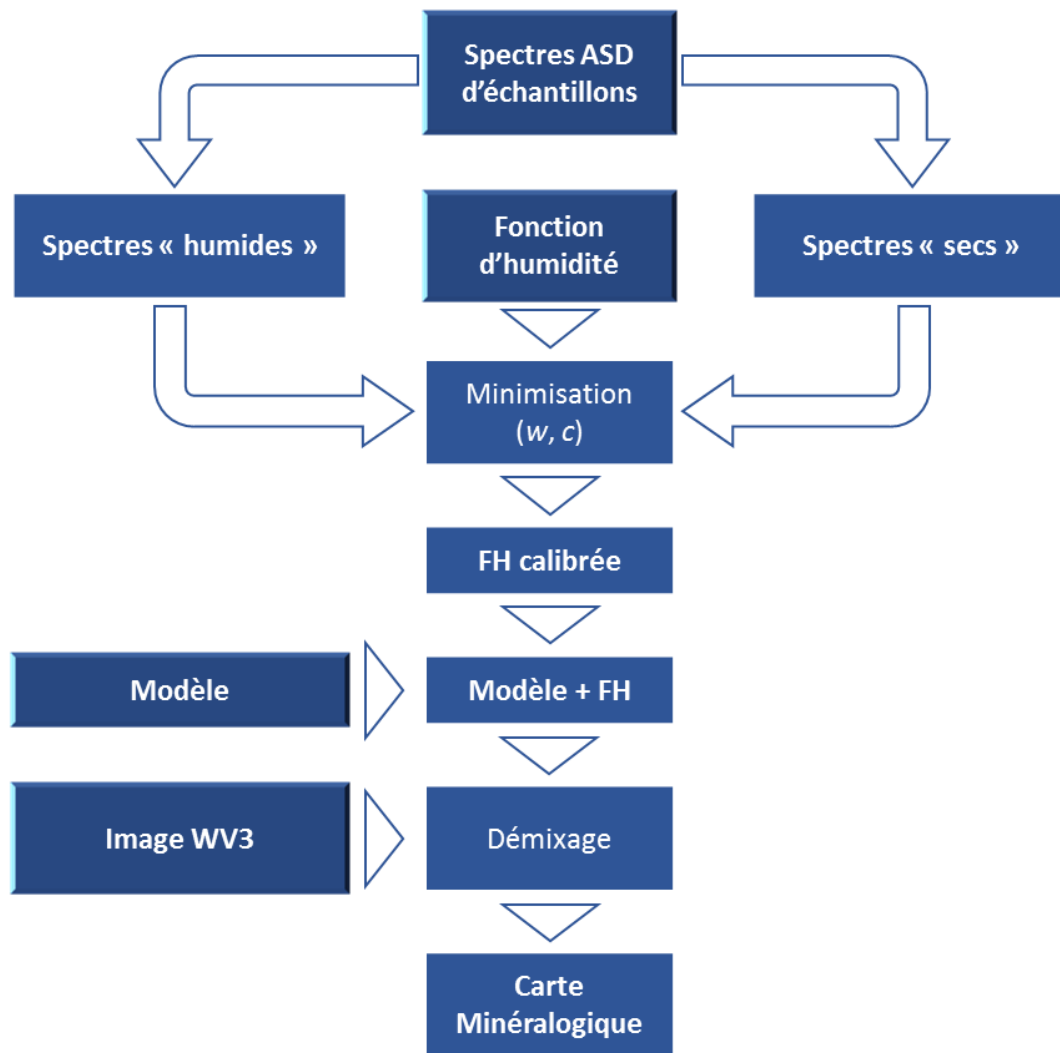


Figure 3.16 : Organigramme du processus de modification d'un modèle de démixage par calibration et intégration d'une fonction d'humidité.

### A. Modification du modèle de démixage

Pour composer avec ce problème d'humidité, la stratégie proposée est d'intégrer une fonction exprimant l'influence spectrale de l'humidité dans l'algorithme de démixage.

Comme l'objectif ici est de composer avec l'influence spectrale de l'eau sans en estimer la teneur, la fonction proposée est plus simple que la fonction exponentielle de Lobell et Asner (2002). L'équation est une relation linéaire dans laquelle un indice d'humidité estimé produit une influence spectrale en fonction de la longueur d'onde considérée :

$$s(w)_i = s_i - (w * c_i * s_i) \quad (23)$$

Où  $s(w)_i$  est le spectre de surface  $s$  subissant l'influence d'un indice d'humidité  $w$  pour la bande spectrale  $i$ . Le paramètre  $c_i$  quantifie le degré d'influence de l'humidité pour

la bande spectrale  $i$ . Dans le reste de ce document, les références à cette fonction se feront simplement sous le terme « *fonction d'humidité* », ou « FH ».

Au même titre que les abondances des *endmembers*, le facteur d'humidité estimé va avoir des conséquences sur la hauteur et la forme du spectre. Le démixage consistera donc à minimiser l'erreur de reconstruction du spectre en optimisant le facteur d'humidité en plus des abondances.

Le modèle retenu dans le volet précédent a ensuite été appliqué à une image hyperspectrale Worldview-3 de la mine Canadian Malartic. Sur base de Helt *et al.* (2014) et De Souza *et al.* (2015), six minéraux majeurs ont été sélectionnés : albite, quartz, orthoclase, biotite, clinochlore et muscovite. Dans le cas de l'image WV3, une stratégie différente de celle appliquée sur l'image AVIRIS a été utilisée pour sélectionner les *endmembers* des minéraux. Pour ce chapitre, les combinaisons de *endmembers* aboutissant aux meilleures reconstructions des spectres des deux échantillons secs ont été utilisées. Cette stratégie est celle appliquée dans les algorithmes de type MESMA (pour *Multiple endmember spectral mixture analysis*) (Roberts *et al.*, 1994).

Ce processus a abouti à la sélection de 11 *endmembers*, cinq des six minéraux ayant abouti à un *endmember* différent pour les deux échantillons.

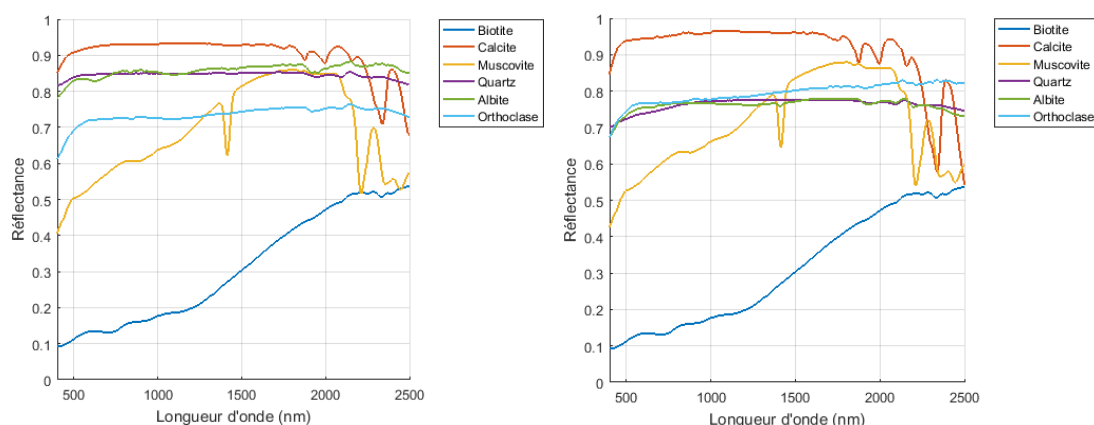


Figure 3.17 : Illustration des *endmembers* retenus par meilleure reconstruction des spectres des échantillons MG (gauche) et MP (droite). Le spectre de la biotite est commun aux deux échantillons.

Seule la biotite a un *endmember* commun aux deux échantillons. Les trois minéraux majoritaires, à savoir le quartz, l'albite et l'orthoclase ont tous les trois des spectres plats, avec peu de caractéristiques spectrales.

## **B. Calibration de la fonction d'humidité**

Dans cette étape, le modèle de démixage est combiné à une fonction linéaire reproduisant l'influence spectrale de l'humidité sur le spectre reconstruit lors du démixage (Équation 23). L'influence de l'humidité dépend cependant de la longueur d'onde considérée. Une étape préalable de calibration est donc nécessaire pour quantifier cette influence.

Le même processus de calibration que dans Lobell et Asner (2002) a été appliqué. Cette étape a consisté à définir les indices d'humidité  $w$  et les facteurs d'influence  $c$  (fonction de la longueur d'onde) qui permettaient de reconstruire, au plus près, les spectres [*des échantillons*] humides à partir des spectres [*des échantillons*] secs. Le processus de minimisation a été appliqué simultanément sur les 43 spectres du MG humide et les 61 spectres du MP afin de réduire la dépendance des résultats à l'échantillon. Au total, ce sont ainsi 2151 facteurs d'influence (un par bande spectrale) et 61+43 indices d'humidité qui ont été optimisés. Les indices d'humidité ont été contraints entre 0 et 1 pour en faciliter leur interprétation. Une fois le modèle calibré, celui-ci a été intégré au processus de démixage.

## **C. Intégration de la fonction d'humidité**

Dans le cas d'un modèle de démixage reconstruisant un spectre de réflectance comme le LMM, la stratégie consiste à considérer le spectre modélisé comme spectre sec  $s$  dans l'équation 23.

Pour l'approche NBRU, le spectre reconstruit est un spectre de ratios de bandes. L'alternative proposée est donc d'appliquer la FH directement sur les *endmembers*, avant leur transformation en NBR, et en amont de l'estimation de leurs abondances. Les *endmembers* ainsi « humidifiés » peuvent ensuite être transformés en spectres de NBR et utilisés dans le démixage par NBRU tel que décrit dans la section A.



Démixer un spectre de réflectance consiste donc à optimiser les abondances  $a$  et l'indice d'humidité  $w$  qui minimisent l'écart entre les spectres mesurés et les spectres reconstruits :

$$RMSE(s, y) = \sqrt{\|s - y\|_2^2} = \sqrt{\frac{1}{b-1} \sum_{i=1}^{b-1} (s_i - y_i)^2} \quad (24)$$

La méthode de démixage, combinée à la FH, a été testée sur les spectres des deux échantillons, de leur état saturé à sec. Cette première expérimentation a permis d'évaluer quantitativement l'influence de l'humidité sur les résultats et le gain apporté par la fonction d'humidité.

#### D. Évaluation du modèle de démixage modifié

Plusieurs situations ont été envisagées pour valider ou invalider l'intégration de la FH :

- 1) Le démixage a d'abord été appliqué sans l'ajout de la FH, afin d'évaluer son comportement face à une humidité variable. Les spectres ASD complets ont été utilisés.
- 2) Il a ensuite été testé en intégrant la FH afin d'évaluer sa contribution sur les résultats d'abondance. Ces deux premières expériences illustrent le cas d'analyse en laboratoire, où des données hyperspectrales sont disponibles et où celles-ci ne sont pas affectées par le phénomène d'absorption atmosphérique.
- 3) Un troisième test a été réalisé en combinant la FH mais en excluant les longueurs d'onde affectées par l'absorption atmosphérique, soit de 1300 à 1600 nm, et de 1800 à 2100 nm. Cette expérience illustre le cas de données hyperspectrales acquises en extérieur.
- 4) Un quatrième démixage a été réalisé sur les spectres convertis aux bandes WV3. Encore une fois, la FH n'a pas été intégrée afin de voir l'influence de l'humidité sur les abondances estimées. Pour ce test, les *endmembers*, les spectres des échantillons, et les facteurs d'influence  $c$  ont été convertis d'après les courbes de réponses radiométriques relatives du capteur satellite (Kuester, 2016).
- 5) Enfin, un dernier test a été réalisé sur les spectres convertis aux bandes WV3 en intégrant la FH.

Le démixage a ensuite été appliqué sur l'image WV3 de la mine. Pour cette application, les données brutes de l'image ont été converties en réflectance par régression linéaire avec les spectres ASD acquis au sol (voir section 3.2.1E). Les spectres de référence de 2151 bandes collectés dans la mine ont donc préalablement été rééchantillonnés d'après les courbes de sensibilité du capteur satellitaire (Kuester, 2016) :

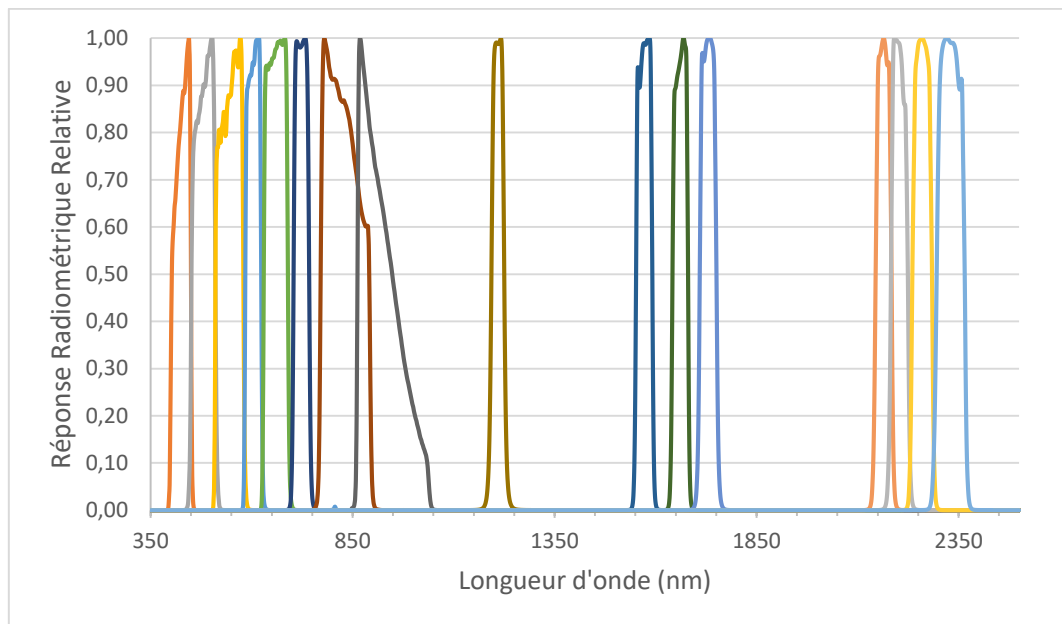


Figure 3.18 : Courbes des réponses radiométriques relatives des 16 bandes du capteur Worldview-3 (Kuester, 2016). La bande panchromatique n'est pas incluse dans la figure.

Les huit premières bandes de l'image ont ensuite été rééchantillonnées par convolution cubique pour correspondre à la résolution spatiale des huit bandes SWIR (7,5 m). Pour terminer, la zone de la mine a été extraite de l'image de 10 km x 10 km. Un masque a également été créé pour isoler le fond de la fosse du contour. C'est sur cette image de 131 x 261 pixels que l'ensemble du processus de démixage a été réalisé (Figure 3.19).



Figure 3.19 : Image RGB de la mine Canadian Malartic.

Dans le cas du démixage de l'image satellite, les résultats avec et sans l'ajout de la FH ont été comparés visuellement.

### **3.3.3 Interpolation des données géochimiques**

En milieu minier, les données géochimiques ponctuelles sont classiquement interpolées pour caractériser l'ensemble du gisement. Cette interpolation est donc reproduite dans cette thèse pour correspondre aux données utilisées dans la mine. Cependant, 114 échantillons sont largement insuffisants pour interpoler adéquatement un volume d'environ 1800 x 800 x 340 m. En conséquence, de nouveaux échantillons ont dû être simulés afin de pouvoir réaliser une interpolation pertinente et démontrer la faisabilité de l'approche proposée. C'est sur ce nouvel ensemble que sera appliquée l'interpolation par krigeage. La méthode de simulation et l'interpolation sont détaillées dans les sections ci-après.

#### **A. Simulation d'échantillons**

À partir de ce point, cette thèse quitte le domaine de l'étude strictement empirique et propose une approche davantage conceptuelle. De fait, les données géochimiques qui sont utilisées ne reflètent pas la réalité géologique, structurale et géochimique du gisement. En conséquence, les résultats intermédiaires et finaux obtenus ne reflèteront pas la réalité du site d'étude.

Pour que la démarche de fusion avec le démixage reste cohérente, ces échantillons simulés doivent cependant apporter une information sur la lithologie réelle. Pour ce faire, ceux-ci doivent respecter trois contraintes :

1. Cohérence géochimique : Un échantillon simulé appartenant à une lithologie donnée doit être cohérent géochimiquement avec cette même lithologie. Cette condition doit prendre en compte les valeurs en oxyde, mais également leurs interdépendances.
2. Cohérence spatiale avec les coupes lithologiques : Les lithologies des échantillons simulés doivent être cohérentes avec les sections du modèle lithologique (Figure 3.6).
3. Interpolabilité : La distribution dans l'espace de ces échantillons simulés doit s'inscrire dans une variation spatiale « interpolable ». En effet, la méthode la plus largement utilisée en milieu minier et retenue pour cette thèse est le krigeage. Or, celle-ci se base sur l'hypothèse que des échantillons sont d'autant plus similaires qu'ils sont proches. Une distribution aléatoire des échantillons irait à l'encontre de ce postulat.

C'est sous ces trois conditions que des échantillons avec leur géochimie, leur lithologie, et leurs coordonnées ont été simulés.

#### **a. Génération d'analyses géochimiques**

La géochimie des échantillons simulés s'appuie directement sur celle des 193 échantillons disponibles. Préalablement à la simulation de données, neuf échantillons aberrants ont été manuellement sélectionnés et supprimés. En outre, seuls quatre échantillons étaient disponibles pour la lithologie SGR. Ceux-ci ont été intégrés à la classe lithologique CGR du fait de leur similitude géochimique.

Un exemple de distribution géochimique pour les quatre lithologies est illustré dans la Figure 3.20 :

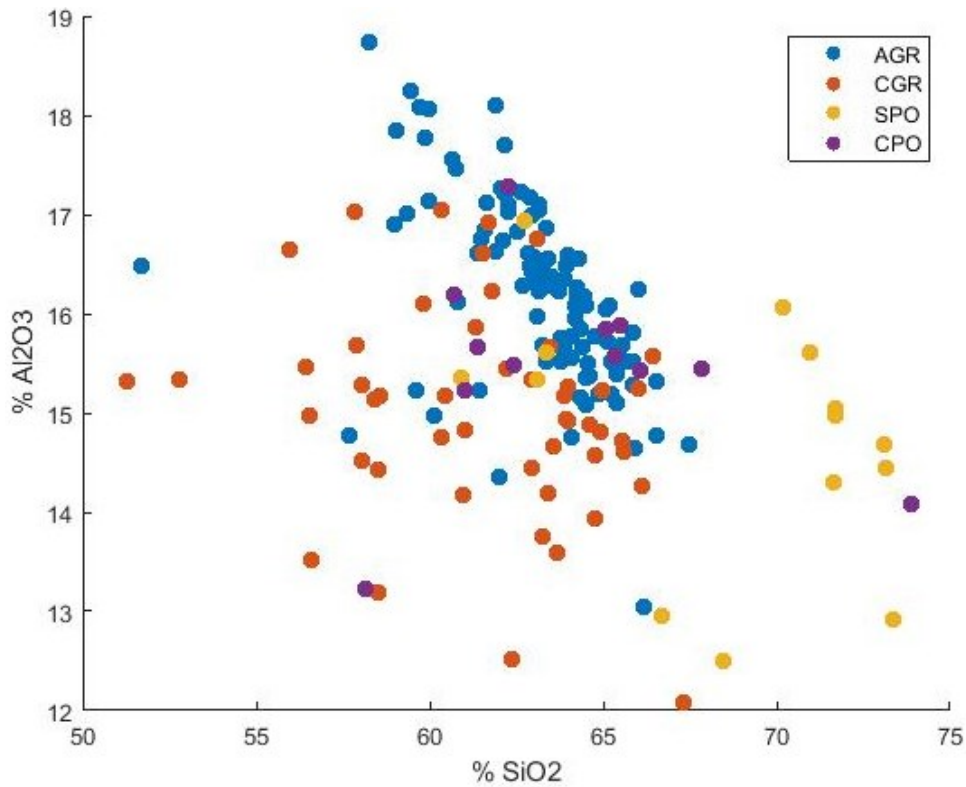


Figure 3.20 : Distribution des valeurs d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  et de  $\text{SiO}_2$  pour les 193 échantillons disponibles.

La première étape a d'abord consisté à estimer la fonction de distribution cumulative (FDC) pour chaque oxyde et chaque lithologie. À partir de cette fonction, les données ont été normalisées et redistribuées de façon uniforme.

Les distributions originales et transformées des valeurs en  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pour la lithologie AGR sont illustrées dans la Figure 3.21 :

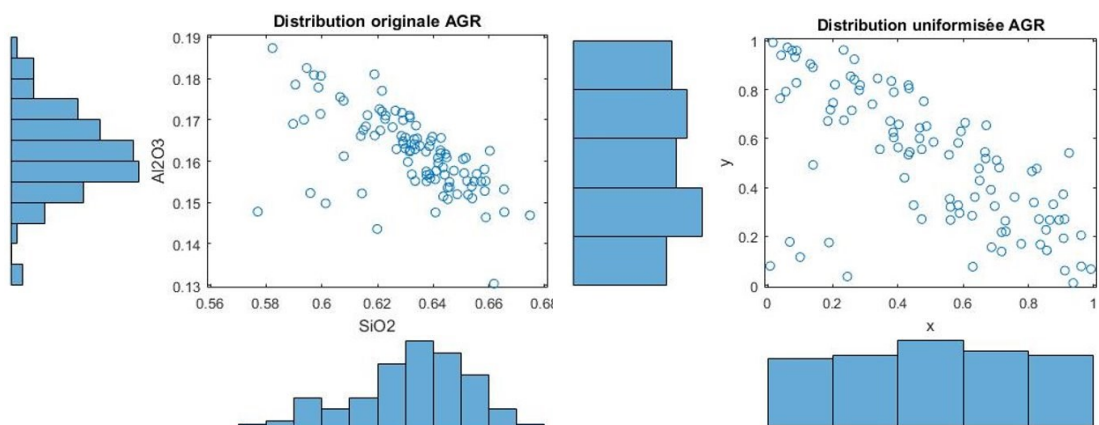


Figure 3.21 : Gauche : distribution originale en  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pour la lithologie AGR ; Droite : nouvelle distribution après normalisation et uniformisation.

Des échantillons virtuels ont ensuite été générés à l'aide de fonctions copules (Sklar, 1973) ajustées aux échantillons disponibles. Cette étape a été réalisée indépendamment

pour les échantillons de chaque lithologie. Les fonctions copules permettent de modéliser les interdépendances de variables aléatoires (Nelsen, 2007; Trivedi *et al.*, 2007). Ces fonctions ont ainsi été utilisées pour générer des échantillons aléatoires respectant l'interdépendance des oxydes.

Les distributions des nouveaux échantillons sont ensuite reprojctées via la FDC d'origine (méthode de transformée inverse (Devroye, 1986)). La méthode est celle proposée par le tutoriel Matlab de la fonction *copulafit*, d'après Bouy et al. (2000).

Afin d'envisager toute la diversité géochimique possible, pour chacune des quatre lithologies, un *pool* de 100 000 échantillons a été créé. Ce nombre a été estimé comme suffisamment grand pour atteindre cet objectif, sans affecter outre mesure les calculs subséquents. La génération d'échantillons virtuels et la transformation vers la distribution d'origine sont illustrées dans la Figure 3.22 ci-dessous :

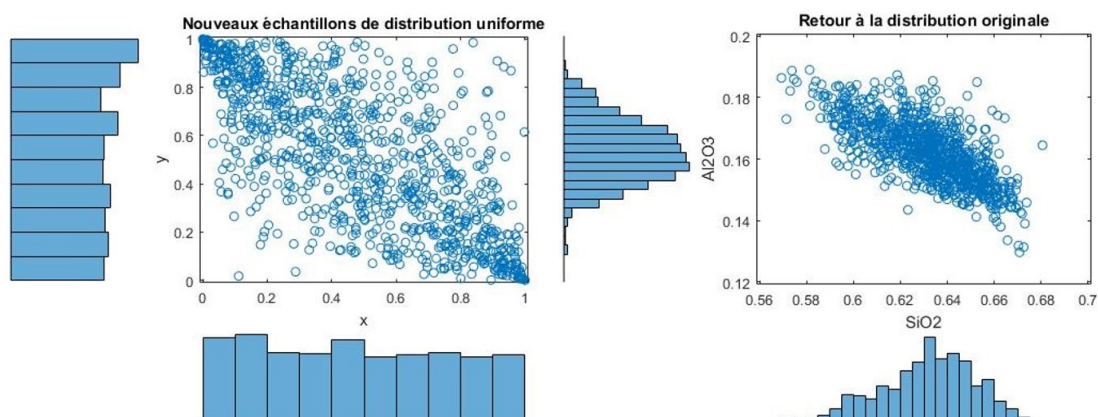


Figure 3.22 : Gauche : Mille échantillons simulés aléatoirement d'après la fonction copule, et de distribution uniforme. Droite : Reprojection des échantillons simulés vers la fonction de densité cumulée d'origine.

## b. Simulation d'une variation spatiale géochimique

La deuxième étape a consisté à simuler une variation spatiale géochimique que suivront les échantillons générés lors de l'étape précédente. Cette étape permet de rendre ces échantillons « krigéables », ce qui ne serait pas le cas d'une dispersion aléatoire. Les trois étapes du processus sont énumérées ci-dessous. L'ensemble est illustré dans l'organigramme de la Figure 3.23.

1. Sélection aléatoire de 300 points sur les cinq coupes lithologiques du modèle-bloc et identification de leur lithologie.

2. Pour chacun des 300 points, attribution d'une analyse géochimique simulée aléatoire correspondant à leur lithologie. Le nombre de 300 points a été estimé après plusieurs essais-erreurs.
3. Interpolation pondérée par la distance (IDW) de l'ensemble des 114 échantillons réels et des 300 échantillons virtuels. Les prédictions sont faites uniquement à hauteur des cinq coupes du modèle lithologique et à des intervalles de 7,5 m pour correspondre à la résolution de l'image satellite.

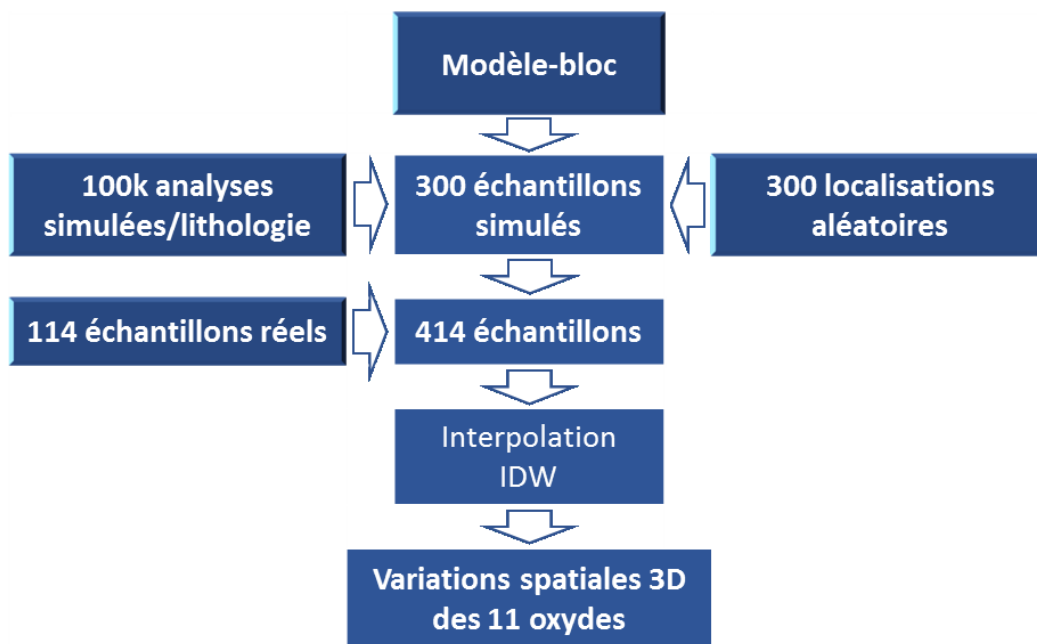


Figure 3.23 : Organigramme du processus de création d'une variation géochimique dans l'espace de la mine. Les flèches illustrent les intrants.

Dans le processus précédent, le nombre de 300 échantillons a été estimé par essai-erreur, cherchant le juste milieu entre un échantillonnage si dense qu'il reproduirait presque parfaitement le modèle bloc lithologique, et un échantillonnage si dispersé qu'aucune interface entre les lithologies ne pourrait être tirée de l'interpolation. Après plusieurs tentatives, il est apparu qu'un nombre de 414 échantillons s'est avéré nécessaire pour avoir une appréciation raisonnable des répartitions des lithologies et de leurs interfaces.

À noter que les échantillons de type grauwacke et de type porphyre ont été interpolés séparément. Ce choix de ne pas interpoler les deux types de roche dans un même ensemble est dû au fait qu'elles sont lithologiquement et donc géochimiquement distinctes. Cette stratégie a permis de produire une variation spatiale qui, bien que

géologiquement irréaliste, s'accorde raisonnablement avec les coupes lithologiques. Le résultat d'interpolation IDW pour MgO est illustré dans la Figure 3.24, à titre d'exemple.

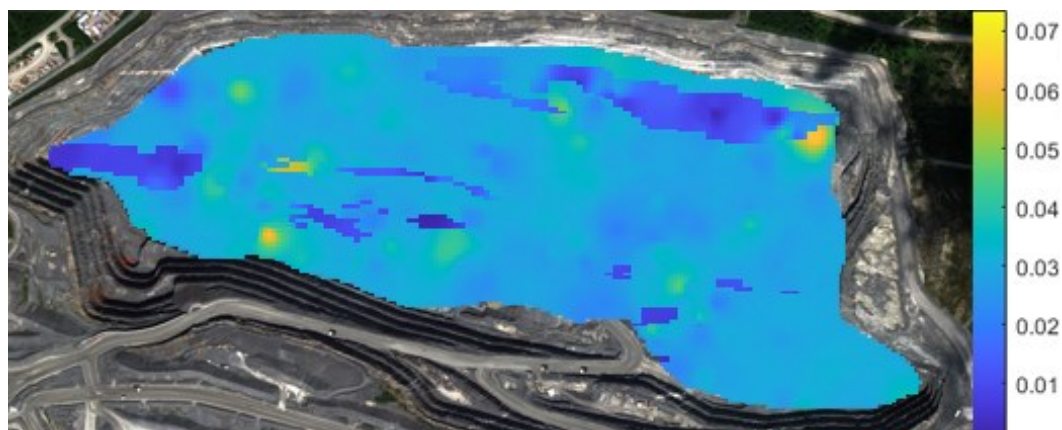


Figure 3.24 : Variation spatiale du MgO à 230 m d'altitude, générée par interpolation IDW de 414 échantillons (114 réels, 300 virtuels). Les discontinuités sont dues aux changements de lithologie metagrauwacke – porphyre.

### c. Génération de mailles d'échantillonnage

L'étape précédente a permis de générer une variation spatiale géochimique du gisement. Cependant, ces prédictions par IDW ne respectent pas l'interdépendance entre les oxydes.

La dernière étape a consisté à répartir les échantillons simulés par les fonctions copules selon des mailles régulières. Ces échantillons sont destinés à simuler un échantillonnage systématique qui aurait dû, en principe, être réalisé dans le cadre d'une étude de ce type. Cette distribution des échantillons s'est faite encore une fois en trois étapes, illustrées dans l'organigramme de la Figure 3.25. Pour chaque point de la maille d'échantillonnage :

1. Récupération de la géochimie générée par l'interpolation IDW (Figure 3.24).
2. Identification de la lithologie du point sur la coupe correspondante du modèle-bloc (Figure 3.6).
3. Recherche, dans le pool d'échantillons virtuels correspondant à la lithologie du point, de l'analyse la plus similaire à celle de l'interpolation IDW. La sélection s'est faite en recherchant le plus petit RMSE entre les géochimies issues de l'IDW et celles des analyses virtuelles. Les oxydes ont été préalablement



standardisés pour réaliser cette sélection, afin que chacun ait une influence égale.

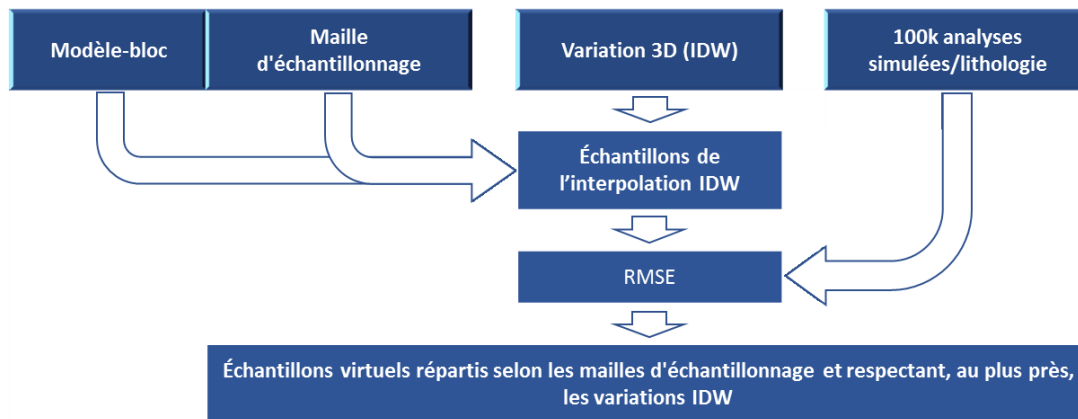


Figure 3.25 : Organigramme de la création d'une maille systématique d'échantillons simulés.

Cette dernière étape permet de s'assurer que les échantillons simulés suivent les variations spatiales générées par l'IDW tout en restant géochimiquement cohérents avec la lithologie du modèle-bloc.

Dix mailles d'échantillonnage ont été testées : 150x150x20 m, 120x120x20 m, 90x90x20 m, 60x60x20 m, 30x30x20 m, 150x150x10 m, 120x120x10 m, 90x90x10 m, 60x60x10 m et 30x30x10 m. À noter que la distribution sur l'axe Z ne peut se faire que sur les cinq élévations des sections disponibles du modèle lithologique, soit 200, 210, 220, 230 et 240 m d'altitude. À noter également que la distribution sur les axes X et Y en multiples de 7,5 m a été choisie pour faciliter la fusion des résultats avec ceux du démixage de l'image WV3. Ce dernier point conclut cette (importante) section destinée aux données géochimiques et à leur traitement.

## B. Interpolation des échantillons par krigeage

Un krigeage a ensuite été réalisé sur les échantillons des différentes mailles. Le krigeage appliqué ici s'appuie sur plusieurs simplifications. Ainsi, la faille de Sladen dans le nord de la fosse forme une barrière structurale, une discontinuité dans le gisement. Cette faille n'a cependant pas été considérée dans la simulation d'échantillonnage et dans le krigeage. De plus, comme mentionné précédemment, les intrusions porphyriques et les metagrauwackes sont minéralogiquement distincts. Cet aspect n'a pas non plus été pris en compte dans le krigeage et les prédictions ont été faites en interpolant, sans distinction, les échantillons des deux roches.

La méthode d'interpolation la plus largement utilisée en milieu minier est le krigeage ordinaire (Abzalov, 2016; Rossi et Deutsch, 2013). Un krigeage ordinaire nécessite que les variables interpolées respectent les conditions de stationnarité de premier et de deuxième ordre (Arnaud et Emery, 2000; Hengl, 2007, 2009). Cependant, puisque les échantillons sont interpolés sans distinction de lithologie, cette condition ne serait ici pas respectée. Pour contourner cette difficulté, c'est un krigeage universel isotrope en trois dimensions qui a été réalisé. En krigeage universel, une régression est d'abord appliquée sur l'ensemble des points et dans tout l'espace du site d'étude. Un krigeage ordinaire est ensuite appliqué sur le résidu de cette régression. Les prédictions issues de l'interpolation sont ensuite additionnées aux résultats de la régression (Arnaud et Emery, 2000; Hengl, 2009). L'ensemble du processus a été réalisé avec le package *gstat*, sous le langage de programmation *R*.

### **3.3.4 Fusion des résultats de démixage avec les données géochimiques**

#### **A. Attribution des masses**

##### **a. Côté géochimie**

Pour cette thèse, une classification par arbre de décision avec ensachement (Breiman, 1996, 2001) a été appliquée. Ce choix est motivé par le fait que les résultats du classifieur peuvent être convertis en probabilités d'appartenance. Ce dernier point facilite considérablement le reste de la méthodologie puisque les probabilités correspondent directement aux masses utilisées en intrant du processus de fusion. Pour rappel, les quatre classes utilisées sont les lithologies AGR, CGR, SPO et CPO.

Le classifieur a donc été entraîné successivement avec les échantillons des différentes mailles d'échantillonnage et appliqué ensuite sur les prédictions du krigeage à hauteur du plancher. Le nombre d'échantillons varie de 4676 pour la maille de 30 x 30 x 10 m, à seulement 93 pour la maille de 150 x 150 x 20 m. Les résultats de classification sur les prédictions du krigeage sont comparés avec les lithologies du modèle à hauteur du plancher (Figure 3.6). À noter que dans une situation réelle, un second ensemble d'échantillons, indépendant du jeu d'entraînement, serait nécessaire pour évaluer la classification.

Avant la fusion, les masses obtenues par la classification sont corrigées par un coefficient de fiabilité  $\alpha$  (Équation 11, section 2.2.2A.a). Dans le cadre de cette thèse,

ce coefficient doit exprimer l'aptitude de la source à fournir une appréciation d'appartenance correcte des pixels aux classes lithologiques. Dans le cas des données géochimiques, une régression linéaire pondérée entre les probabilités d'appartenance définies par le classifieur et les précisions (proportions de bonne classification) réelles est d'abord calculée. La pente de cette régression linéaire, qui renseigne sur l'aptitude du classifieur, et donc de la source, à fournir des probabilités réalistes, est utilisée dans l'estimation de la fiabilité. Cette pente est multipliée par le coefficient de détermination ( $R^2$ ) afin de tenir compte de la variation de cette fiabilité d'un pixel à l'autre.

#### **b. Côté télédétection**

Comme vu dans le chapitre introductif, le démixage, même dans des conditions optimales de laboratoire, ne permet pas de retrouver les abondances minéralogiques avec des précisions acceptables. Les abondances minéralogiques réelles des échantillons ne pouvant servir à entraîner la classification, la stratégie choisie est d'utiliser directement les résultats de démixage. Dans ce cas de figure, on fait donc l'hypothèse qu'un certain nombre d'échantillons ont été collectés en surface et leur lithologie identifiée. Avec une telle stratégie, la classification sera d'autant meilleure que le nombre d'échantillons est élevé. Comme pour la géochimie, différents nombres d'échantillons sont testés.

Seuls les pixels dont le facteur d'humidité  $w$  était inférieur à 0,1 ont été considérés pour l'entraînement. Le modèle lithologique de la mine à hauteur du plancher (Figure 3.6) a été utilisé pour identifier la lithologie des pixels sélectionnés et évaluer les performances de classification.

Dans le cas du démixage, le critère de fiabilité doit tenir compte des zones d'humidité élevées au sol, qui n'ont pas été intégrées dans le processus d'entraînement. Pour cette source, c'est donc la formule  $Pente * R^2 * (1-w)$ , où  $w$  est le facteur d'humidité du pixel estimé lors du processus de démixage, qui est utilisée.

#### **B. Fusion des masses, probabilité pignistique et décision**

Les données géochimiques et l'image satellitaire démixée fournissent chacun un jeu de masses pour chaque pixel et pour chacune des quatre lithologies. Ces jeux de masses, pondérées par la fiabilité des sources, expriment un degré de confiance dans

l'appartenance des pixels à ces lithologies. La fusion des masses est appliquée en utilisant la règle de combinaison PCR5 (Équation 13, section 2.2.2B).

Une transformation pignistique généralisée (Équation 16, section 2.2.2C) est ensuite appliquée sur les résultats de la fusion afin d'établir un degré de croyance envers chaque lithologie. La lithologie ayant obtenu la plus haute probabilité pignistique a été retenue dans l'étape de décision. Ces étapes sont illustrées dans l'organigramme suivant. Une interprétation de cet organigramme suit tout de suite après.

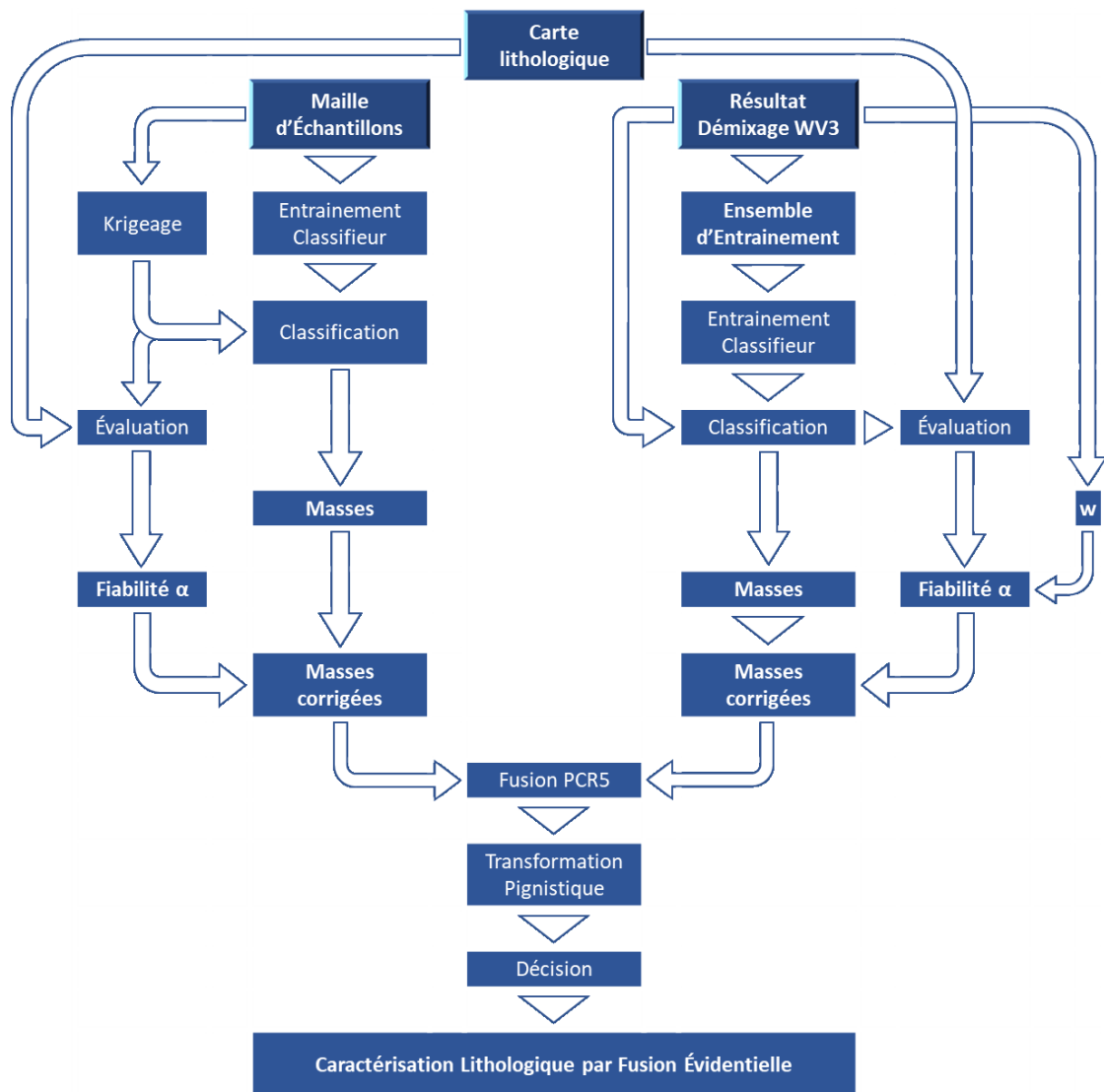


Figure 3.26 : Organigramme des processus de classification et de fusion des données. Côté géochimie (gauche, Figure 3.26), les échantillons de la maille sont krigés et utilisés pour entraîner un classifieur. Ce classifieur entraîné est ensuite utilisé pour la classification des prédictions du krigage. Chaque point se voit donc attribuer un score

- une masse - pour chaque lithologie. Les performances du classifieur sur les valeurs prédites sont ensuite évaluées par comparaison des lithologies obtenues avec celles de la carte de référence (Figure 3.6). Les résultats sont ensuite évalués en comparant par régression linéaire les probabilités d'appartenance attribuées par le classifieur avec les précisions réelles de classification obtenues. La pente et le coefficient de détermination de cette régression sont utilisés dans le critère de fiabilité  $\alpha$ . Enfin, ce dernier est utilisé pour corriger les masses de la source.

Côté démixage (droite, Figure 3.26), un jeu d'entraînement est extrait des résultats de démixage de façon aléatoire. Ces pixels, de lithologie connue grâce à la carte lithologique, sont utilisés pour entraîner un classifieur. Comme pour la géochimie, le classifieur est ensuite appliqué sur toute l'image démixée. La classification est ensuite comparée à la carte de référence. La pente et le  $R^2$  de la régression linéaire entre scores du classifieur et précisions de classification sont multipliées entre eux ainsi qu'avec les indices d'humidité  $w$ . Le paramètre  $\alpha$  obtenu illustre ainsi la fiabilité du classifieur et dépend de l'humidité estimée au sol. Il est utilisé pour produire des masses corrigées par la fiabilité de la source.

Côté fusion (centre bas, Figure 3.26), les deux jeux de masses sont ensuite fusionnés par la règle PCR5 (Équation 13). Pour finir, une transformation pignistique est appliquée, dont la valeur maximum de chaque pixel définit la lithologie retenue.

## Chapitre 4. RÉSULTATS ET ANALYSE

### 4.1 Comparaison des performances des méthodes de démixage

Pour chaque mélange et chaque méthode de démixage, l'erreur d'estimation moyenne a été calculée entre les abondances réelles et celles estimées par démixage. Les histogrammes ci-dessous illustrent les distributions de ces erreurs pour chaque méthode. Les valeurs moyennes et médianes sont également présentées. Les résultats détaillés sont disponibles en Annexe B.

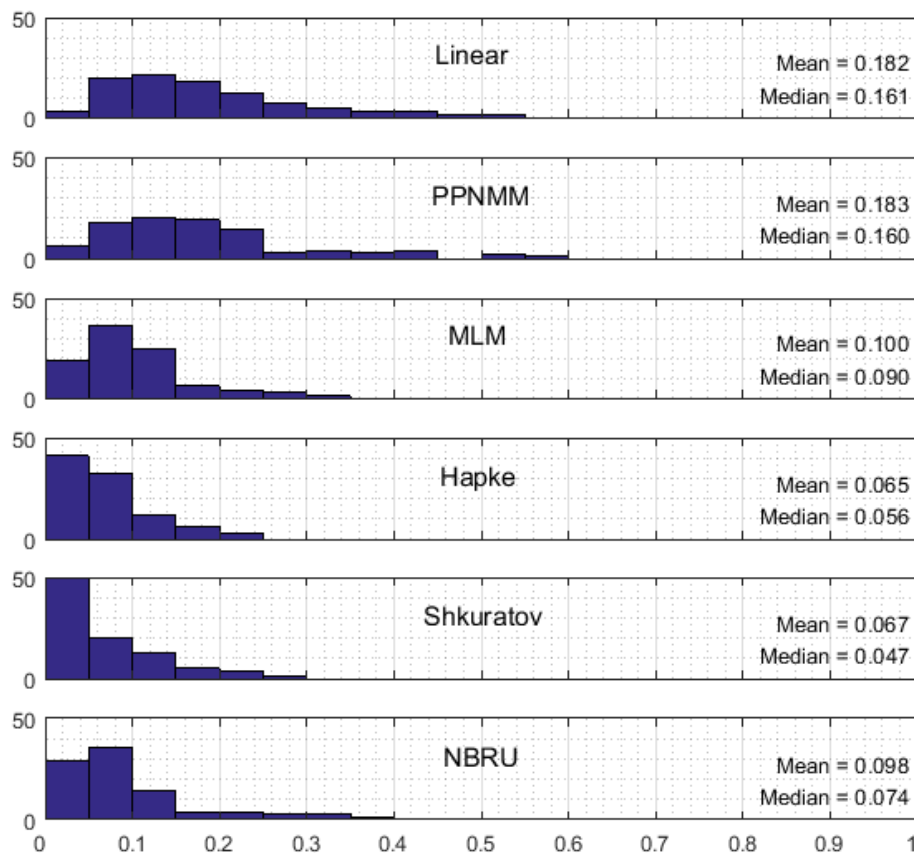


Figure 4.1 : Histogrammes des erreurs moyennes d'estimation par mélange, obtenues par les six méthodes de démixage. Les valeurs en abscisse correspondent aux erreurs d'abondances moyennes. Les valeurs en ordonnées correspondent aux fréquences de mélanges appartenant aux différentes classes d'erreur, répartis en intervalles de 5 % (0,05). Les valeurs moyennes et médianes des distributions sont également indiquées à titre d'information.

Dans la Figure 4.1, les MTR (Hapke et Shkuratov) se distinguent en concentrant les erreurs dans des valeurs inférieures à 25 % et des moyennes plus basses que les quatre autres méthodes. Au contraire, les méthodes LMM et PPNMM ont atteint des erreurs supérieures à 50 % et des moyennes proches de 18 %. MLM et NBRU obtiennent des

résultats intermédiaires, avec des erreurs dépassant 35 % pour NBRU et 30 % pour MLM.

Pour établir un classement des différentes méthodes selon leurs performances, celles-ci sont comparées d'après leur fréquence de meilleurs résultats :

Tableau 4.1 : Fréquence de meilleurs résultats obtenus par les six méthodes testées sur les 94 mélanges du RELAB.

| Modèles   | Fréquence de meilleurs RMSE |
|-----------|-----------------------------|
| LMM       | 3                           |
| PNMM      | 3                           |
| MLM       | 11                          |
| NBRU      | 19                          |
| Shkuratov | 23                          |
| Hapke     | 35                          |

Le tableau confirme les contrastes observés dans les histogrammes de Figure 4.1 avec une nette domination des MTR sur les résultats et des performances médiocres pour LMM et PPNMM. NBRU obtient un score proche du modèle de transfert radiatif de Shkuratov avec 19 meilleures estimations contre 23 pour ce dernier. Le modèle de Hapke se distingue en obtenant 35 meilleures estimations sur les 94 mélanges testés, soit le meilleur résultat des six méthodes.

Malgré la supériorité manifeste des MTR, des erreurs importantes subsistent. Les écarts les plus importants sont systématiquement ceux des mélanges calcite-chlorite et muscovite-quartz (Tableau 4.2 et 4.3). Pour les deux MTR, on y retrouve en effet des erreurs proches ou supérieures à 20 %. Les autres modèles voient également leur efficacité diminuée avec ces mélanges.

Tableau 4.2 : Erreurs moyennes des abondances obtenues par les six méthodes de démixage sur des mélanges binaires calcite-chlorite. Les spectres ont été mesurés par Carle M. Pieters avec les installations RELAB de la NASA.

|          | ID Relab   | XT-CMP-010 | XT-CMP-014 | Erreur moyenne d'estimation d'abondance |       |       |       |           |       | Meilleur |
|----------|------------|------------|------------|---|-------|-------|-------|-----------|-------|----------|
|          |            | Calcite    | Chlorite   | Linear                                  | PPNMM | MLM   | Hapke | Shkuratov | NBRU  |          |
| Mélanges | XT-CMP-011 | 0,75       | 0,25       | 0,460                                   | 0,547 | 0,218 | 0,181 | 0,215     | 0,298 | Hapke    |
|          | XT-CMP-012 | 0,5        | 0,5        | 0,340                                   | 0,392 | 0,154 | 0,136 | 0,151     | 0,198 | Hapke    |
|          | XT-CMP-013 | 0,25       | 0,75       | 0,213                                   | 0,229 | 0,125 | 0,163 | 0,130     | 0,141 | MLM      |
|          | XT-CMP-018 | 0,9        | 0,1        | 0,411                                   | 0,546 | 0,192 | 0,126 | 0,160     | 0,238 | Hapke    |
|          | XT-CMP-019 | 0,8        | 0,2        | 0,501                                   | 0,600 | 0,262 | 0,220 | 0,254     | 0,336 | Hapke    |
|          | XT-CMP-020 | 0,5        | 0,5        | 0,378                                   | 0,432 | 0,187 | 0,205 | 0,212     | 0,274 | MLM      |

Tableau 4.3 : Erreurs moyennes des abondances obtenues par les six méthodes de démixage sur des mélanges binaires quartz-alunite et quartz-muscovite. Les spectres ont été mesurés par Carle M. Pieters avec les installations RELAB de la NASA.

|          | ID Relab   | XT-CMP-001 | XT-CMP-005 | XT-CMP-009 | Erreur moyenne d'estimation d'abondance |       |       |       |           |       | Meilleur  |
|----------|------------|------------|------------|------------|---|-------|-------|-------|-----------|-------|-----------|
|          |            | Quartz     | Alunite    | Muscovite  | Linear                                  | PPNMM | MLM   | Hapke | Shkuratov | NBRU  |           |
| Mélanges | XT-CMP-002 | 0,75       | 0,25       | -          | 0,394                                   | 0,416 | 0,255 | 0,062 | 0,104     | 0,240 | Hapke     |
|          | XT-CMP-003 | 0,5        | 0,5        | -          | 0,276                                   | 0,311 | 0,103 | 0,013 | 0,022     | 0,185 | Hapke     |
|          | XT-CMP-004 | 0,25       | 0,75       | -          | 0,166                                   | 0,168 | 0,132 | 0,038 | 0,030     | 0,085 | Shkuratov |
|          | XT-CMP-006 | 0,75       | -          | 0,25       | 0,405                                   | 0,420 | 0,274 | 0,181 | 0,184     | 0,382 | Hapke     |
|          | XT-CMP-007 | 0,5        | -          | 0,5        | 0,365                                   | 0,365 | 0,303 | 0,234 | 0,209     | 0,320 | Shkuratov |
|          | XT-CMP-008 | 0,25       | -          | 0,75       | 0,227                                   | 0,231 | 0,189 | 0,184 | 0,136     | 0,215 | Shkuratov |

Une hypothèse pour expliquer ces erreurs est la non-représentativité des surfaces des mélanges par rapport à leur volume. De fait, les grains de chlorite croissent généralement sous forme d'aiguille alors que la muscovite est classiquement observée sous forme de feuillets (Anthony *et al.*, 2003). Du fait de ces formes particulières, réaliser des mélanges de minéraux avec des surfaces représentatives des proportions est difficile, voire impossible. Ils auront ainsi tendance à « surcouvrir » la surface des mélanges relativement à leur abondance, biaisant les algorithmes de démixage qui vont surestimer leur abondance. Cette différence est également en contradiction avec les hypothèses des deux MTR utilisés. Ceux-ci supposent en effet que les *endmembers* ont des formes de grains similaires (Hapke, 1981; Mustard et Pieters, 1987b; Shkuratov *et al.*, 1999).

Les méthodes LMM, PPNMM, MLM et NBRU ont également été appliquées sur l'image AVIRIS. Les cartes d'abondance ont ensuite été classifiées en définissant une valeur seuil qui maximisait le coefficient kappa avec les classes minérales (Figure 3.14 et 3.17). Ce coefficient a été proposé par Jacob Cohen en 1960 (Cohen, 1960) pour pallier au problème d'estimation en pourcents qui ne tient pas compte de la chance. Ses valeurs varient entre -1 et 1 et peuvent être interprétées selon le Tableau 4.4 ci-dessous (Landis et Koch, 1977). Les coefficients kappa obtenus sont présentés dans le Tableau 4.5 qui suit.

Tableau 4.4 : Interprétation des valeurs de kappa, d'après Landis et Koch (1977) :

|             |                     |
|-------------|---------------------|
| <0          | Aucune relation     |
| 0 – 0,20    | Relation faible     |
| 0,21 – 0,40 | Relation acceptable |
| 0,41 – 0,60 | Relation modérée    |
| 0,61 – 0,80 | Relation forte      |
| 0,81 – 1,0  | Relation parfaite   |



Tableau 4.5 : Coefficients kappa obtenus entre les classifications binaires des minéraux cartographiés et les cartes minéralogiques extraites de Swayze *et al.* (2014), utilisées comme référence.

|               | LMM   | PPNMM        | MLM          | NBRU         |
|---------------|-------|--------------|--------------|--------------|
| Alunite       | 0     | 0,074        | 0,439        | <b>0,652</b> |
| Buddingtonite | 0,147 | 0,009        | 0,640        | <b>0,651</b> |
| Calcite       | 0     | 0,048        | 0,037        | <b>0,469</b> |
| Dickite       | 0     | 0,087        | 0,047        | <b>0,419</b> |
| Goethite      | 0,015 | <b>0,050</b> | 0,002        | <b>0,050</b> |
| Hematite      | 0     | 0,007        | 0,243        | <b>0,389</b> |
| Jarosite      | 0     | 0,056        | <b>0,177</b> | 0,067        |
| Kaolinite     | 0,01  | 0,201        | 0,256        | <b>0,402</b> |
| Opal          | 0,042 | 0,067        | 0,032        | <b>0,187</b> |

Le tableau illustre l'échec du modèle linéaire LMM à retrouver les distributions spatiales des minéraux. Aucune amélioration n'est observable pour la méthode bilinéaire PPNMM par rapport au modèle linéaire. Les méthodes MLM et NBRU contrastent avec les deux modèles précédents en montrant des kappas nettement supérieurs pour la plupart des minéraux cartographiés. NBRU se démarque particulièrement en fournissant les meilleures distributions spatiales pour sept des neufs minéraux cartographié

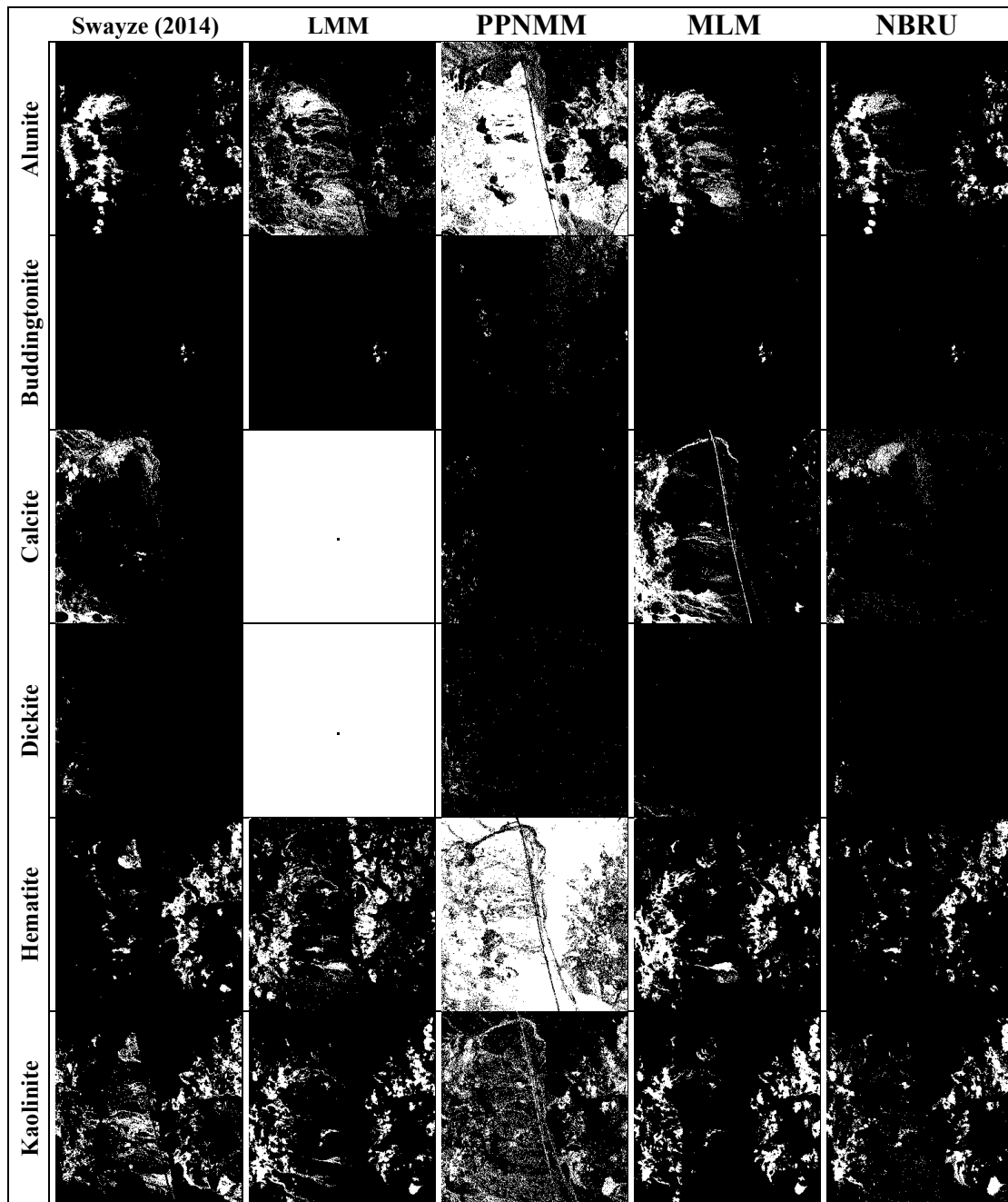


Figure 4.2 : Cartes minéralogiques obtenues par seuillage des cartes d'abondance des quatre méthodes de démixage.

Les distributions spatiales de la Figure 4.2 corroborent les résultats du Tableau 4.5, montrant des cartes minéralogiques pour MLM et NBRU plus cohérents avec celles obtenues par Swayze *et al.* (2014).

#### 4.2 Résultats de NBRU appliqué à l'image WV3 de la Mine Canadian Malartic et de l'intégration d'une fonction d'humidité

Sur base des résultats précédents, l'approche NBRU a donc été appliquée sur l'image WV3 de la mine en y intégrant une fonction d'humidité. Les résultats de calibration de

la FH sont d'abord présentés dans la section qui suit. Les spectres des échantillons utilisés pour la calibration ont ensuite été démixés avec et sans l'intégration de la FH (voir section 3.3.2D). Enfin, l'approche NBRU a été appliquée, avec et sans FH, sur l'image WV3.

#### 4.2.1 Résultats de calibration de la fonction d'humidité

La calibration de la FH a consisté à définir les indices d'humidité (pour chaque spectre) et les facteurs d'influence (pour chaque bande spectrale) qui reconstruisaient, au mieux, les spectres humides des deux échantillons à partir de leur spectre sec. Les valeurs obtenues pour ces deux paramètres sont présentées dans la Figure 4.3. Les spectres mesurés et reconstruits des deux échantillons sont illustrés dans les Figure 4.4 et 4.5.

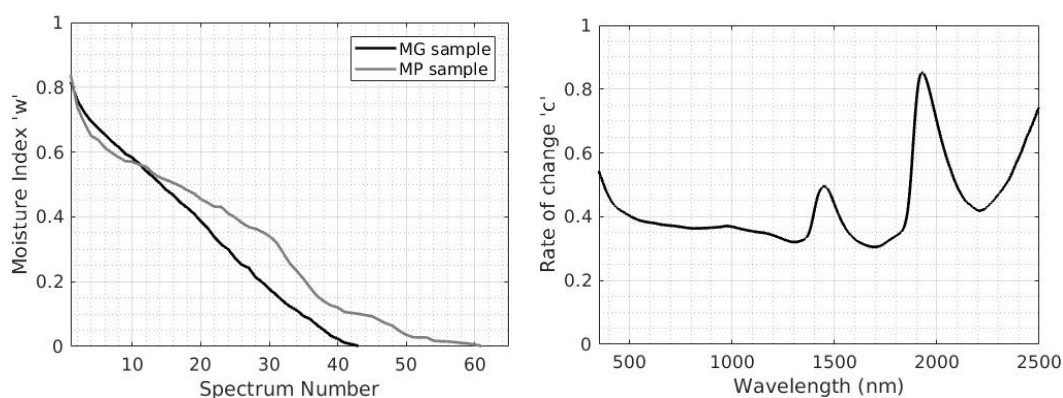


Figure 4.3 : Gauche : Indices d'humidité obtenus lors du processus de calibration. Les courbes montrent le passage progressif des échantillons de leur état saturé (spectre numéro un) à sec ; Droite : Facteur d'influence de l'humidité pour les 2151 bandes spectrales.

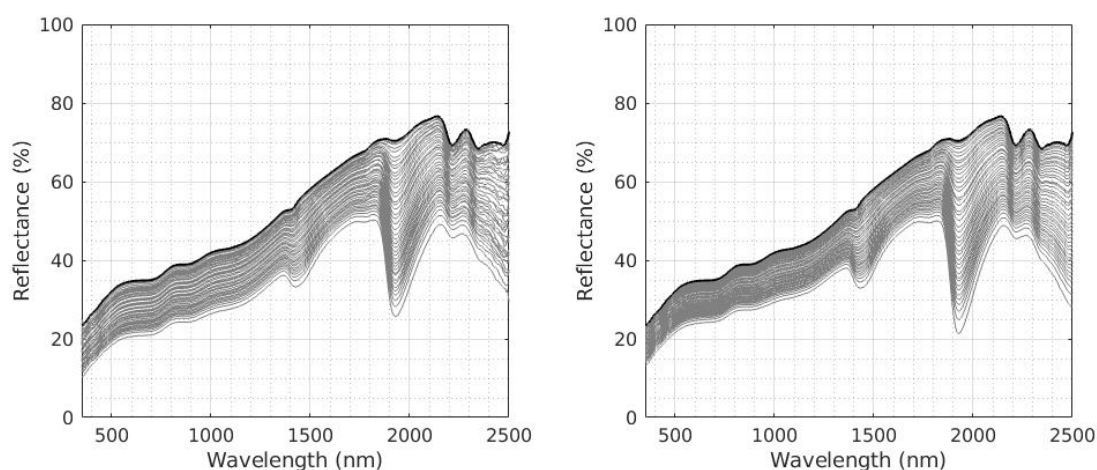


Figure 4.4 : Spectres de réflectance mesurés (gauche) et modélisés (droite) de l'échantillon MG. Le spectre de l'échantillon sec (ligne noire épaisse) est le paramètre  $s$  de la fonction d'humidité.

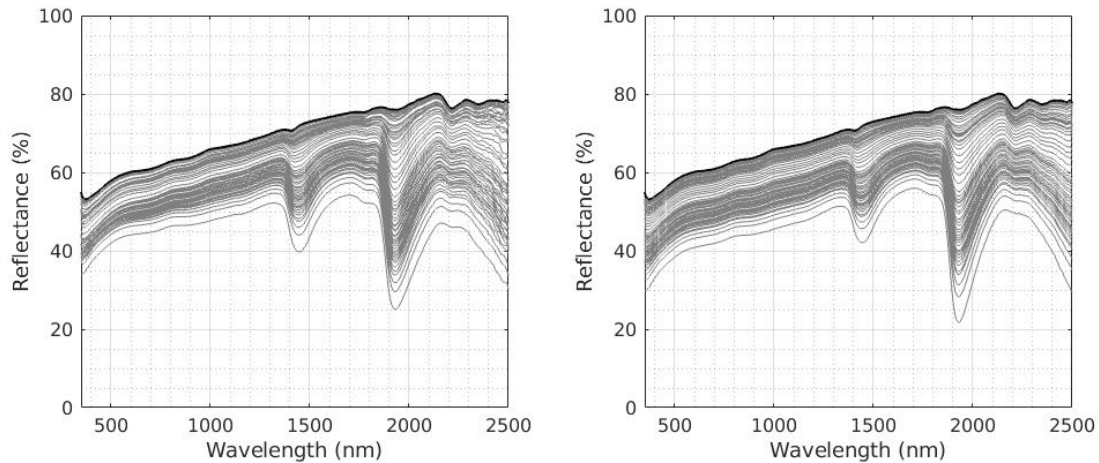


Figure 4.5 : Spectres de réflectance mesurés (gauche) et modélisés (droite) de l'échantillon MP. Le spectre de l'échantillon sec (ligne noire épaisse) est le paramètre  $s$  de la fonction d'humidité.

Les indices d'humidité de la Figure 4.3 (gauche) montrent une décroissance continue, cohérente avec le séchage progressif des deux échantillons. Les facteurs d'influence (droite) soulignent également les deux bandes d'absorption majeures de l'eau autour de 1400 et 1900 nm. Enfin, les spectres humides reconstruits lors de la calibration (Figure 4.4 et 4.5 ; droite) sont très similaires à ceux mesurés (gauche).

#### 4.2.2 Démixage des spectres des échantillons avec et sans la fonction d'humidité

Les spectres des échantillons ont ensuite été démixés par l'approche NBRU avec et sans l'intégration de la FH. Pour rappel, le démixage a été testé sur les spectres ASD complets, sur les spectres ASD sans les bandes d'absorption de l'eau, et sur les spectres rééchantillonnés aux bandes WV3. Les abondances minéralogiques retrouvées pour les spectres humides des deux échantillons (Figure 4.4 et Figure 4.5) sont illustrées dans les Figure 4.6 à 4.10 ci-dessous.

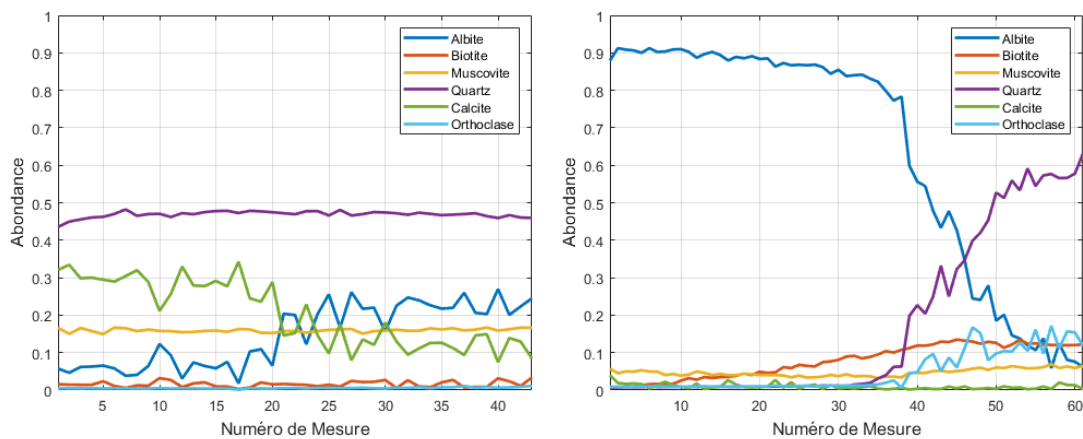


Figure 4.6 : Abondances minéralogiques estimées par l'approche NBRU sur les spectres ASD complets des échantillons MG (gauche) et MP (droite), de leur état saturé (première mesure) à sec. La FH n'a pas été intégrée dans le processus.

La Figure 4.6 met en évidence l'influence de l'humidité sur les abondances estimées par démixage. Pour les deux échantillons, les abondances d'albite sont particulièrement influencées. L'échantillon MP apparaît également beaucoup plus sensible, avec un remplacement progressif de l'albite au fur et à mesure du séchage par le quartz et, dans une moindre mesure, par l'orthoclase.

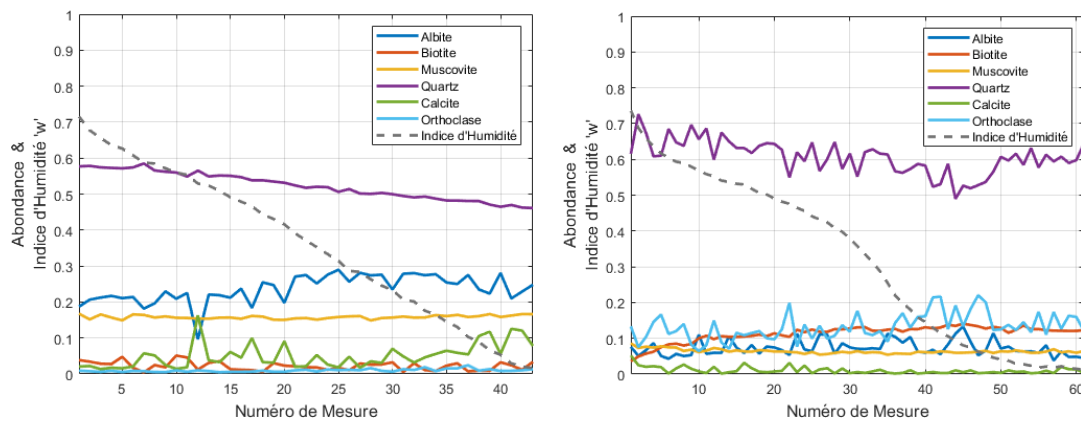


Figure 4.7 : Abondances minéralogiques estimées par l'approche NBRU avec FH sur les spectres ASD complets des échantillons MG (gauche) et MP (droite), de leur état saturé (première mesure) à sec.

La Figure 4.7 témoigne d'un net gain de la robustesse de l'approche NBRU+FH par rapport au seul NBRU. Les abondances n'y sont que peu affectées par les variations d'humidité. Par ailleurs, les décroissances des indices d'humidité, estimées simultanément avec les abondances, sont similaires à celles obtenues lors de la calibration (Figure 4.3). Une décroissance de l'abondance en quartz subsiste cependant pour les deux échantillons. Cette décroissance apparaît sensiblement supérieure que dans la Figure 4.6.

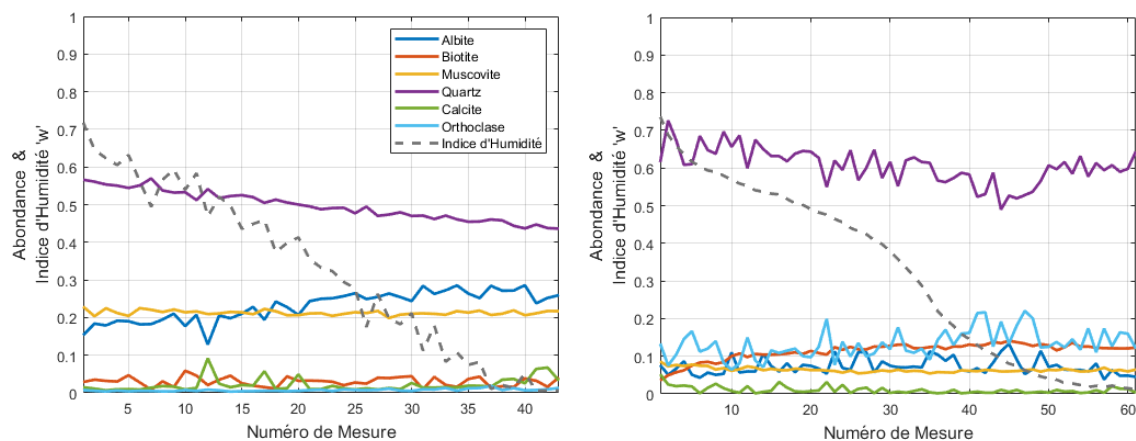


Figure 4.8 : Abondances minéralogiques estimées par l'approche NBRU avec FH sur les spectres ASD sans les bandes d'absorption de l'eau des échantillons MG (gauche) et MP (droite), de leur état saturé (première mesure) à sec.

Les abondances estimées par démixage ne sont que peu affectées par la suppression des régions spectrales des bandes d'absorption. L'évolution des abondances des deux échantillons sont similaires avec les abondances obtenues dans l'expérimentation précédente (Figure 4.7). Les indices d'humidité apparaissent plus bruités mais avec une tendance décroissante générale également similaire.

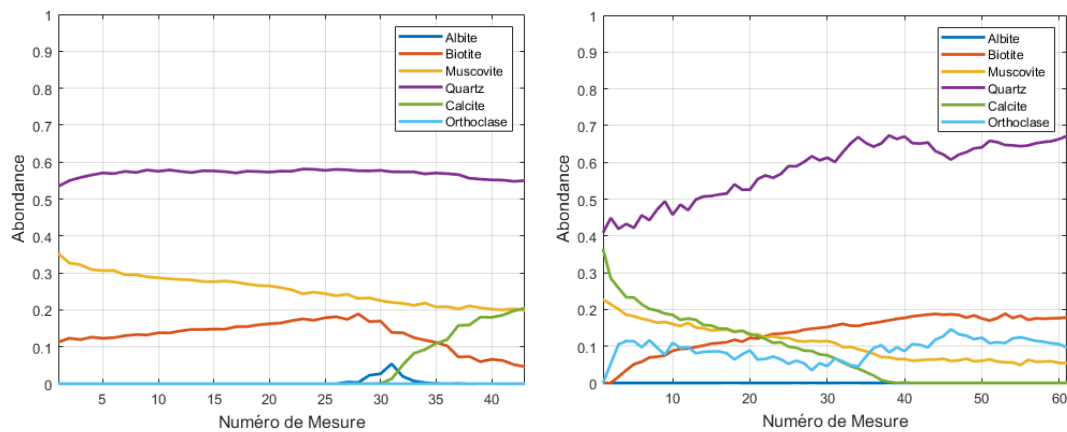


Figure 4.9 : Abondances minéralogiques estimées par l'approche NBRU sur les spectres WV3 des échantillons MG (gauche) et MP (droite), de leur état saturé (première mesure) à sec. La FH n'a pas été intégrée dans le processus.

Comme pour les spectres ASD (Figure 4.6) les abondances estimées par NBRU des six minéraux sur les spectres WV3 sont largement dépendantes de l'humidité. Ces abondances sont par ailleurs très différentes de celles obtenues avec les mesures hyperspectrales. L'albite et l'orthoclase apparaissent presque absents sur presque toutes les mesures de l'échantillon MG (gauche). Les abondances de la calcite montrent une tendance contraire pour les deux échantillons, n'apparaissant que pour les états le plus secs de l'échantillon MG, et les plus humides pour l'échantillon MP.

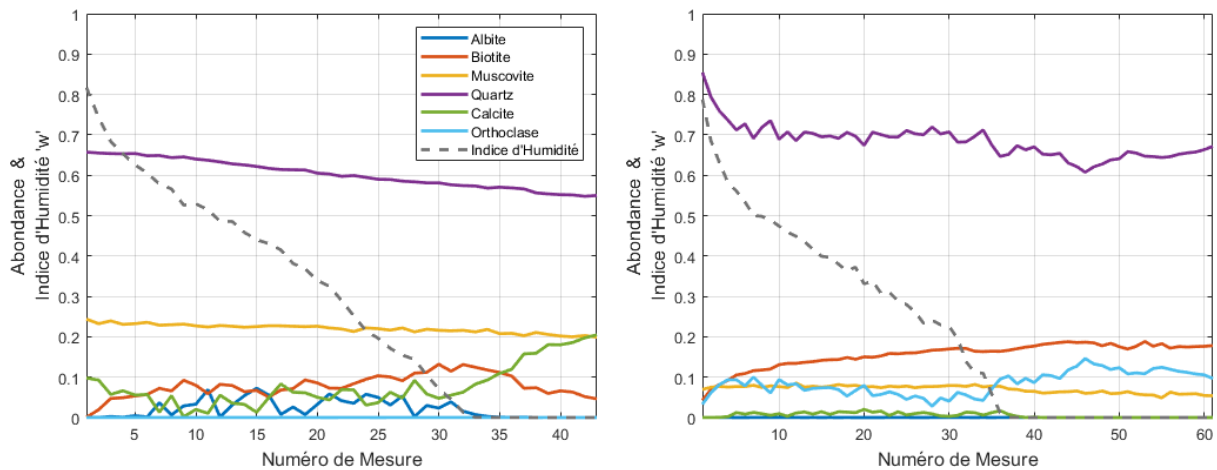


Figure 4.10 : Abondances minéralogiques estimées par l'approche NBRU avec FH sur les spectres WV3 des échantillons MG (gauche) et MP (droite), de leur état saturé (première mesure) à sec.

Enfin, la Figure 4.10 souligne encore une fois la plus-value apportée par la FH, avec des abondances moins affectées par l'humidité. Une nette influence subsiste encore cependant pour plusieurs de minéraux. À nouveau, les abondances estimées sont très différentes de celles obtenues avec les mesures hyperspectrales de l'ASD (Figure 4.7 et Figure 4.8).

Ces contrastes d'abondance de démixages entre les mesures hyperspectrales de l'ASD et les mesures rééchantillonnées aux bandes WV3 montrent l'impact de la résolution spectrale sur les résultats. Ainsi, l'information spectrale acquise par le capteur satellitaire apparaît insuffisante pour capturer l'information spectrale nécessaire à un démixage optimal.

Pour mieux quantifier l'importance du gain apporté par la fonction d'humidité, les deux prochaines figures (Figure 4.11 et Figure 4.12) comparent les différences d'abondances estimées pour les six minéraux :

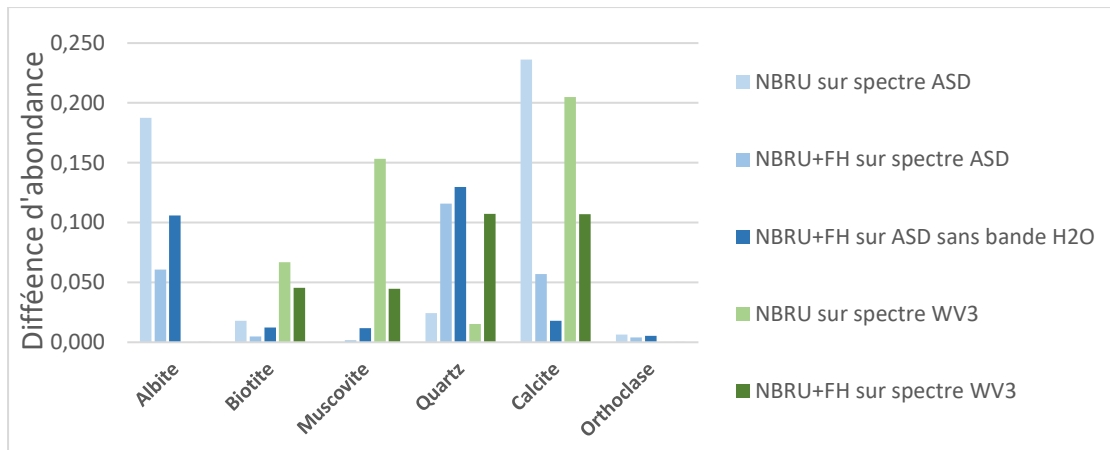


Figure 4.11: Écarts entre les abondances estimées par démixage des états saturés (première mesure) et secs (dernière mesure) lors des tests en laboratoire sur l'échantillon MG.

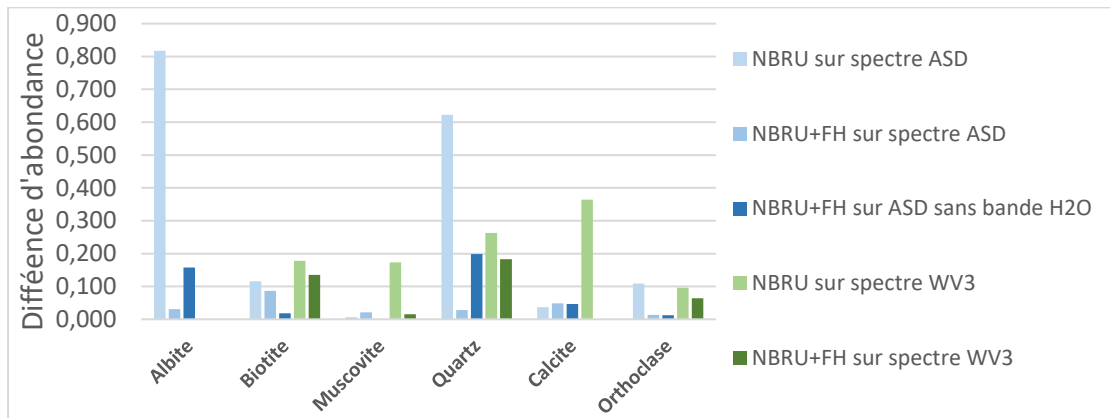


Figure 4.12 : Écarts entre les abondances estimées par démixage des états saturés (première mesure) et secs (dernière mesure) lors des tests en laboratoire sur l'échantillon MP.

Les différences d'abondance estimée entre les états saturés et secs pour les tests avec et sans FH montrent encore une fois nettement la contribution de cette dernière. Une exception cependant peut être observée pour les abondances estimées du quartz pour l'échantillon MG (Figure 4.11), où un accroissement sensible de l'effet de l'humidité est constaté. Ce minéral mis à part, le bénéfice de la FH reste manifeste, avec sur le spectre ASD complet, des écarts d'abondance entre les états saturés et secs inférieures à 10 %.

#### 4.2.3 Démixage de l'image WorldView-3

Après avoir été testé avec des données acquises en laboratoire, le démixage a été appliqué sur l'image WV3 de la mine. La Figure 4.13 met en évidence les chemins empruntés par les véhicules. Cette relation entre indice d'humidité et chemins de



circulation est liée à l'arrosage permanent appliqué par la compagnie pour limiter la génération de poussière.

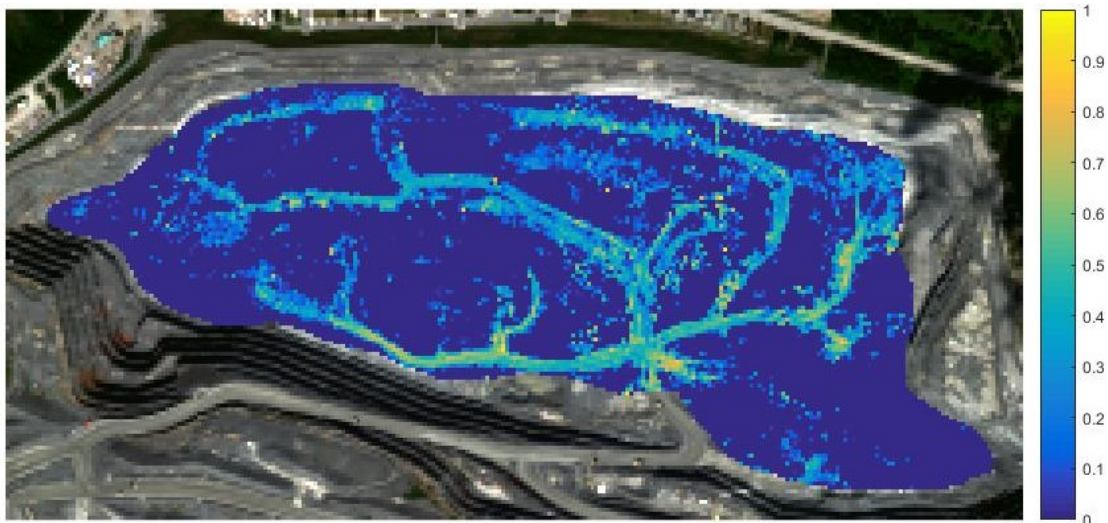


Figure 4.13 : Carte d'indices d'humidité  $w$  retrouvés par l'approche NBRU combinée à la FH.

La prochaine figure montre les cartes d'abondances obtenues. Pour rappel, 11 *endmembers* ont été utilisés dans le démixage pour les six minéraux considérés. Cependant, trois de ces *endmembers*, associés aux minéraux quartz, orthoclase et calcite, ont obtenus des abondances nulles pour toute la surface de la fosse. Ces cartes ne sont pas illustrées dans la Figure 4.14. Pour rappel, deux *endmembers* (un pour les lithologies GR et un pour les lithologies PO) ont été considérés pour chaque minéral, à l'exception de la biotite pour qui le *endmember* sélectionné est commun aux deux lithologies (voir section 3.3.2A).

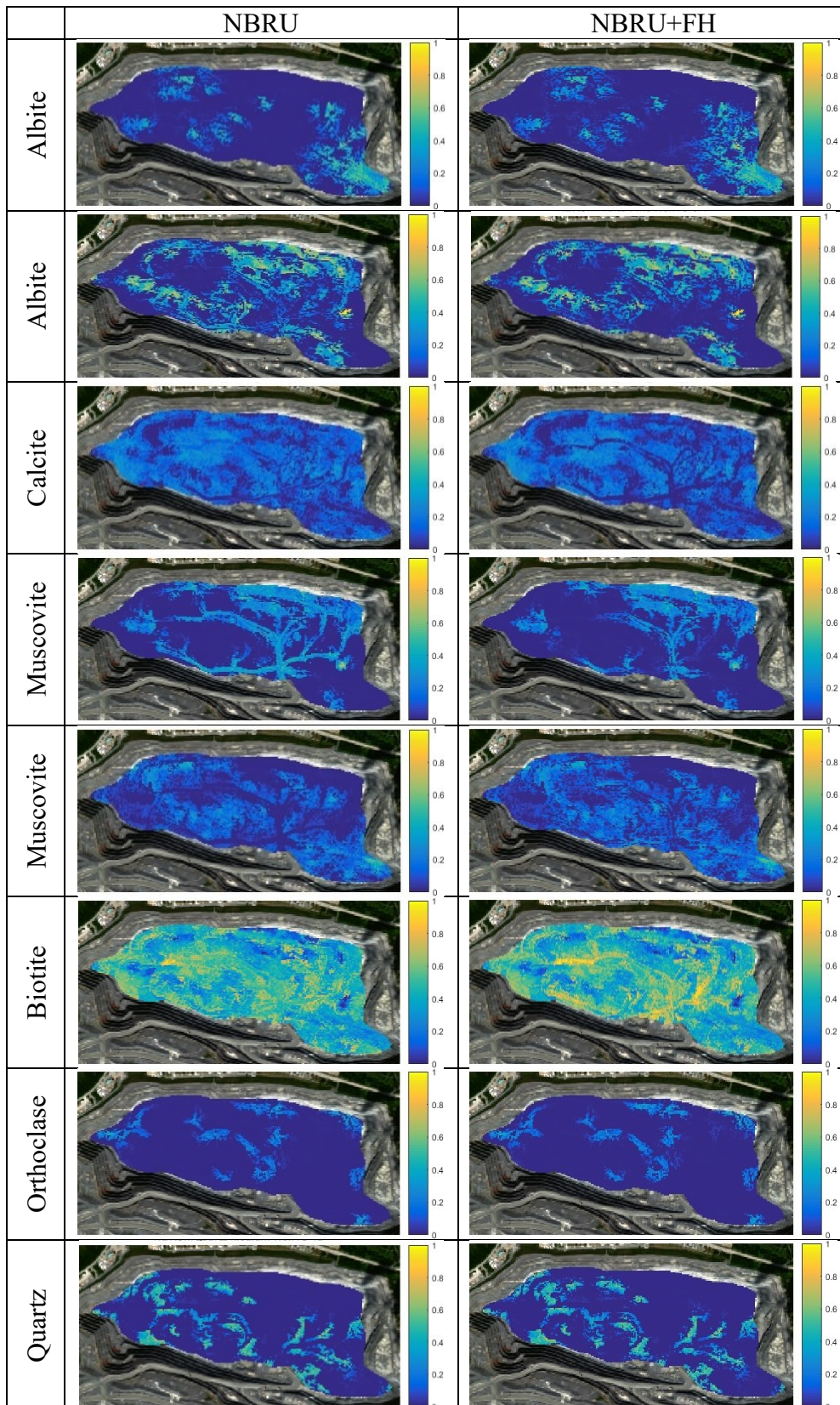


Figure 4.14 : Carte d'abondance de huit des 11 *endmembers* associés à six minéraux et utilisés dans le démixage de la mine. Les trois *endmembers* manquants ayant abouti à des abondances systématiquement nulles ne sont pas présentés. La colonne de gauche illustre les résultats de l'approche NBRU sans FH, et la colonne de droite, avec FH.

Les cartes d'abondance montrent un effet mitigé de la FH. Les abondances de la muscovite apparaissent nettement moins dépendantes de l'humidité avec l'intégration de la fonction. Les cartes d'albite affichent également de légères améliorations. À l'inverse cependant, les cartes de biotite et de calcite affichent des résultats plus contrastés au niveau des chemins. Les abondances d'orthoclase et de quartz ne semblent, elles, pas affectées par la modification de l'approche.

Les distributions spatiales des abondances des deux *endmembers* de l'albite et de la muscovite soulignent des zonations différentes. Particulièrement, une zone au nord-est se démarque nettement. Par ailleurs, les abondances de quartz semblent davantage dépendantes de la texture des surfaces, avec des zones d'abondance élevées aux endroits les plus sombres (voir Figure 3.19 pour la comparaison).

Bien que des zonations spatiales soient tirées des résultats de démixage, les valeurs d'abondance obtenues sont incohérentes avec la minéralogie connue de la mine (voir site d'étude, section 3.1). Ces cartes d'abondance forment la seconde source de donnée utilisée dans la fusion, conjointement avec les données géochimiques issues du krigeage.

### **4.3 Résultats des simulations d'analyses géochimiques et de leur interpolation**

Du fait du manque de données disponibles, les analyses géochimiques utilisées dans cette thèse sont les résultats de simulations produites sur base d'analyses réelles. Une première étape dans l'analyse de ces données consiste donc à évaluer la pertinence des fonctions copules utilisées ainsi que la validité des échantillons ainsi générés.

Les distributions marginales et les structures de dépendance des jeux de données réelles et simulées peuvent être évaluées visuellement par comparaison des nuages de points ainsi que de leurs histogrammes respectifs. Ici, seules les paires d'oxydes montrant une corrélation importante ont été considérées dans l'évaluation (Figure 4.15) :

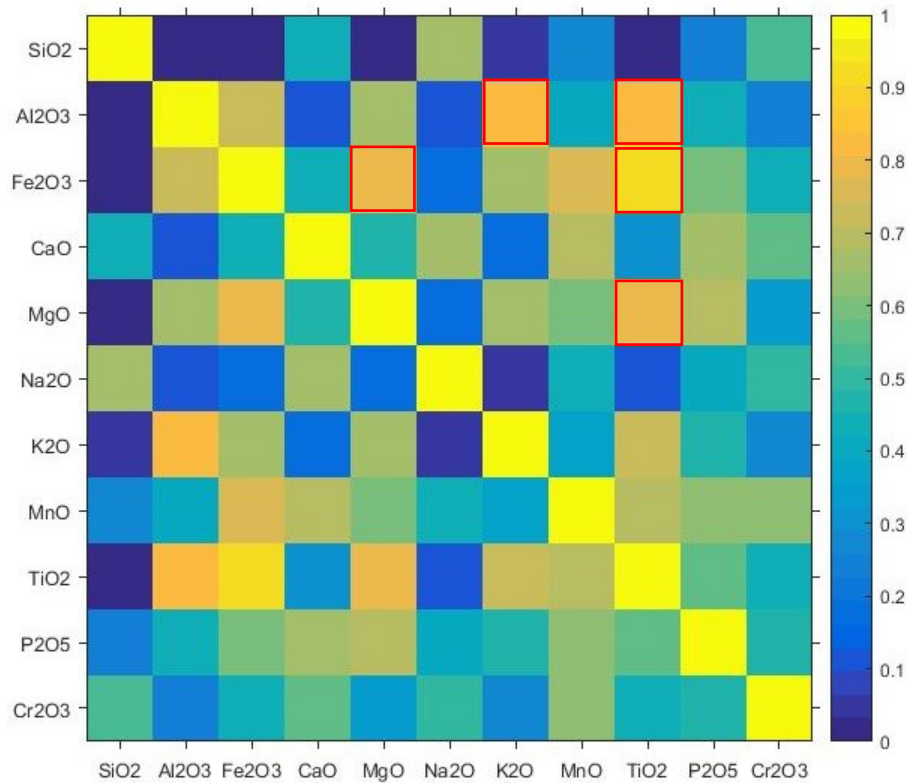
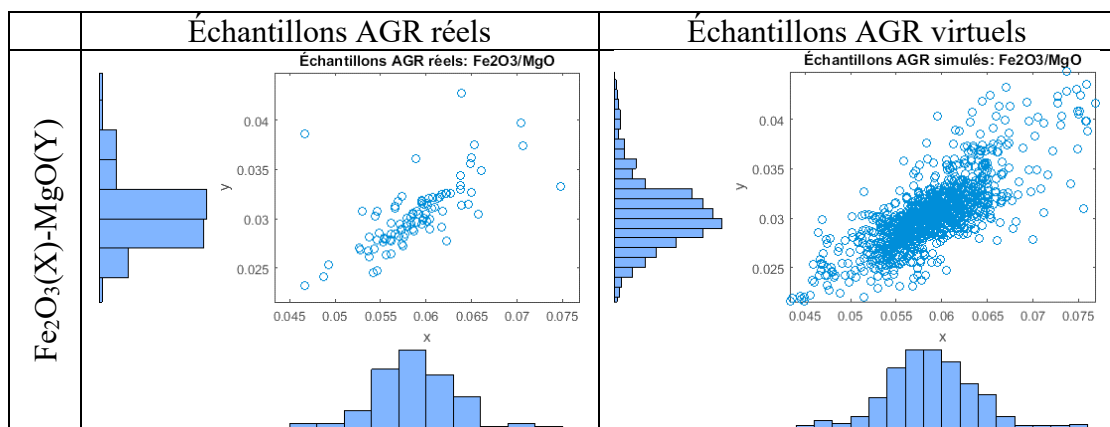


Figure 4.15 : Matrice illustrant les valeurs absolues des corrélations entre les oxydes des échantillons réels de la lithologie AGR. Les éléments encadrés en rouge sont les valeurs des corrélations les plus élevées, utilisées pour l'évaluation de la méthode.

De la Figure 4.15, on constate que cinq paires se démarquent particulièrement :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  et  $\text{MgO}$ - $\text{TiO}_2$ . À noter que des valeurs absolues de corrélations élevées doivent naturellement être attendues, puisque les données utilisées ici sont des données compositionnelles relatives.



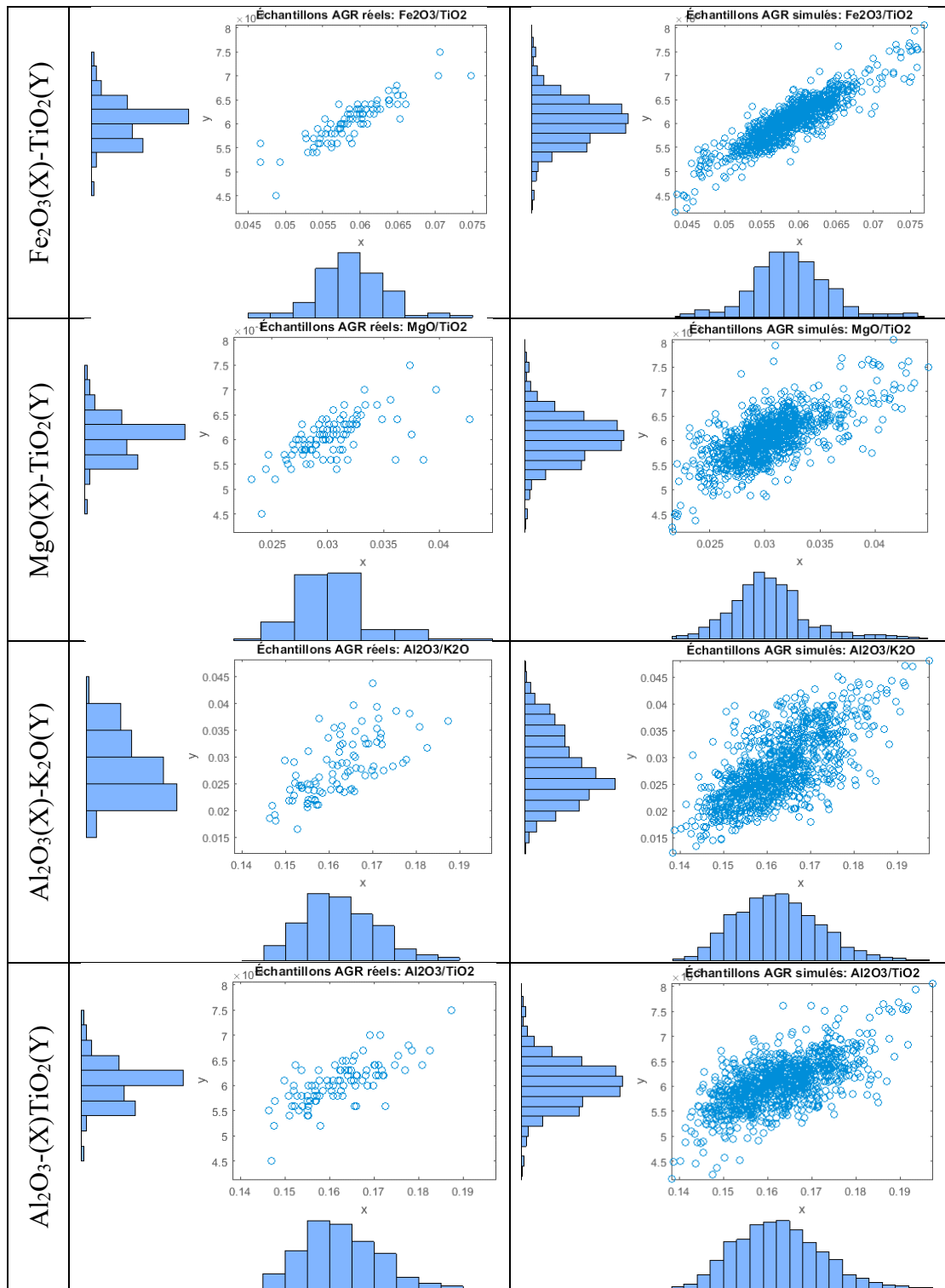


Figure 4.16 : Nuages de points et histogrammes des oxydes des 98 échantillons AGR réels (colonne de gauche) et de 1000 échantillons AGR simulés (colonne de droite).

Les histogrammes de la Figure 4.16 montrent des distributions similaires entre les paires d'oxydes des échantillons réels et simulés. Les nuages de points affichent également des tendances similaires deux à deux, indiquant que les structures de dépendance sont adéquatement reproduites par les fonctions copules.

L'utilisation de fonctions copules pour reproduire la géochimie des lithologies suppose cependant que les ensembles d'échantillons disponibles soient représentatifs de ces lithologies. Avec seulement 98 échantillons AGR, 50 échantillons CGR, 14 échantillons SPO et 15 échantillons CPO, une partie importante de la variabilité géochimique des lithologies peut ne pas être reprise dans les données.

Bien que le nombre d'échantillons simulables soit virtuellement infini, leur distribution géochimique reste donc tributaire des données disponibles. Cet écart avec la réalité est une autre limitation rencontrée dans cette thèse. Ces échantillons ont ensuite été distribués selon différentes mailles d'échantillonnage en reproduisant, au plus près, les variations spatiales géochimiques produites par l'interpolation IDW. Ces mailles d'échantillons ont ensuite été interpolées par krigeage universel.

Comme attendu, la densité spatiale d'échantillonnage a eu un impact direct sur les résultats. La figure suivante présente l'erreur moyenne d'interpolation pour les différentes mailles d'échantillonnage et pour les sept principaux oxydes.

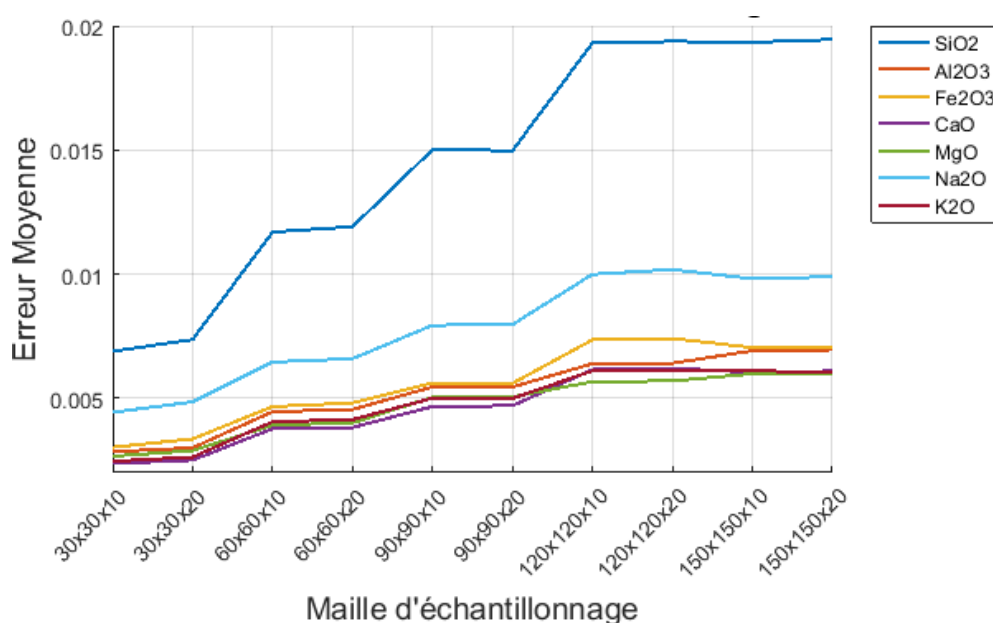


Figure 4.17 : Erreur moyenne de prédiction de la géochimie des points prédits par krigeage, pour sept oxydes.

La Figure 4.17 montre une erreur croissante jusqu'à la maille 120x120x10 m puis semble se stabiliser. L'analyse des variogrammes indique qu'il s'agit de la maille à partir de laquelle certains variogrammes théoriques n'ont pu être ajustés sur les

variogrammes empiriques. Des exemples de variogrammes sont présentés dans la Figure 4.18 :

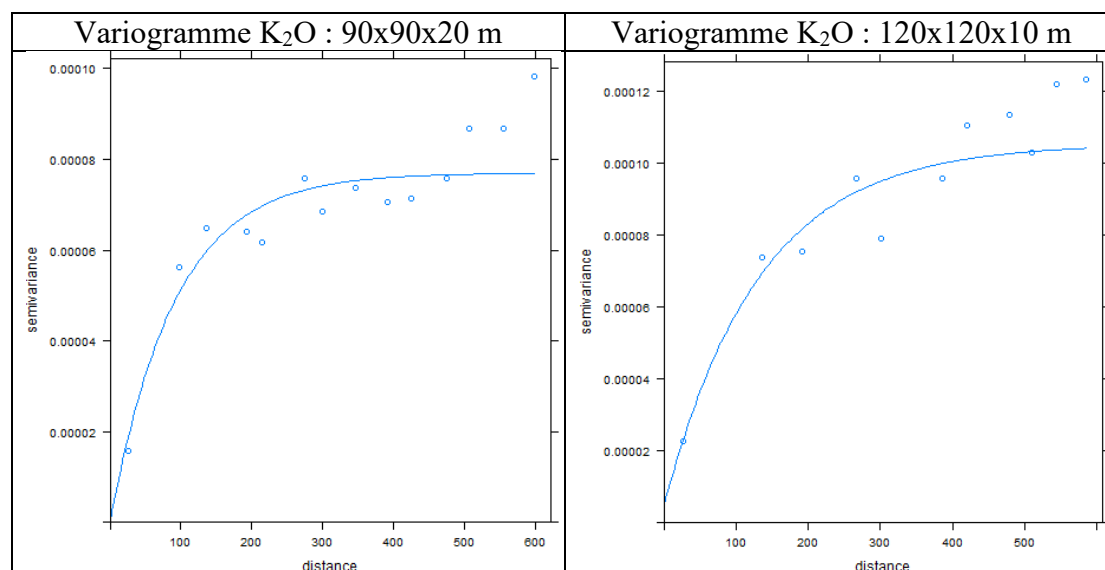


Figure 4.18 : Exemples de variogrammes produits lors de l'interpolation par krigeage. Le variogramme de droite, calculé avec les échantillons de la maille 120x120x10 m, n'atteint pas de palier.

Ainsi, l'absence de portée (définie par le plateau de la courbe théorique) sur ces variogrammes indique qu'aucune distance limite de corrélation spatiale n'est mesurée. Une autre interprétation est que la variabilité entre les échantillons ne semble pas avoir de limite, augmentant constamment avec la distance. Cette croissance constante est caractéristique d'un échantillonnage insuffisant ou d'un voisinage (distance maximum des échantillons considérés dans l'interpolation) trop petit (Chiles et Delfiner, 2009).

En outre, quelle que soit la densité d'échantillonnage, une source importante d'erreur provient de l'incapacité du krigeage à reproduire les motifs en blocs du modèle. Cette propriété de l'interpolation à lisser les variations spatiales engendre donc des erreurs plus élevées aux interfaces entre les lithologies.

Une autre source d'erreur est que l'interpolation des échantillons s'est faite sans distinction de lithologie, qu'elle soit de type metagrauwacke ou porphyrique. Les interfaces des deux types de lithologies produisent donc des erreurs de prédiction plus importantes. Ces deux sources d'erreur sont illustrées dans la carte d'erreur de la Figure 4.19:

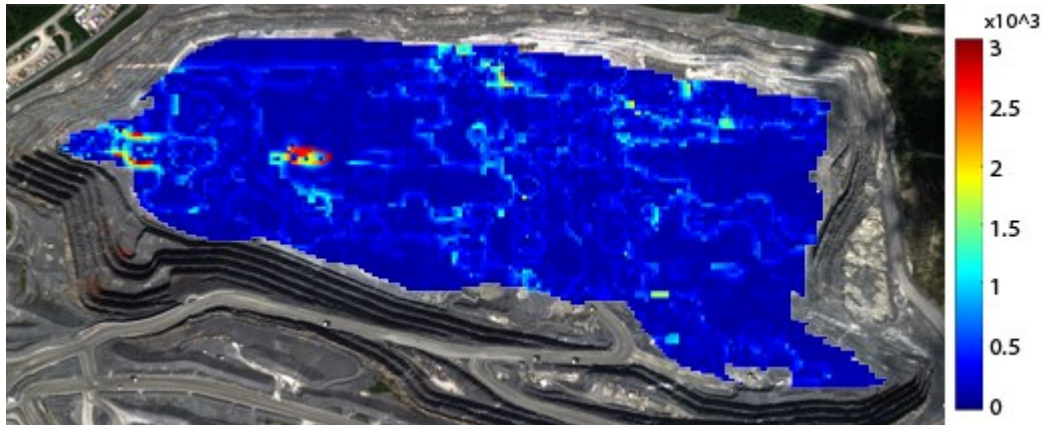


Figure 4.19 : Carte d'erreur de l'interpolation par krigeage de l'oxyde  $P_2O_5$  pour la maille d'échantillonnage 30x30x10 m.

On y voit que des erreurs plus élevées délimitent les interfaces entre les lithologies, reproduisant les motifs de la Figure 3.6. Ces erreurs sont particulièrement importantes aux abords des interfaces metagraywacke/porphyre (Nord-Est et Ouest de la carte).

#### 4.4 Résultats de la fusion évidentielle

##### 4.4.1 Attribution des masses par classification

Dans cette section, les résultats des classifications des données géochimiques et des résultats de démixage sont présentés. Ces résultats montrent l'aptitude des deux sources à retrouver les lithologies observées à hauteur du plancher de la mine.

##### A. Classification des résultats de démixage

Différents nombres d'échantillons ont été envisagés pour entraîner le classifieur avant son application sur la carte d'abondance complète de l'image WV3 complète (Tableau 4.6). Pour chaque pixel, c'est la classe lithologique ayant obtenu le plus haut score qui a été retenue. Les résultats en termes de précision et de kappa sont détaillés dans le Tableau 4.6 ci-dessous.

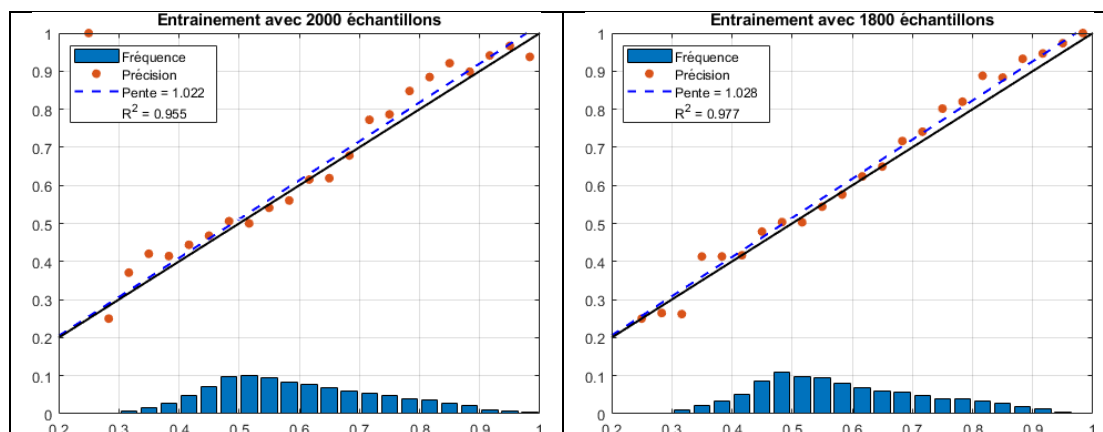


Tableau 4.6 : Performances des classifications lithologiques des abondances issues du démixage, entraînées avec différents nombres de pixels sélectionnés aléatoirement.

| Nb d'échantillons | Précision (%) | Kappa |
|-------------------|---------------|-------|
| 100               | 46,9          | 0,115 |
| 300               | 50,2          | 0,131 |
| 500               | 51,9          | 0,178 |
| 800               | 55,4          | 0,238 |
| 1000              | 55,9          | 0,246 |
| 1200              | 57,8          | 0,274 |
| 1400              | 58,2          | 0,280 |
| 1600              | 60,1          | 0,311 |
| 1800              | 60,4          | 0,321 |
| 2000              | 61,2          | 0,338 |

Du Tableau 4.6, on constate que les précisions obtenues sont faibles, variant de 46,9 % pour un entraînement réalisé avec 100 échantillons, à 61,2 % pour un entraînement avec 2000 échantillons. Les kappas suivent la même tendance, avec des valeurs faibles allant de 0,115 à 0,338. Sans surprise, ces performances croissent donc avec le nombre d'échantillons utilisés en entraînement.

Puisque les scores du classifieur représentent des probabilités d'appartenance, il serait intéressant de les comparer avec les précisions réelles de classification. Dans la prochaine figure, les régressions linéaires pondérées des précisions réelles et estimées sont présentées. Les pondérations sont dépendantes du nombre d'observations (de pixel) présentes dans chacun des intervalles de 3,33 %. Ces fréquences d'observations sont illustrées par les histogrammes. Les pentes et coefficients de détermination, utilisés dans le critère de fiabilité (voir section 3.3.4A), sont également présentés.



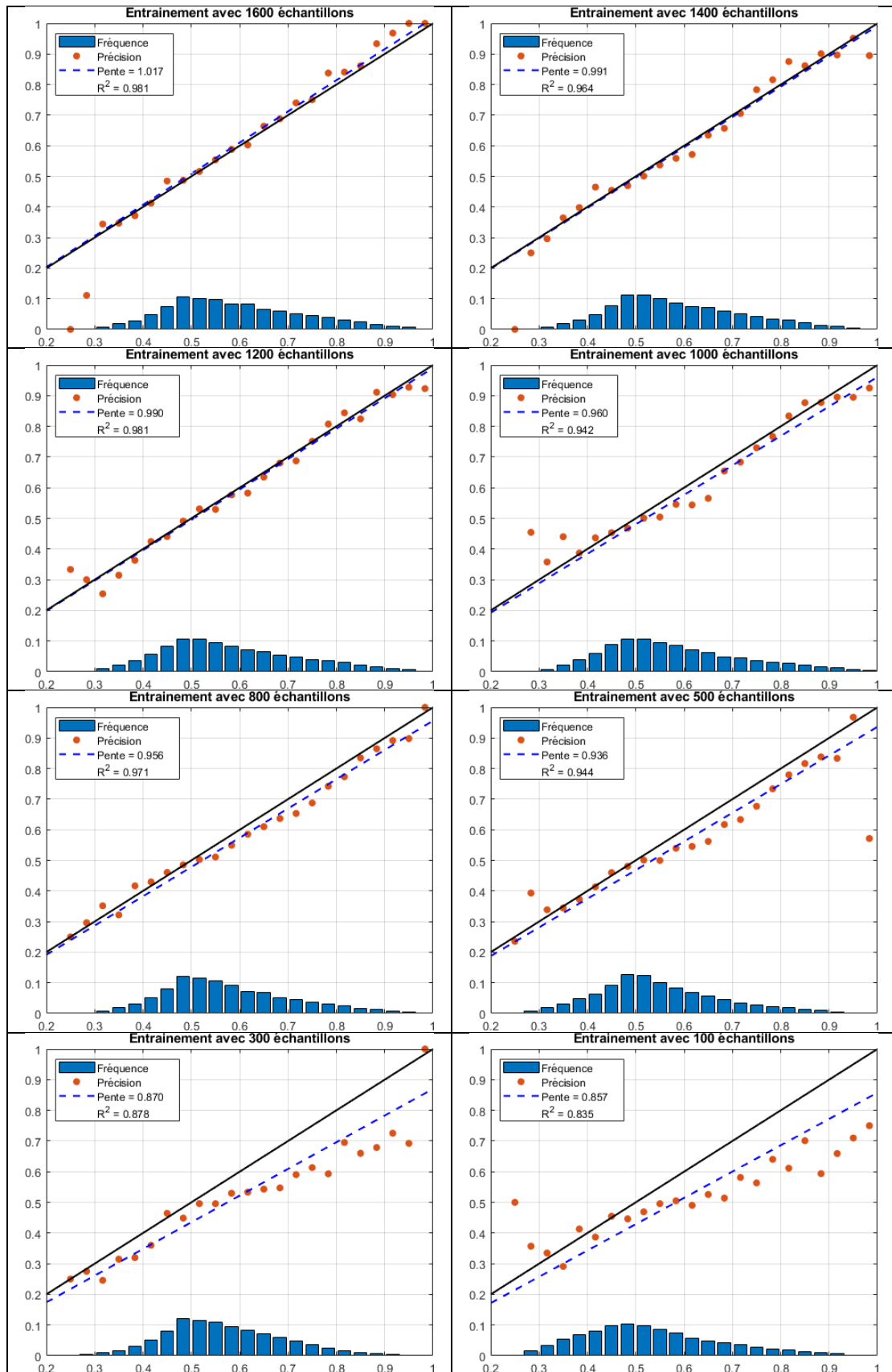


Figure 4.20 : Précisions (axe des ordonnées) de classification du démixage d'après les scores (abscisse) attribués par le classifieur pour chaque jeu d'entraînement. L'histogramme indique la fréquence des scores en proportion de pixels.

Avec la réduction du jeu d'entraînement, on constate une dispersion des valeurs de précision autour de la droite de régression et un abaissement de cette droite sous la pente de valeur 1. Les fréquences des scores semblent presque invariantes d'un jeu d'entraînement à l'autre.

La baisse de pente indique que les scores attribués par le classifieur sont surestimés par rapport aux précisions réelles de classification. Ainsi, pour le jeu d'entraînement de 100 échantillons, des scores proches de 1 ont été attribués à des classes alors que moins de 80 % des pixels ont été convenablement classifiés. Cette constatation et la dispersion des valeurs autour des droites de régression sont liées à un problème de représentativité du jeu d'entraînement et de sur-apprentissage du classifieur.

Ces mêmes scores ainsi que les lithologies retenues sont présentés à la Figure 4.21 :

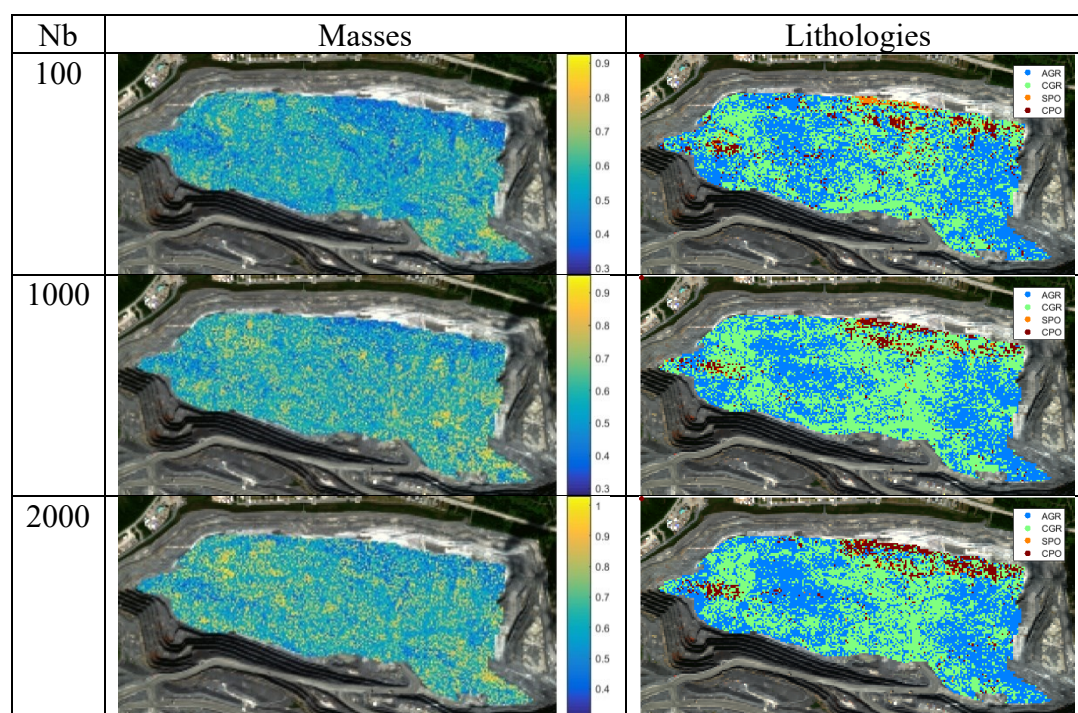


Figure 4.21 : Gauche : Cartes des masses (ou probabilités d'appartenance) les plus élevées définies par classification en arbre de décision, Droite : Cartes lithologiques.

Les cartes illustrées dans la Figure 4.21 paraissent bruitées, rendant difficile l'identification de motifs cohérents. Des tendances dans les répartitions des lithologies apparaissent cependant. On peut ainsi distinguer les intrusions porphyriques au nord-est et à l'ouest. La lithologie AGR (en bleu) est également dominante à l'extrémité est et dans la partie centre-ouest, séparée par une zone centrale de CGR (vert). Ces

zonations sont observables même avec le plus petit jeu d'entraînement de 100 échantillons.

Les cartes de scores sont également bruitées, indiquant une importante variabilité dans la confiance de classification d'un pixel à l'autre. Des tendances dans les scores sont difficilement visibles. Néanmoins, les endroits des intrusions porphyriques semblent afficher des scores plus faibles, autour de 0,3-0,4.

On peut cependant douter de la pertinence d'augmenter le nombre d'échantillons pour améliorer la classification. On peut ainsi comparer l'amélioration de la classification obtenue par rapport au nombre d'échantillons utilisés en intrant.

La surface démixée, soit le fond de la fosse, comporte 13430 pixels. Un accroissement de 200 pixels dans le jeu d'entraînement suppose donc, en situation réelle, d'identifier la lithologie d'environ 1,49 % des pixels supplémentaires. Le Tableau 4.7 illustre les gains de précision apportés par les accroissements successifs des nombres d'échantillons utilisés dans l'entraînement.

Tableau 4.7 : Améliorations des classifications des résultats de démixage avec l'augmentation des nombres d'échantillons utilisés dans l'entraînement.

| Nombre de pixels ajoutés             | 200   | 200   | 300   | 200   | 200   | 200   | 200   | 200   | 200   |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| % de pixels ajoutés à l'entraînement | 1,489 | 1,489 | 2,234 | 1,489 | 1,489 | 1,489 | 1,489 | 1,489 | 1,489 |
| Gain de précision                    | 3,269 | 1,698 | 3,559 | 0,454 | 1,891 | 0,387 | 1,906 | 0,350 | 0,760 |

On peut constater que les améliorations obtenues sont du même ordre de grandeur, voire inférieures, à l'information fournie au classifieur. En pratique, augmenter le nombre d'échantillons pour accroître la qualité de la classification ne semble donc pas pertinent.

## B. Classification des données géochimiques interpolées

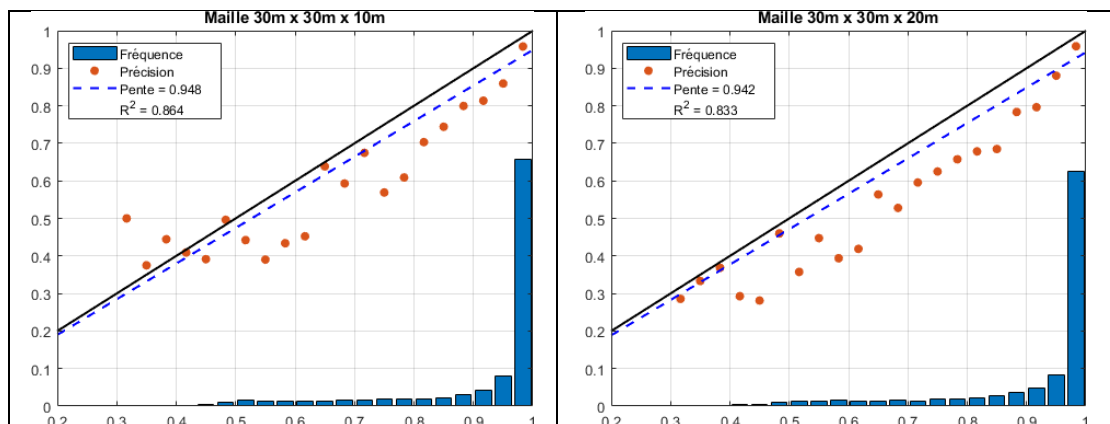
Le même processus a été appliqué sur les données géochimiques. Pour rappel, chaque classification a été entraînée sur les échantillons des mailles. Le classifieur a ensuite été appliqué sur les prédictions du krigeage. Les résultats ont été évalués en comparant les lithologies attribuées par la classification aux lithologies du modèle-bloc à hauteur du plancher (Figure 3.6). Comme pour le démixage, c'est une classification par arbre de décision qui a été réalisée. Le tableau qui suit recense les performances de classification :

Tableau 4.8 : Performances de classification des prédictions géochimiques par krigeage à hauteur du plancher, pour différentes mailles d'échantillonnage. Les résultats de la maille 120 x 120 x 20 m ne sont pas repris, aucun échantillon SPO n'étant présent dans ce jeu d'entraînement.

| Maille     | Nb d'éch. | Précision (%) | Kappa |
|------------|-----------|---------------|-------|
| 30x30x10   | 4676      | 86,642        | 0,776 |
| 30x30x20   | 2817      | 85,160        | 0,752 |
| 60x60x10   | 1089      | 78,027        | 0,631 |
| 60x60x20   | 659       | 77,893        | 0,630 |
| 90x90x10   | 483       | 73,686        | 0,556 |
| 90x90x20   | 295       | 73,381        | 0,550 |
| 120x120x10 | 235       | 60,171        | 0,337 |
| 120x120x20 | 142       |               |       |
| 150x150x10 | 150       | 64,557        | 0,388 |
| 150x150x20 | 92        | 62,800        | 0,361 |

Du Tableau 4.8, on constate une diminution systématique des performances de classification avec la réduction de la densité d'échantillonnage. La diminution est particulièrement rapide au passage de 90 x 90 x 20 m à 120 x 120 x 10 m. Les résultats sont cependant nettement supérieurs à ceux obtenus avec le démixage. Le plus petit jeu d'entraînement (92 échantillons) avoisine ainsi les performances du plus grand jeu d'entraînement du démixage (2000 échantillons).

Comme pour le démixage, la prochaine figure présente la précision des classifications en fonction des scores attribués par le classifieur :



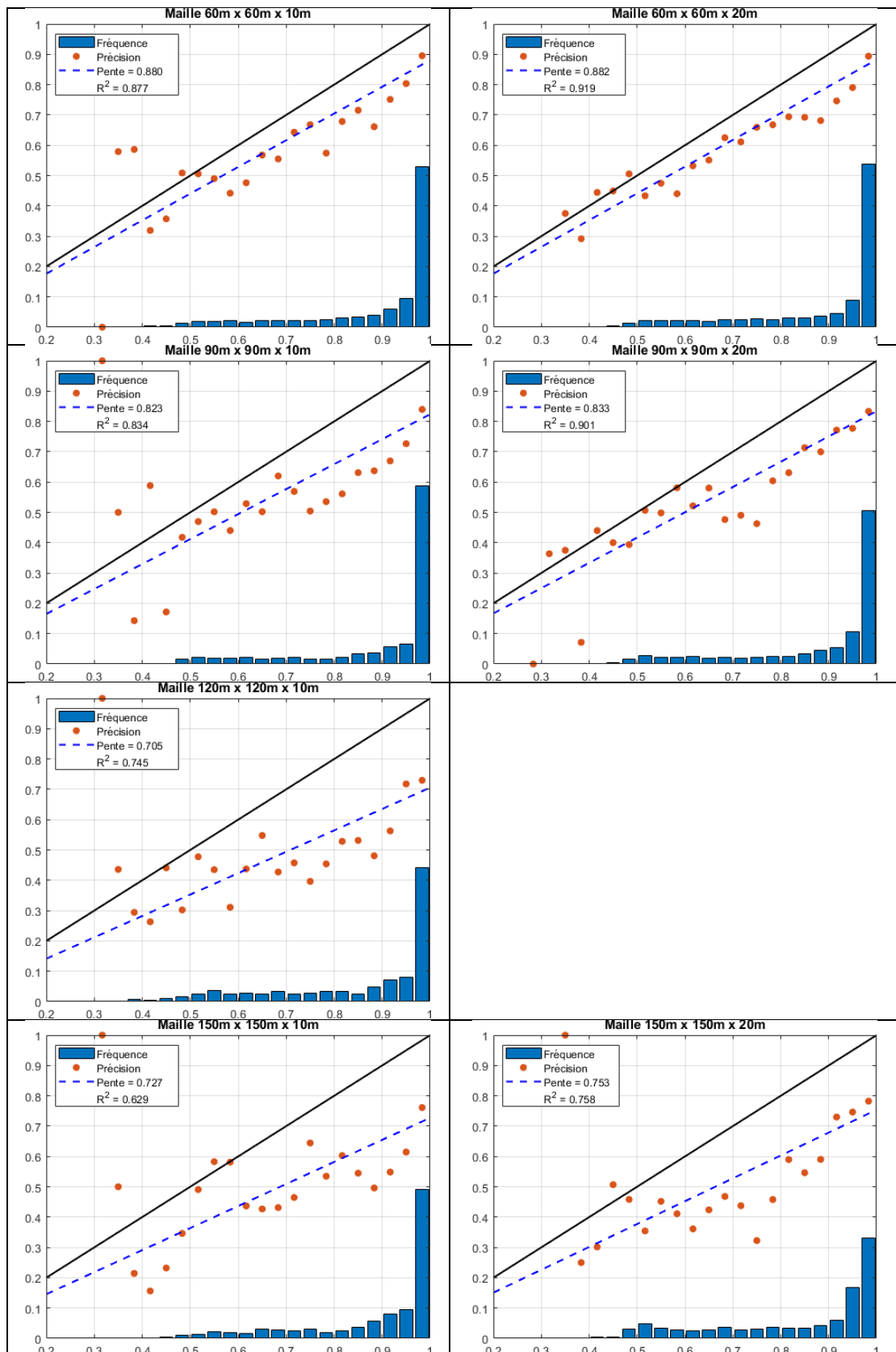


Figure 4.22 : Précisions (axe des ordonnées) de classification du krigeage d'après les scores (axe des abscisses) attribués par le classifieur pour chaque jeu d'entraînement. L'histogramme indique la fréquence des scores. La ligne noire a une pente de valeur 1, illustrant une situation où les scores traduiraient parfaitement la précision. Les

résultats de la maille 120 x 120 x 20 m ne sont pas repris, aucun échantillon SPO n'étant présent dans ce jeu d'entraînement.

Le même phénomène de dispersion des valeurs autour de la droite de régression que pour le démixage peut être observé. La pente diminue également avec le nombre d'échantillons, impliquant encore une fois une surestimation des scores face aux performances réelles de classification. Le phénomène est cependant plus important que pour le démixage, et même la maille d'échantillonnage la plus dense (30 x 30 x 10 m) affiche ces biais.

Ce biais pour une maille dense est dû à l'incapacité du krigeage à reproduire les formes discrétisées du modèle lithologique (Figure 4.19). Ainsi, pour la maille 30 x 30 x 10 m, malgré un jeu d'entraînement représentatif et une classification efficace, le lissage inhérent à l'interpolation dégrade les résultats. Dans le cas des mailles les moins denses, ce biais se combine aux problèmes de sous-représentativité et de surapprentissage mentionné précédemment.

À des fins d'illustration, la carte lithologique par classification et la carte des masses pour trois mailles différentes sont présentées ci-dessous (Figure 4.23) :

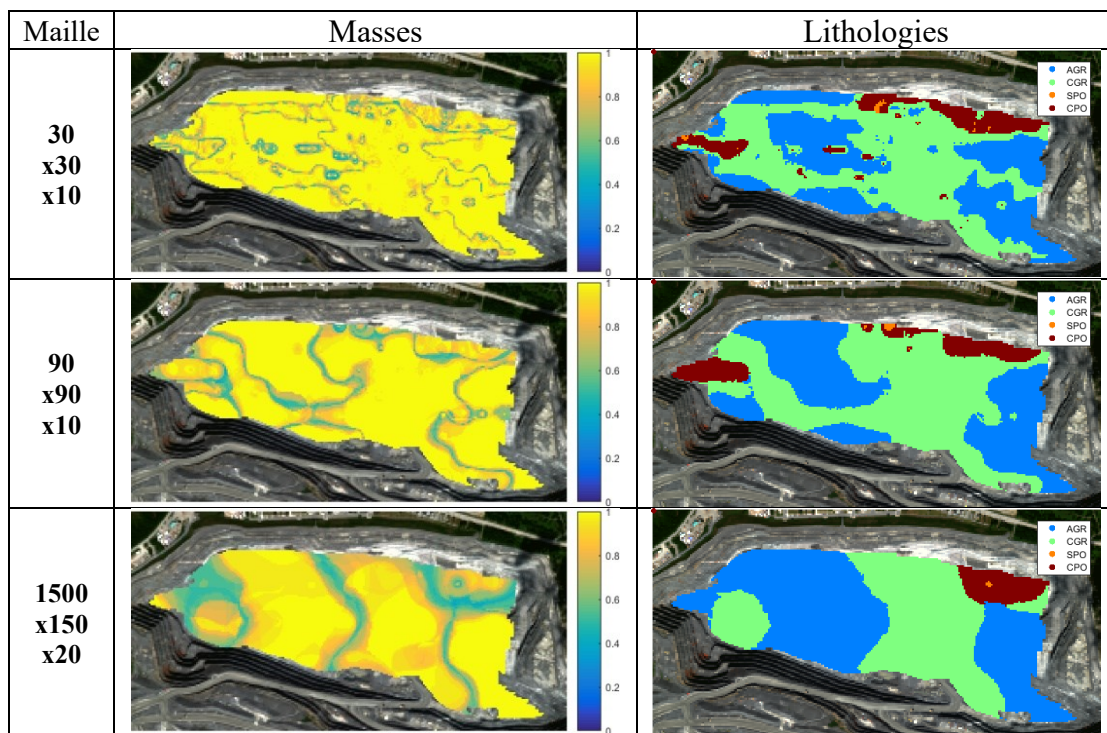


Figure 4.23 : Exemple de carte de masses et de cartes de lithologie obtenues par classification des résultats de krigeage.

De la Figure 4.23, on constate que les lithologies montrent des motifs distincts et continus ; cohérents avec la carte lithologique utilisée comme référence (Figure 3.6). Les scores montrent également des variations continues avec des zonations lissées. Les scores les plus faibles sont localisés aux interfaces des lithologies.

Dans ces résultats, l'influence du jeu d'entraînement est double puisqu'il conditionne tant l'entraînement du classifieur que la qualité de l'interpolation par krigeage. Les erreurs de classification pour la maille 30x30x10 m sont présentées dans la Figure 4.24 :

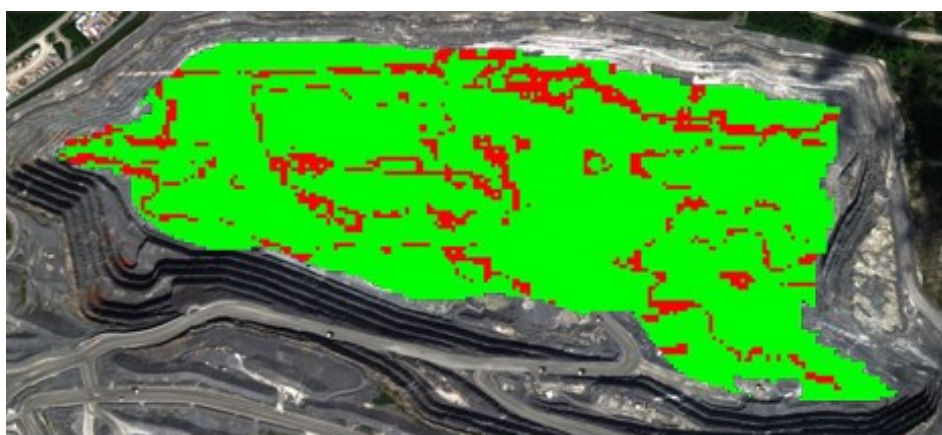


Figure 4.24 : Erreur de classification lithologique (en rouge) du krigeage de la maille 30 x 30 x 10 m.

On y retrouve les mêmes concentrations d'erreurs aux abords des interfaces lithologiques que dans la Figure 4.19.

#### 4.5 Fusion évidentielle des données satellitaires et géochimiques

Dans cette dernière étape, les jeux de masse ont été fusionnés en utilisant la règle PCR5 (Équation 13, section 2.2.2B) de la DSMT. La transformation pignistique (Équation 16, section 2.2.2C) a ensuite été appliquée sur les masses fusionnées. Pour chaque pixel, c'est la lithologie ayant obtenu la probabilité pignistique (BetP) maximum qui a été retenue.

Pour faciliter l'interprétation des résultats, ce sont les différences de performance avec la classification de la géochimie (Tableau 4.8) qui sont présentées. Les valeurs de précision et de kappa sont disponibles en Annexe C. À titre d'information, les résultats pour les maximums de crédibilité (Équation 14, section 2.2.2C), de plausibilité (Équation 15, section 2.2.2C) et de transformation probabiliste *DSmP* ont également été produits et sont disponibles en Annexe C.



Tableau 4.9 : Différence de précision (%) entre les résultats de classification des données géochimiques krigées et les résultats de fusion.

| Maille   | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nb. Ech. | 4676                | 2817                | 1089                | 659                 | 483                 | 295                 | 235                   | 142                   | 150                   | 92                    |
| 100      | -0,045              | 0,313               | 0,246               | 0,238               | 0,283               | -0,067              | 1,638                 |                       | -1,251                | 1,162                 |
| 300      | -0,082              | 0,015               | -0,253              | 0,089               | -0,238              | -0,246              | 1,802                 |                       | -1,191                | 0,886                 |
| 500      | -0,223              | -0,156              | 0,253               | 0,439               | 0,283               | 0,268               | 1,832                 |                       | -0,439                | 2,018                 |
| 800      | -0,082              | 0,037               | 0,767               | 0,774               | 0,506               | 0,804               | 3,351                 |                       | 0,283                 | 2,792                 |
| 1000     | 0,149               | 0,305               | 1,028               | 1,117               | 0,774               | 0,558               | 4,989                 |                       | 1,139                 | 3,291                 |
| 1200     | -0,067              | 0,082               | 0,894               | 1,199               | 1,266               | 1,266               | 5,428                 |                       | 2,033                 | 4,438                 |
| 1400     | 0,149               | 0,365               | 1,177               | 1,340               | 1,489               | 1,534               | 5,123                 |                       | 1,817                 | 4,132                 |
| 1600     | 0,075               | 0,432               | 1,370               | 1,653               | 1,765               | 1,891               | 6,307                 |                       | 2,800                 | 5,287                 |
| 1800     | 0,447               | 0,611               | 1,675               | 2,092               | 1,862               | 2,085               | 6,188                 |                       | 3,358                 | 5,897                 |
| 2000     | 0,395               | 0,901               | 1,690               | 1,839               | 2,442               | 2,465               | 6,932                 |                       | 4,334                 | 6,433                 |

Tableau 4.10 : Différence de coefficient kappa entre les résultats de classification des données géochimiques krigées et les résultats de fusion.

| Maille   | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nb. Ech. | 4676                | 2817                | 1089                | 659                 | 483                 | 295                 | 235                   | 142                   | 150                   | 92                    |
| 100      | -0,001              | 0,005               | 0,003               | 0,003               | 0,004               | -0,001              | 0,019                 |                       | -0,024                | 0,018                 |
| 300      | -0,002              | -0,001              | -0,007              | -0,001              | -0,007              | -0,006              | 0,013                 |                       | -0,029                | 0,006                 |
| 500      | -0,004              | -0,004              | 0,002               | 0,005               | 0,003               | 0,003               | 0,017                 |                       | -0,009                | 0,031                 |
| 800      | -0,002              | -0,001              | 0,010               | 0,010               | 0,006               | 0,012               | 0,043                 |                       | 0,005                 | 0,046                 |
| 1000     | 0,002               | 0,004               | 0,015               | 0,016               | 0,010               | 0,008               | 0,071                 |                       | 0,018                 | 0,054                 |
| 1200     | -0,002              | -0,001              | 0,012               | 0,017               | 0,019               | 0,019               | 0,076                 |                       | 0,034                 | 0,074                 |
| 1400     | 0,002               | 0,004               | 0,017               | 0,019               | 0,022               | 0,024               | 0,071                 |                       | 0,029                 | 0,067                 |
| 1600     | 0,000               | 0,005               | 0,020               | 0,025               | 0,026               | 0,030               | 0,091                 |                       | 0,046                 | 0,087                 |
| 1800     | 0,007               | 0,008               | 0,026               | 0,032               | 0,029               | 0,034               | 0,090                 |                       | 0,058                 | 0,100                 |
| 2000     | 0,006               | 0,014               | 0,026               | 0,028               | 0,039               | 0,041               | 0,105                 |                       | 0,078                 | 0,111                 |

Les Tableaux 4.9 et 4.11 montrent un apport très faible du démixage aux performances de classification. Les données géochimiques contribuent donc pour la plus grande part à la classification, le démixage n'offrant qu'une amélioration anecdotique.

Sans surprise, cette contribution est croissante lorsque le nombre d'échantillons utilisés en entraînement augmente. Elle augmente également avec la dégradation des performances de la classification géochimique (Tableau 4.8). Un « saut » apparaît dans

la contribution du démixage pour la maille de 120 x 120 x 10 m. Ce saut est dû à la dégradation particulièrement importante de la classification géochimique pour cette maille (Tableau 4.8).

La présence de certaines valeurs négatives montre un effet nuisible de l'intégration du démixage par rapport aux seules classifications géochimiques. Cette influence négative se retrouve essentiellement pour les plus petits jeux d'entraînement dans le démixage et pour les plus grands jeux d'entraînement (les mailles les plus denses) en géochimie.

Comme pour les sections précédentes, la figure suivante illustre des cartes lithologiques obtenues par fusion. Des cartes des croyance pignistique (*BetP*) sont également présentées.

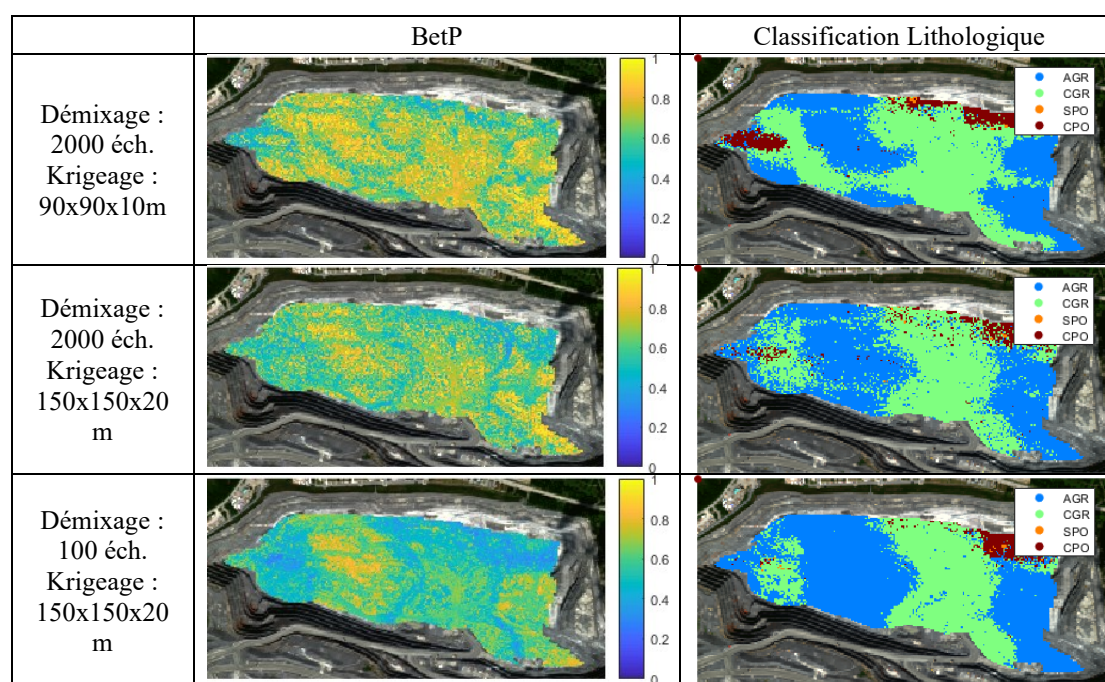
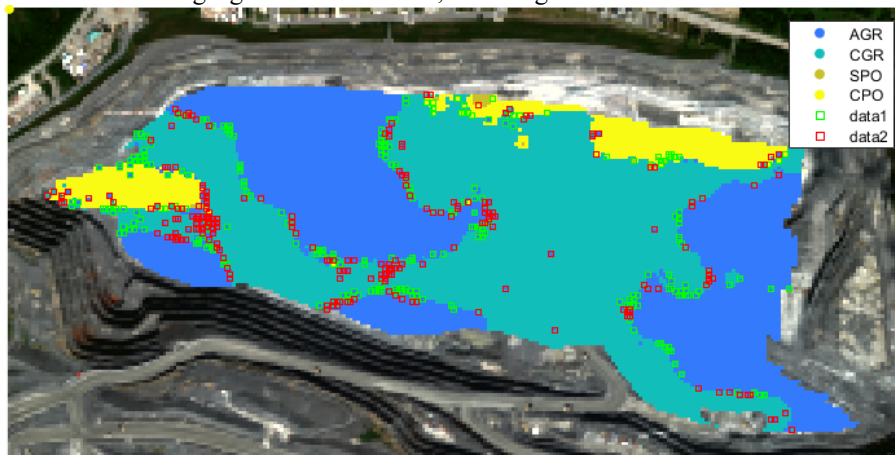


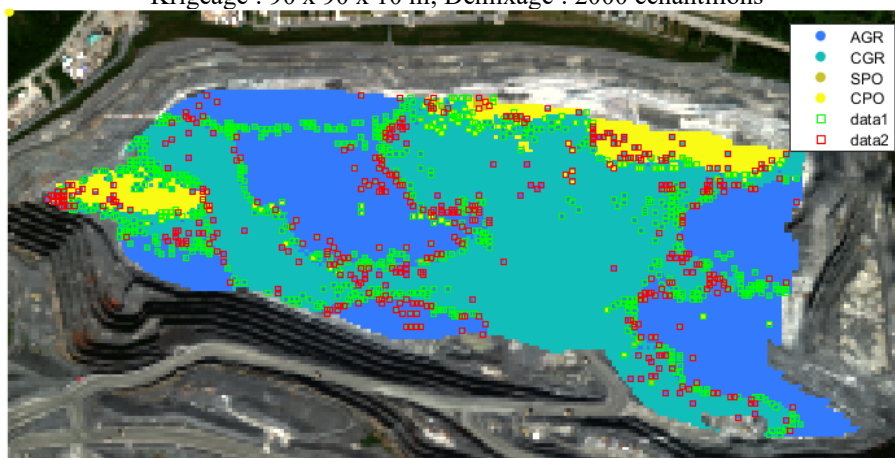
Figure 4.25 : Résultats de classification lithologique par fusion évidentielle. Le critère de classification est le maximum de probabilité pignistique *BetP* dont les valeurs sont illustrées dans les cartes de la colonne de gauche.

Pour avoir une meilleure compréhension de l'influence du démixage sur les résultats, des cartes des changements de lithologies ont été générées. Dans la figure qui suit, les pixels entourés en vert indiquent un apport bénéfique de la fusion par rapport aux classifications des krigages. À l'inverse, les pixels rouges indiquent un changement de classification néfaste, attribuant une mauvaise lithologie au pixel là où elle était initialement juste. Les couleurs des lithologies ont été modifiées par rapport aux illustrations précédentes pour augmenter la visibilité des pixels entourés.

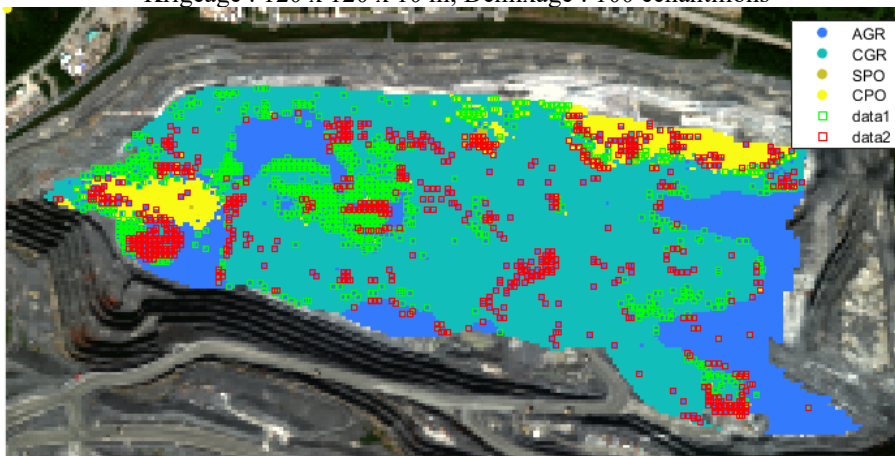
Krigeage : 90 x 90 x 10 m; Démixage : 100 échantillons



Krigeage : 90 x 90 x 10 m; Démixage : 2000 échantillons



Krigeage : 120 x 120 x 10 m; Démixage : 100 échantillons



Krigeage : 120 x 120 x 10 m; Démixage : 2000 échantillons

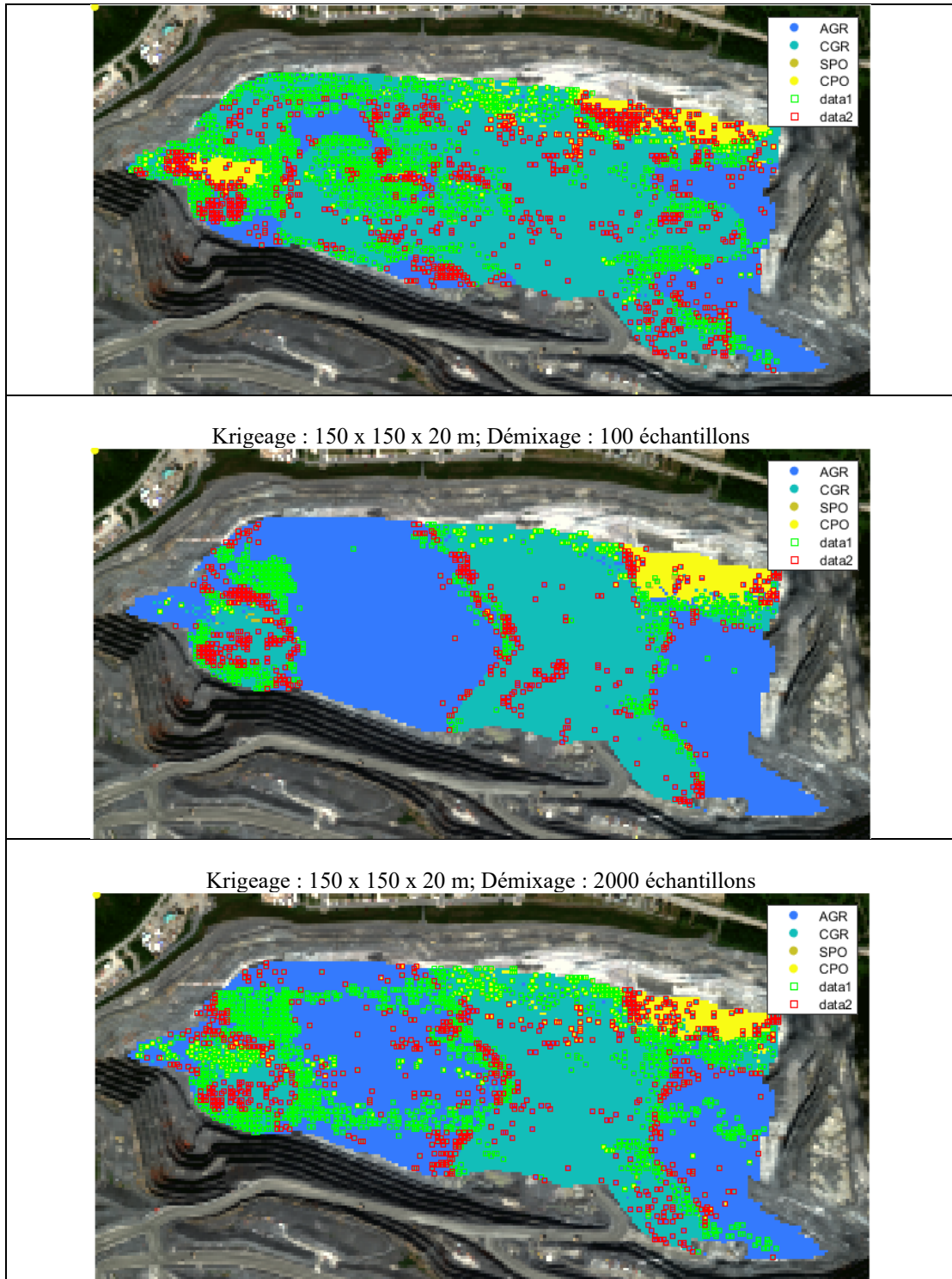


Figure 4.26 : Cartes de changements lithologiques des pixels entre les classifications des résultats de krigeage et de la fusion évidentielle. Les carrés verts indiquent un changement bénéfique apporté par la fusion. Les carrés rouges indiquent un changement néfaste.

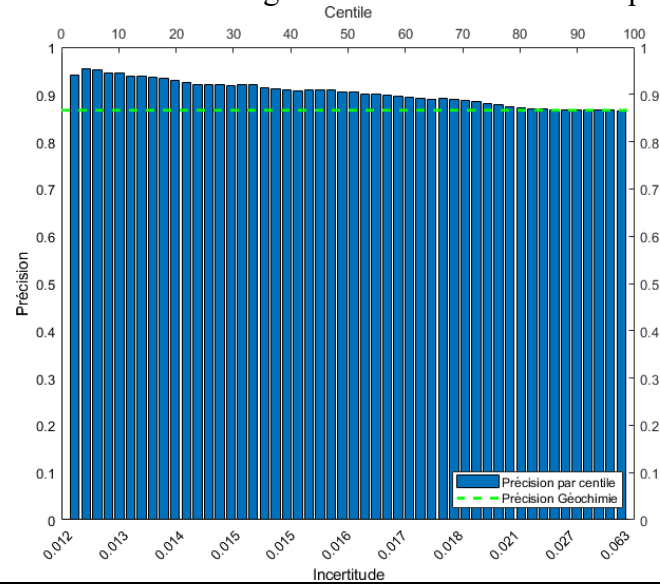
Les cartes de la Figure 4.26 montrent que les changements se concentrent aux interfaces entre les zonations lithologiques définies par les classifications des krigeages. Ce comportement est dû aux scores moins contrastés de ces dernières à ces interfaces (Figure 4.23). Les scores des lithologies retenues étant plus faibles à ces endroits, l'apport du démixage est donc plus susceptible d'entraîner un basculement de lithologie dominante.

De la même manière, les changements plus nombreux pour les jeux d'entraînement de 2000 pixels sont dus à la plus grande fiabilité accordée au démixage. Pour rappel, les pentes et  $R^2$  des droites de régression entre scores de classification et précision (Figure 4.20 et Figure 4.22) ont été utilisées pour pondérer la fiabilité et donc l'influence des deux sources dans la fusion.

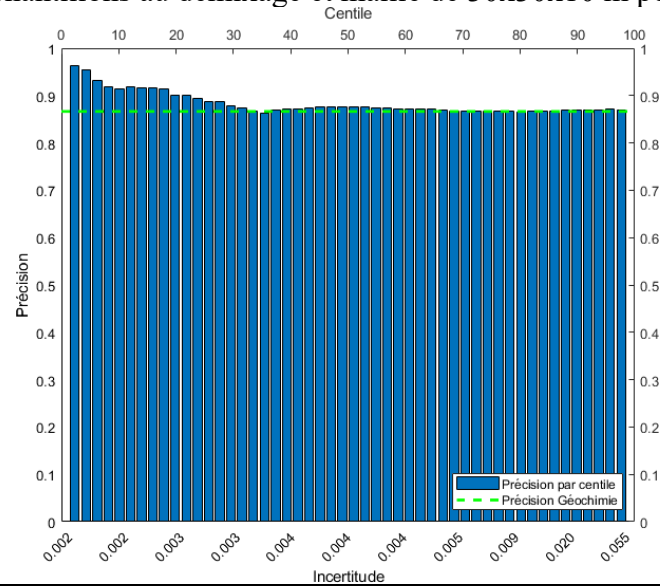
Dans le cas des fusions avec les plus grandes mailles (120 x 120 x 10 et 150 x 150 x 20 m), les changements se répartissent en grappes. Ces grappes sont situées aux intersections des zones de plus faibles scores côté géochimie (Figure 4.23) et des motifs lithologiques les mieux définis côté démixage (Figure 4.21).

Enfin, un des avantages de la fusion évidentielle est d'avoir une information sur l'incertitude des croyances accordées (voir section 2.2.2C). Dans la Figure 4.25, les précisions de classifications sont calculées par centile pour différents cas de fusion. Les précisions des classifications géochimiques sont également illustrées afin de fournir une ligne de base de référence. Les fusions illustrées correspondent à deux mailles d'échantillonnage géochimiques fusionnées avec deux jeux d'entraînement du démixage.

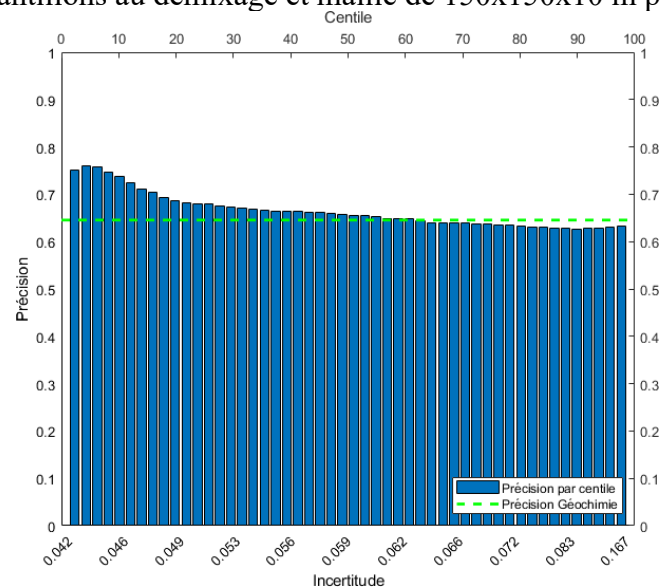
A) 100 échantillons au démixage et maille de 30x30x10 m pour la géochimie



B) 2000 échantillons au démixage et maille de 30x30x10 m pour la géochimie



C) 100 échantillons au démixage et maille de 150x150x10 m pour la géochimie



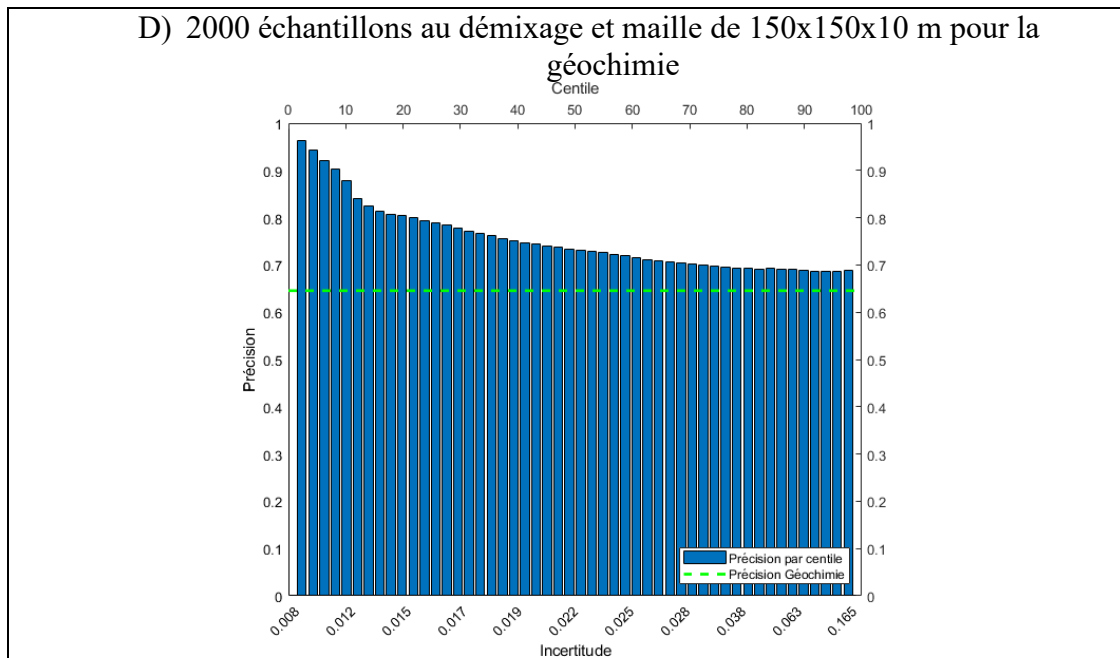


Figure 4.27 : Précisions de classification de la fusion par centile d'incertitude pour différents jeux d'entraînement.

Dans la Figure 4.27, on peut observer un accroissement quasi systématique de la précision avec la diminution du centile d'incertitude. Ainsi, même avec le plus petit jeu d'entraînement côté démixage (100 échantillons) on observe, dès le 85<sup>e</sup> centile, une amélioration de la précision par rapport à la maille géochimie la plus dense (30x30x10 m). L'incertitude peut donc être utilisée pour définir un seuil minimum à partir duquel l'apport du démixage peut être considéré avec confiance.

## Chapitre 5. INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

### 5.1 Évaluation des méthodes de démixage spectral

Le contraste des performances de LMM et PPNMM avec les méthodes MLM, Shkuratov, Hapke et NBRU montre que les interactions multiples sont un phénomène qui ne peut être ni négligé (dans le cas de la LMM), ni simplifié par une relation bilinéaire (dans le cas de PPNMM). L'influence de tendance logarithmique des *endmembers* particulières, telle que modélisée par le modèle de Hapke, de Shkuratov, le MLM et le NBRU, apparaît donc indispensable pour la reconstruction des spectres de mélanges intimes.

Bien que les résultats quantitatifs montrent de meilleures performances des MTR, ceux-ci se font au dépend d'un plus grand nombre de paramètres ou d'hypothèses plus fortes. Cette dépendance à des données difficilement accessibles limite considérablement l'applicabilité des MTR sur des scènes naturelles.

Par ailleurs, les résultats quantitatifs ont montré une très grande variabilité d'un mélange à l'autre, et ce, quel que soit le modèle. Deux mélanges se sont démarqués par des erreurs particulièrement élevées (Tableau 4.2 à 4.3). Les caractéristiques des minéraux impliqués semblent indiquer que les différences de forme d'une espèce minérale à l'autre sont à l'origine de ces écarts. Ainsi, les minéraux en aiguilles ou en feuillets (ici, le chlorite et la muscovite) auront une influence spectrale qui dévie de celle modélisée par les modèles. Cette observation vaut également pour les MTR, dont le champ d'applicabilité est limité par des contraintes de forme (Hapke, 1981; Shkuratov *et al.*, 1999). Par ailleurs, les conditions d'applicabilité des deux MTR ne permettent pas de démixer des mélanges en présence de minéraux « opaques » (Hapke, 1981; Mustard et Pieters, 1987b; Poulet *et al.*, 2002; Shkuratov *et al.*, 1999).

Malgré des écarts particulièrement importants, les MTR apparaissent cependant moins affectés par ces déviations, affichant des erreurs maximales de 10 à 23 % là où les modèles linéaires et bilinéaires dépassent parfois les 50 % (Tableau 4.2 à 4.3). Les méthodes MLM et NBRU montrent un meilleur comportement que ces derniers. Ces résultats confirment donc ceux obtenus dans la littérature. Ils mettent en évidence les difficultés à estimer des abondances lorsque des minéraux de formes irrégulières (Hapke, 1981; Shkuratov *et al.*, 1999) sont rencontrés. Bien que les performances de



NBRU soient également affectées par ces cas difficiles, la nouvelle approche a montré une plus grande aptitude que les méthodes existantes (MTR exceptés) à estimer les abondances minéralogiques. Il apparaît donc que, malgré sa simplicité, la non linéarité induite par la transformation en NBR reproduit raisonnablement bien celle liant l'amplitude des spectres des endmembers à leur influence spectrale dans les mélanges. NBRU se démarque donc des autres méthodes en obtenant les performances quantitatives les plus proches des MTR. Ces derniers voient cependant leur applicabilité en télédétection particulièrement restreinte du fait de leur besoin en informations additionnelles.

Les résultats de cartographie minéralogique sur l'image AVIRIS ont confirmé les observations précédentes, mettant nettement en évidence la supériorité des modèles MLM et NBRU. Ce dernier s'est particulièrement distingué, obtenant les kappas les plus élevés pour sept des neufs minéraux cartographiés.

Une explication possible des bons résultats obtenus par NBRU en cartographie est son approche basée sur la forme des spectres plutôt que sur leur amplitude. Les résultats obtenus vont en effet dans le sens des publications antérieures, mettant en évidence la robustesse des méthodes basées sur la forme (Chen *et al.*, 2009b; Somers *et al.*, 2011; Tits *et al.*, 2012). Les *endmembers* tirés des bibliothèques spectrales n'étant pas issus du site d'étude, leur composition et leurs tailles de grains diffèrent de celles des surfaces démixées. Les variations d'illumination touchant également l'amplitude des spectres (Somers *et al.*, 2011), NBRU est donc moins affectée que les trois autres modèles.

## **5.2 Améliorer le démixage en corrigeant l'effet de l'humidité**

La calibration de la FH a montré qu'une fonction linéaire était à même de reproduire l'influence spectrale de l'humidité. Les indices d'humidité, les facteurs d'influence et les spectres modélisés lors de la calibration (Figure 4.3 à 4.5) sont cohérents avec le séchage, l'influence spectrale connue de l'eau, et les spectres mesurés en laboratoire.

L'intégration de la FH pour démixer les spectres ASD des échantillons a apporté un gain significatif sur la robustesse de l'approche NBRU face à une humidité variable (Figure 4.6 à 4.8). Bien qu'une amélioration manifeste soit également constatée pour

les spectres convertis aux bandes WV3, une influence de l'humidité a cependant subsisté (Figure 4.9 à 4.10). Par ailleurs, et surtout, les abondances retrouvées lors du démixage des spectres WV3 en laboratoire ont montré de très nettes différences avec celles obtenues avec les spectres ASD. Ces écarts sont la conséquence directe du rééchantillonnage spectral. Ils montrent que la résolution spectrale du satellite est insuffisante pour capturer toute l'information nécessaire à un démixage minéralogique optimum. Cette dernière observation est en accord avec les résultats de cartographie de Cuprite présentés dans Kruse *et al.* (2015).

L'approche NBRU, combinée à la FH, a montré des résultats plus mitigés avec l'image WV3 de la mine. L'intégration de la fonction a aidé à réduire l'influence de l'humidité sur les abondances de muscovite et d'albite mais a, au contraire, aggravé son impact pour la biotite et la calcite. Les origines de ces différences entre les résultats en laboratoire et ceux obtenus avec l'image satellite sont potentiellement multiples. On peut notamment mentionner :

- Des différences entre les textures des échantillons utilisés en laboratoire et les surfaces observées dans la fosse ;
- Des erreurs lors de la conversion de l'image satellite en réflectance. Ces erreurs peuvent, entre autres, provenir du décalage de dix jours entre l'acquisition des spectres de référence et de l'image WV3. Ce décalage a pu engendrer des changements dans la composition et surtout l'humidité des surfaces. Par ailleurs, la représentativité des spectres de référence acquis dans la mine pour des pixels de 7,5 m x 7,5 m peut également être questionnée.

Enfin, l'absence de quartz et d'orthoclase dans les abondances estimées (Figure 4.14) est incohérente avec la minéralogie connue du gisement (voir section 3.1). Cette erreur peut être liée à l'absence de caractéristique spectrale pour ces minéraux ainsi qu'à leur similitude avec l'albite (voir Figure 3.17). Les trois minéraux étant spectralement plats, leurs proportions relatives sont difficiles à estimer et à distinguer les uns des autres (Cheek et Pieters, 2014; Hiroi et Pieters, 1994; Mustard et Pieters, 1987b; Nash et Conel, 1974). Par conséquent, l'essentiel de l'abondance des trois minéraux peut avoir été capturée par le seul *endmember* de l'albite. Pour illustrer l'information spectrale limitée acquise par le satellite, la Figure 5.1 ci-dessous présente les spectres de quatre

pixels : deux de texture rocheuse (en jaune et bleu), et deux de zones couvertes de poussières (en rouge et mauve).

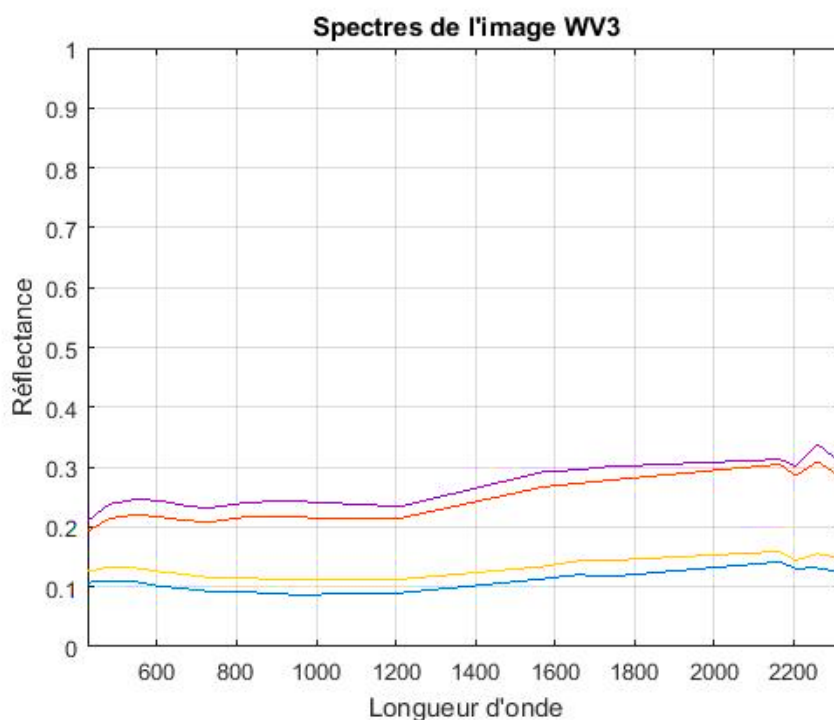


Figure 5.1 : Spectres de réflectance de quatre pixels de l'image WV3. Les deux spectres plus élevés proviennent de zones plus claires couvertes de poussière. Les deux spectres les plus bas proviennent de zones sombres, dominées par une texture rocheuse.

Il apparaît que la différence de hauteur entre les spectres de l'image WV3, illustrés dans la figure précédente, et ceux des *endmembers* (Figure 3.17) est également très élevée. Ces derniers sont en effet considérablement plus hauts que les spectres rencontrés dans l'image WV3. Ainsi, la robustesse de NBRU, mise en évidence sur l'image AVIRIS, est peut-être insuffisante pour composer avec ce contraste d'amplitude de plusieurs dizaines de pourcents. Les abondances des minéraux clairs - ici le quartz, l'albite et l'orthoclase - peuvent donc avoir été diminuées au profit des minéraux les plus sombres comme la biotite (Figure 3.17).

Le contexte particulièrement difficile d'une mine en activité, avec les variations de texture, d'humidité, et la poussière recouvrant le sol, se combine donc aux problèmes de variabilité et de non linéarité abordés dans le deuxième chapitre. En outre, la minéralogie de la Mine Canadian Malartic s'est révélée être un défi particulier lorsqu'on parle de démixage spectral. L'albite, le quartz et l'orthoclase, minéraux majeurs du gisement (De Souza *et al.*, 2015, 2017; Helt *et al.*, 2014), sont en effet

spectralement plats (Figure 3.17). Par conséquent, peu d'information spectrale est capturée par l'image à 16 bandes du satellite WV3, limitant la distinction des différentes lithologies.

Malgré tout, des zonations se distinguent dans les cartes d'abondances obtenues (Figure 4.14). Ce dernier point met en évidence que, en dépit de toutes les difficultés rencontrées, une information lithologique différentielle a pu être tirée du démixage de l'image satellite.

### **5.3 Simulation de données et interpolation par krigeage**

Dans cette partie du projet, les données géochimiques ont été préparées en vue de leur fusion avec les résultats du démixage. Du fait de l'insuffisance des données disponibles, celles-ci ont cependant dû être simulées. Les résultats produits et les conclusions qui en sont tirées doivent donc être abordés avec prudence.

Les classifications des résultats de démixage et de krigeage ont montré une nette prévalence de ces derniers à identifier les lithologies observées. Un jeu de 92 analyses géochimiques (Tableau 4.8) a ainsi abouti à des performances de classification similaires à un jeu de 2000 échantillons (pixels) issus du démixage (Tableau 4.6).

Cependant, il est important de nuancer ces résultats du fait des méthodes de validation et de simulation qui ont été utilisées. Comme décrit dans la section 3.3.3A, les données géochimiques ont été simulées à partir d'un jeu restreint d'échantillons réels, et positionnés d'après un modèle-bloc lithologique (Figure 3.6). Or, ce dernier est le résultat d'une interpolation de carottes *loggées* et échantillonnées par les travailleurs de la compagnie. L'attribution de lithologies aux carottes de forage et aux échantillons, aussi rigoureuse et méthodique soit elle, dépend invariablement de l'appréciation du travailleur face à certains aspects visuels (Annels et Dominy, 2003; Ettensohn, 1994). Il existe donc une part de subjectivité dans les lithologies attribuées, et donc dans le modèle qui en résulte. À cette source d'erreur potentielle s'ajoute celle inhérente à la manipulation des carottes, depuis le site de forage jusqu'au site du *loggage* (Annels et Dominy, 2003; Ettensohn, 1994). Ainsi, le modèle lithologique utilisé est le résultat d'une interpolation – par nature incertaine – de données elles-mêmes sujettes aux erreurs. Enfin et surtout, la modélisation sous forme de blocs homogènes, bien que

pratique pour planifier l'extraction des roches, n'est pas représentative de la nature continue du gisement. Tous ces aspects sont donc autant d'éléments qui vont éloigner le modèle lithologique utilisé de la réalité.

Dans cette thèse, ce modèle-bloc (Figure 3.6) est malgré tout utilisé pour distribuer spatialement les échantillons simulés. Il est ensuite utilisé pour évaluer les résultats de classification du krigeage, mais également du démixage. Ces derniers traduisent cependant la nature réelle du terrain. Cette stratégie entraîne donc une sous-estimation de l'aptitude du démixage à capturer l'information lithologique. À l'inverse, l'aptitude des données géochimiques est, quant à elle, surestimée par rapport à la réalité.

Une autre déviation importante provient de l'utilisation de données géochimiques simulées. En effet, la simulation ne tient pas compte des difficultés propres au processus d'échantillonnage de matériaux naturels comme l'effet pépité, la non-représentativité des échantillons, les erreurs de mesures, etc. (Abzalov, 2016; Marjoribanks, 2010).

Toute conclusion quant à l'aptitude réelle des deux sources à capturer l'information lithologique dans le contexte de la Mine Canadian Malartic est donc hors de portée. Néanmoins, cette étape de la recherche a permis de présenter une nouvelle approche de caractérisation lithologique par fusion, soit l'objectif final de cette thèse.

#### **5.4 Le démixage peut-il aider à la caractérisation dans ce contexte ?**

Combiner les deux sources d'information pour en exploiter la complémentarité constitue l'aboutissement de cette thèse. Cependant, la caractérisation lithologique par fusion évidentielle a montré des améliorations « limitées ».

Les classifications des cartes d'abondance issues du démixage ont abouti à des performances faibles, allant de 46,9 % pour 100 échantillons à 61,2 % pour 2000 échantillons (Tableau 4.6). On peut donc de prime abord douter de la pertinence d'intégrer cette information à des classifications géochimiques aux résultats bien supérieurs (Tableau 4.8). Des dégradations des performances sont en effet constatées lorsque les jeux d'entraînement du démixage sont inférieurs à 800 échantillons (Tableau 4.9). De même, les améliorations obtenues plafonnent à 6,4 % pour le jeu d'entraînement le plus grand côté démixage (2000 échantillons), et le plus petit côté

géochimie (92 échantillons). Face à ces résultats, l'intégration du démixage ne semble envisageable que dans le cadre de caractérisations préliminaires d'un gisement, quand les données disponibles sont encore limitées.

Heureusement, la fusion évidentielle fournit également une appréciation de l'incertitude de la classification (Shafer, 1976b). Les variations des précisions en fonction de cette incertitude ont montré que celles-ci pouvaient être utilisées comme seuil, permettant de rejeter les résultats jugés trop incertains (Figure 4.27).

## Chapitre 6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

### 6.1 Conclusion

La Mine Canadian Malartic est une mine à ciel ouvert qui exploite un gisement de type *faible teneur grand tonnage* en utilisant des méthodes d'extraction conventionnelles. Ces méthodes génèrent cependant une quantité considérable de poussière qui, combinée à l'humidité des chemins arrosés, affecte les spectres des surfaces observées. Par ailleurs, la minéralogie rencontrée dans le gisement, largement dominée pour le quartz, l'albite et l'orthoclase, apporte peu d'information spectrale.

Le premier objectif a donc été d'identifier le modèle de démixage le plus apte à extraire une information lithologique dans ce contexte. La comparaison des modèles de démixage d'après leur aptitude à quantifier les abondances minéralogiques a abouti à la sélection de la nouvelle approche développée dans cette thèse : l'approche *Neighbor Band Ratio Unmixing*. Son application sur l'image hyperspectrale AVIRIS de Cuprite a confirmé ce choix en retrouvant le plus fidèlement les distributions spatiales de sept des neuf minéraux cartographiés. Cependant, les résultats ont également montré que des abondances minéralogiques précises ne sont pas à la portée des méthodes de démixage.

Pour composer avec le problème d'humidité, une fonction linéaire calibrée en laboratoire a été intégrée au processus de démixage. Malgré cette modification, son application sur une image WV3 de la mine a abouti à des résultats mitigés. Les abondances des minéraux se sont en effet révélées encore largement impactées par les variations d'humidité au sol. Néanmoins, les cartes d'abondance produites ont mis en évidence des zonation permettant d'extraire une information sur la lithologie du gisement.

Pour combiner cette information lithologique à celle tirée de données géochimiques, la stratégie choisie a été d'utiliser la fusion évidentielle. Vu le manque de données disponibles, cette stratégie a d'abord nécessité de simuler des échantillons à l'aide de fonctions copules. Les comparaisons entre les classifications géochimiques et celles issues de la fusion ont montré une contribution générale particulièrement faible du démixage pour la caractérisation lithologique. Malgré les difficultés méthodologiques rencontrées, plusieurs conclusions peuvent être tirées de ces résultats :

- Le contexte difficile d'une mine en activité génère des biais dans l'information spectrale acquise. La poussière va ainsi masquer les roches sous-jacentes alors que l'humidité va directement influencer sur les spectres mesurés.
- La minéralogie est un élément déterminant dans l'aptitude du démixage à extraire un renseignement lithologique. Le gisement de la Mine Canadian Malartic, largement dominé par des minéraux spectralement plats, n'offre ainsi que peu d'information spectrale.
- La géochimie semble être une source d'information particulièrement efficace pour discriminer les lithologies échantillonnées. Cette conclusion doit cependant être considérée avec prudence puisque les résultats présentés dans cette thèse sont surestimés du fait des méthodes et des données utilisées.
- À l'inverse, le démixage ne semble fournir que peu d'information lithologique qui ne soit pas déjà capturée par les analyses géochimiques. Là encore, cette conclusion doit cependant être considérée avec un certain recul. L'information lithologique extraite est en effet dépendante de nombreux facteurs tels que les méthodes d'extraction, l'humidité présente en surface, le type de gisement rencontré, la nature des minéraux présents, les résolutions du capteur utilisé, etc. Enfin, les résultats présentés sont, à l'inverse des données géochimiques, sous-estimés du fait des contraintes méthodologiques rencontrées.
- La fusion évidentielle est apparue comme un outil pratique pour combiner des sources de données différentes. Elle fournit par ailleurs une mesure de l'incertitude associée aux résultats. Cette incertitude a montré avoir un lien étroit avec les précisions des classifications obtenues par fusion. Ainsi, ce paramètre peut être utilisé pour définir un seuil d'incertitude maximum au-delà duquel les résultats doivent être rejetés. Malgré une faible capacité à discriminer les lithologies, le démixage spectral intégré par fusion évidentielle peut donc aider à la caractérisation lithologique avec un degré de confiance contrôlé.

Même si une contribution du démixage est possible, une application réelle, industrielle, exigerait une adaptation des méthodes d'exploitation et des travaux de recherche additionnels. Le problème de la poussière masquant les surfaces rocheuses est, de fait, difficile à résoudre et omniprésent dans les mines en activité. Une alternative possible serait l'application du démixage aux fronts (murs) d'exploitation.



L'hypothèse selon laquelle le démixage d'images multi- ou hyperspectrales apporte une information complémentaire aux données conventionnelles est donc validée avec certaines restrictions. Cette validation va en effet dépendre des données (spectrales et conventionnelles) considérées et du contexte d'application. Des recherches additionnelles sont nécessaires pour mieux identifier ces restrictions.

La DSMT a montré son efficacité à intégrer l'information tirée du démixage à celle issue de la géochimie. L'hypothèse selon laquelle la fusion évidentielle permet de combiner des sources d'informations géochimiques et optiques conflictuelles et incertaines est donc validée.

## 6.2 Perspectives

L'approche NBRU développée dans cette thèse s'est démarquée par ses aptitudes à estimer les abondances minéralogiques en laboratoire et à identifier les distributions spatiales des minéraux sur une image hyperspectrale. Au vu des résultats produits et des contraintes rencontrées, cette nouvelle approche apparaît donc à prioriser pour la cartographie de scènes géologiques naturelles ou de mines en activité. Les performances sont cependant dépendantes de la résolution spectrale des mesures. Les tests de la FH ont ainsi montré des différences significatives entre les abondances estimées avec les spectres ASD et ceux obtenus avec les spectres WV3. Reconsidérer le démixage de la mine avec des données hyperspectrales pourrait donc aboutir à des améliorations substantielles.

Des améliorations de l'approche NBRU peuvent être envisagées. Le caractère nonlinéaire étant conditionné par un unique paramètre  $n$ , d'autres valeurs, voir une valeur laissée libre lors de l'optimisation, méritent d'être considérées. Un inconvénient important de l'approche provient également de certains cas limites, lorsque la valeur de la bande spectrale utilisée au dénominateur du ratio de bandes est égale à zéro. Une version normalisée de la méthode peut donc être envisagée pour circonvenir à ce problème.

L'objectif autour duquel la méthode a été développée est une aide à la caractérisation lithologique du plancher de la mine. Comme énoncé plus haut, une mine en activité produit énormément de poussière qui va recouvrir et masquer les surfaces des roches

en place. Pour limiter l'impact de cette poussière sur les résultats, une stratégie alternative serait de limiter les lieux d'application aux surfaces récemment dynamitées. Les surfaces observées par le capteur imageur optique sont ainsi exclusivement *in situ*, sans contamination par les poussières du reste de la mine.

L'accès limité à des données de terrain a entraîné des contraintes méthodologiques qui ont abouti à des biais. Dans le cas où davantage de données sont disponibles, des améliorations significatives de la méthode présentée pourraient être réalisées. Posséder un nombre d'échantillons suffisant permettrait ainsi de directement réaliser l'interpolation et l'entraînement de la classification sur des échantillons réels. De la même manière, plutôt que d'utiliser un modèle, valider les résultats sur des lithologies identifiées directement sur place, au moment de l'acquisition de l'image, serait une source d'erreur en moins.

Enfin, un élément réduisant l'efficacité de la fusion évidentielle a été l'écart entre les scores des classifieurs et les précisions réelles des classifications. Comme on l'a vu, ces écarts étaient notamment dus au surapprentissage du fait de jeux d'entraînement trop petits. Une autre origine était l'aspect discrétisé du modèle-bloc, que l'interpolation par krigeage ne pouvait pas reproduire. Encore une fois, un jeu d'entraînement suffisamment grand et des données de validation réelles amélioreraient considérablement l'apport de la fusion.

## RÉFÉRENCES

---

- Abzalov, M. (2016) Applied Mining Geology. Modern Approaches in Solid Earth Sciences (p. 443). Springer.
- Adams, J. B. et Filice, A. L. (1967) Spectral reflectance 0.4 to 2.0 microns of silicate rock powders. Journal of Geophysical Research, vol. 72, n°22, p. 5705-5715.
- Althuwaynee, O. F., Pradhan, B. et Lee, S. (2012) Application of an evidential belief function model in landslide susceptibility mapping. Computers & Geosciences, vol. 44, p. 120-135.
- Altmann, Y., Halimi, A., Dobigeon, N. et Tourneret, J.-Y. (2012) Supervised nonlinear spectral unmixing using a postnonlinear mixing model for hyperspectral imagery. IEEE Transactions on Image Processing, vol. 21, n°6, p. 3017-3025.
- Annels, A. et Dominy, S. (2003) Core recovery and quality: important factors in mineral resource estimation. Applied Earth Science, vol. 112, n°3, p. 305-312.
- Anthony, J. W., Bideaux, R. A., Bladh, K. W. et Nichols, M. C. (2003) Handbook of Mineralogy (<http://www.handbookofmineralogy.org/>). Mineralogical Society of America.
- Arnaud, M. et Emery, X. (2000) Estimation et interpolation spatiale: méthodes déterministes et méthodes géostatistiques. Hermès.
- Ashley, R. P. et Abrams, M. J. (1980) Alteration mapping using multispectral images; Cuprite mining district, Esmeralda County, Nevada. US Geological Survey, 17p.

- Asner, G. P. et Lobell, D. B. (2000) A biogeophysical approach for automated SWIR unmixing of soils and vegetation. *Remote sensing of environment*, vol. 74, n°1, p. 99-112.
- Bach, H. et Mauser, W. (1994) Modelling and model verification of the spectral reflectance of soils under varying moisture conditions. *Proceedings of IGARSS'94-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 4, p. 2354-2356. IEEE.
- Bazaraa, M. S., Sherali, H. D. et Shetty, C. M. (2013) *Nonlinear programming: theory and algorithms*. John Wiley & Sons.
- Ben-Dor, E., Patkin, K., Banin, A. et Karnieli, A. (2002) Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data - A case study over soils in Israel. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, n°6, p. 1043-1062.
- Bloch, I., Collin, B., Ealet, F., Garbay, C., Le Cadre, J.-P., Maitre, H., Nimier, V., Raynaud, R. et Rombaut, M. (2003) *Fusion d'informations en traitement du signal et des images*. (Lavoisier, Dir.). Hermes Sciences.
- Bloch, I. et Maitre, H. (1994) Fusion de données en traitement d'images: modèles d'information et décisions. *TS. Traitement du signal*, vol. 11, n°6, p. 435-446.
- Boubanga-Tombet, S., Huot, A., Vitins, I., Heuberger, S., Veuve, C., Eisele, A., Hewson, R., Guyot, E., Marcotte, F., Chamberland, M., 2018. Thermal Infrared Hyperspectral Imaging for Mineralogy Mapping of a Mine Face. *Remote Sensing* 10, p. 1518.
- Bouyé, E., Durrleman, V., Nikeghbali, A., Riboulet, G. et Roncalli, T. (2000) Copulas for finance-a reading guide and some applications. Available at SSRN 1032533.
- Breiman, L. (1996) Bagging predictors. *Machine learning*, vol. 24, n°2, p. 123-140.

- Breiman, L. (2001) Random forests. *Machine learning*, vol. 45, n°1, p. 5-32.
- Carranza, E. J. (2011) From predictive mapping of mineral prospectivity to quantitative estimation of number of undiscovered prospects. *Resource Geology*, vol. 61, n°1, p. 30-51.
- Carranza, E. J. M. (2015) Data-driven evidential belief modeling of mineral potential using few prospects and evidence with missing values. *Natural Resources Research*, vol. 24, n°3, p. 291-304.
- Carranza, E. J. M. et Hale, M. (2003) Evidential belief functions for data-driven geologically constrained mapping of gold potential, Baguio district, Philippines. *Ore Geology Reviews*, vol. 22, n°1-2, p. 117-132.
- Carranza, E. J. M., Van Ruitenbeek, F., Hecker, C., van der Meijde, M., van der Meer, F. (2008) Knowledge-guided data-driven evidential belief modeling of mineral prospectivity in Cabo de Gata, SE Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 10, n°3, p. 374-387.
- Chakravorty, S. et Sinha, D. (2016) Development of higher-order model for nonlinear interactions in hyperspectral data of mangrove forests. *Current Science* (00113891), vol. 111, n°6.
- Chandrasekhar, S. (1960) *Radiative transfer*. Courier Corporation.
- Cheek, L. C. et Pieters, C. M. (2014) Reflectance spectroscopy of plagioclase-dominated mineral mixtures: Implications for characterizing lunar anorthosites remotely. *American Mineralogist*, vol. 99, n°10, p. 1871-1892.
- Chen, J., Jia, X., Yang, W. et Matsushita, B. (2009a) Generalization of subpixel analysis for hyperspectral data with flexibility in spectral similarity measures. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 47, n°7, p. 2165-2171.

- Chen, J., Jia, X., Yang, W. et Matsushita, B. (2009b) Generalization of subpixel analysis for hyperspectral data with flexibility in spectral similarity measures. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 47, n°7, p. 2165-2171.
- Chiles, J.-P. et Delfiner, P. (2009) *Geostatistics: modeling spatial uncertainty* (Vol. 497). John Wiley & Sons.
- Clark, R. N. (1999) Chapter 1: Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. *Manual of remote sensing*, vol. 3, n°3-58, p. 2-2.
- Clark, R. N., King, T. V., Klejwa, M., Swayze, G. A. et Vergo, N. (1990) High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 95, n°B8, p. 12653-12680.
- Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., Kokaly, R. F., Sutley, S. J., Dalton, J. B., McDougal, R. R. et Gent, C. A. (2003) Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems. *Journal of Geophysical Research: Planets*, vol. 108, n°E12.
- Cohen J. (1960) A coefficient of agreement for nominal scales., *Educ. Psychol. Meas.*, \_\_\_\_\_ 20, 27-46.
- Cryderman, C., Mah, S.B., Shufletoski, A., n.d. Evaluation of UAV Photogrammetric Accuracy for Mapping and Earthworks Computations 9, p. 309-317.
- De Souza, S., Dubé, B., McNicoll, V., Dupuis, C., Mercier-Langevin, P., Creaser, R. et Kjarsgaard, I. (2015) Geology, hydrothermal alteration, and genesis of the world-class Canadian Malartic stockwork-disseminated Archean gold deposit, Abitibi, Quebec. *Targeted Geoscience Initiative 4: Contributions to the Understanding of Precambrian Lode Gold Deposits and Implications for Exploration*, p. 113-126.

- De Souza, S., Dubé, B., McNicoll, V., Mercier-Langevin, P., Creaser, R. et Kjarsgaard, I. (2017) Chapter 8: (Day 5 – Part I) Geology and disseminated stockwork gold mineralization at the world-class Canadian Malartic mine, Abitibi greenstone belt, Canada. GEOLOGICAL SURVEY OF CANADA - OPEN FILE 8317: Precious- and base-metal deposits of the southern Abitibi greenstone belt, Superior Province, Ontario and Quebec: 14th Biennial Society for Geology Applied to Mineral Deposits meeting field trip guidebook, p. 55-65.
- Dempster, A. P. (1968a) Upper and lower probabilities generated by a random closed interval. *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 39, n°3, p. 957-966.
- Dempster, A. P. (1968b) A generalization of Bayesian inference. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, vol. 1, p. 205-247.
- Devroye, L. (1986) Sample-based non-uniform random variate generation. *Proceedings of the 18th conference on Winter simulation*, p. 260-265. ACM.
- Dezert, J. (2002) Foundations for a new theory of plausible and paradoxical reasoning. *Information and Security*, vol. 9, p. 13-57.
- Dezert, J. et Smarandache, F. (2004) Presentation of DS<sub>m</sub>T. *In* S. F. and D. J. (dir.), *Advances and Applications of DS<sub>m</sub>T for Information Fusion*, vol. 1, p. 438.
- Dezert, J. et Smarandache, F. (2006) Proportional conflict redistribution rules for information fusion. *Advances and applications of DS<sub>m</sub>T for Information Fusion-Collected works*, vol. 2, p. 3-68.
- Dezert, J. et Smarandache, F. (2008) A new probabilistic transformation of belief mass assignment. *2008 11th International Conference on Information Fusion*, p. 1-8. IEEE.

- Dezert, J. et Smarandache, F. (2009) An introduction to DSMT. *In* S. F. and D. J (dir.), *Advances and Applications of DSMT for Information Fusion, Collected Works, Volume3*, vol. 3, p. 4-74. American Research Press.
- Dezert, J. et Smarandache, F. (2010) An introduction to DSMT in information fusion. *BRAIN. Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*, vol. 1, p. 1-64.
- Dezert, J. et Tchamova, A. (2011) On the behavior of Dempster's rule of combination.
- Dobigeon, N., Tourneret, J.-Y., Richard, C., Bermudez, J. C. M., McLaughlin, S. et Hero, A. O. (2014) Nonlinear unmixing of hyperspectral images: Models and algorithms. *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, n°1, p. 82-94.
- Drumetz, L., Veganzones, M.-A., Henrot, S., Phlypo, R., Chanussot, J. et Jutten, C. (2016) Blind hyperspectral unmixing using an extended linear mixing model to address spectral variability. *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 25, n°8, p. 3890-3905.
- Du, P., Yuan, L., Xia, J. et He, J. (2011) Fusion and classification of Beijing-1 small satellite remote sensing image for land cover monitoring in mining area. *Chinese Geographical Science*, vol. 21, n°6, p. 656-665.
- Du, Q., Raksuntorn, N., Younan, N. H. et King, R. L. (2008) End-member extraction for hyperspectral image analysis. *Applied Optics*, vol. 47, n°28, p. F77-F84.
- Elachi, C. et Van Zyl, J. J. (2006) *Introduction to the physics and techniques of remote sensing (Vol. 28)*. John Wiley & Sons.
- Ettensohn, F. (1994) Development and Potential of Core-Logging Manuals. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 17, n°3, p. 393-398.



- Fan, W., Hu, B., Miller, J. et Li, M. (2009) Comparative study between a new nonlinear model and common linear model for analysing laboratory simulated-forest hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 30, n°11, p. 2951-2962.
- Farifteh, J., Meer, F. Van der, Atzberger, C. et Carranza, E. J. M. (2007) Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra: A comparison of two adaptive methods (PLSR and ANN). *Remote Sensing of Environment*, vol. 110, n°1, p. 59-78.
- Farrand, W. H. et Harsanyi, J. C. (1997) Mapping the distribution of mine tailings in the Coeur d'Alene River Valley, Idaho, through the use of a constrained energy minimization technique. *Remote Sensing of Environment*, vol. 59, n°1, p. 64-76.
- Feizizadeh, B., Blaschke, T. et Nazmfar, H. (2014) GIS-based ordered weighted averaging and Dempster-Shafer methods for landslide susceptibility mapping in the Urmia Lake Basin, Iran. *International Journal of Digital Earth*, vol. 7, n°8, p. 688-708.
- Feng, J., Rivard, B., Gallie, A. et Sanchez-Azofeifa, A. (2011) Rock type classification of drill core using continuous wavelet analysis applied to thermal infrared reflectance spectra. *International journal of remote sensing*, vol. 32, n°16, p. 4489-4510.
- Fernández-Manso, A., Quintano, C. et Roberts, D. (2012) Evaluation of potential of multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) for surface coal mining affected area mapping in different world forest ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, vol. 127, p. 181-193.

- Ferrier, G. (1999) Application of imaging spectrometer data in identifying environmental pollution caused by mining at Rodaquilar, Spain. *Remote Sensing of Environment*, vol. 68, n°2, p. 125-137.
- Galvão, L. S., Pizarro, M. A. et Epiphonio, J. C. N. (2001) Variations in reflectance of tropical soils: spectral-chemical composition relationships from AVIRIS data. *Remote Sensing of environment*, vol. 75, n°2, p. 245-255.
- Gandhi, S. M. et Sarkar, B. C. (2016) *Metals and Minerals. Essentials of Mineral Exploration and Evaluation*, p. 1-21.
- Goetz, A. F., Rock, B. N. et Rowan, L. C. (1983) Remote sensing for exploration; an overview. *Economic Geology*, vol. 78, n°4, p. 573-590.
- Golder Associés (2014) *Programme de Caractérisation Géochimique 2012-2013*, Mine Canadian Malartic, Malartic, Québec. Golder Associés.
- Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B. K., Sibley, S. F. et Sonnemann, G. (2011a) Recycling rates of metals: A status report. United Nations Environment Programme.
- Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B. K., Sibley, S. F. et Sonnemann, G. (2011b) What do we know about metal recycling rates? *Journal of Industrial Ecology*, vol. 15, n°3, p. 355-366.
- Halimi, A., Altmann, Y., Dobigeon, N. et Tournéret, J.-Y. (2011) Nonlinear unmixing of hyperspectral images using a generalized bilinear model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, n°11, p. 4153-4162.
- Hapke, B. (1981) Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. Theory. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 86, n°B4, p. 3039-3054.

- Hapke, B. (2012) Theory of reflectance and emittance spectroscopy. Cambridge university press.
- Hapke, B. et Hoen, H. van (1963) Photometric studies of complex surfaces, with applications to the moon. Journal of Geophysical Research, vol. 68, n°15, p. 4545-4570.
- He, B., Cui, Y., Chen, C., Chen, J. et Liu, Y. (2011) Uncertainty mapping method for mineral resources prospectivity integrating multi-source geology spatial data sets and evidence reasoning model. 2011 19th International Conference on Geoinformatics, p. 1-5. IEEE.
- Helt, K. M., Williams-Jones, A. E., Clark, J. R., Wing, B. A. et Wares, R. P. (2014) Constraints on the genesis of the Archean oxidized, intrusion-related Canadian Malartic gold deposit, Quebec, Canada. Economic Geology, vol. 109, n°3, p. 713-735.
- Hengl, T. (2007) A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables. European Commission, Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. Italy.
- Hengl, T. (2009) A practical guide to geostatistical mapping (Vol. 52). Hengl Amsterdam.
- Heylen, R., Parente, M. et Gader, P. (2014) A review of nonlinear hyperspectral unmixing methods. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 7, n°6, p. 1844-1868.
- Heylen, R. et Scheunders, P. (2015) A multilinear mixing model for nonlinear spectral unmixing. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 54, n°1, p. 240-251.

- Heylen, R. et Scheunders, P. (2016) A multilinear mixing model for nonlinear spectral unmixing. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 54, n°1, p. 240-251.
- Hiroi, T. et Pieters, C. M. (1994) Estimation of grain sizes and mixing ratios of fine powder mixtures of common geologic minerals. *Journal of Geophysical Research: Planets*, vol. 99, n°E5, p. 10867-10879.
- Hopewell, J., Dvorak, R. et Kosior, E. (2009) Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, n°1526, p. 2115-2126.
- Hosseinjani, M. et Tangestani, M. H. (2011) Mapping alteration minerals using sub-pixel unmixing of ASTER data in the Sarduiyeh area, SE Kerman, Iran. *International Journal of Digital Earth*, vol. 4, n°6, p. 487-504.
- Hubbard, B. E. et Crowley, J. K. (2005) Mineral mapping on the Chilean–Bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery: Data dimensionality issues and solutions. *Remote Sensing of Environment*, vol. 99, n°1-2, p. 173-186.
- Hunt, G. R. (1977) Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, vol. 42, n°3, p. 501-513.
- Jebur, M. N., Pradhan, B. et Tehrany, M. S. (2015) Manifestation of LiDAR-derived parameters in the spatial prediction of landslides using novel ensemble evidential belief functions and support vector machine models in GIS. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 8, n°2, p. 674-690.

- Kemper, T. et Sommer, S. (2004) Use of airborne hyperspectral data to estimate residual heavy metal contamination and acidification potential in the Guadiamar floodplain Andalusia, Spain after the Aznacollar mining accident. *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology IV*, vol. 5574, p. 224-234. International Society for Optics and Photonics.
- Keshava, N. et Mustard, J. F. (2002) Spectral unmixing. *IEEE signal processing magazine*, vol. 19, n°1, p. 44-57.
- Klir, G. J. et Yuan, B. (1995) *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications*. Prentice Hall PTR.
- Knadel, M., Deng, F., Alinejadian, A., Jonge, L. Wollesen de, Moldrup, P. et Greve, M. H. (2014) The Effects of Moisture Conditions -From Wet to Hyper dry- On Visible Near-Infrared Spectra of Danish Reference Soils. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 78, n°2, p. 422.
- Kokaly, R. F., Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., Hoefen, T. M., Pearson, N. C., Wise, R. A., Benzel, W. M., Lowers, H. A., Driscoll, R. L. et others (2017) *USGS spectral library version 7*. US Geological Survey.
- Kruse, F. A. (1996) Identification and mapping of minerals in drill core using hyperspectral image analysis of infrared reflectance spectra. *International journal of remote sensing*, vol. 17, n°9, p. 1623-1632.
- Kruse, F. A., Baugh, W. M. et Perry, S. L. (2015) Validation of DigitalGlobe WorldView-3 Earth imaging satellite shortwave infrared bands for mineral mapping. *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 9, n°1, p. 096044.
- Kuester, M. (2016) *Radiometric Use of WorldView-3 Imagery*. DigitalGlobe: Longmont, CO, USA.

- Landis J.R., Koch G.G. : The Measurement of Observer Agreement for Categorical \_\_\_\_\_ Data, *Biometrics*, 1977a, 33, p. 159-174
- Lee, S., Hwang, J. et Park, I. (2013) Application of data-driven evidential belief functions to landslide susceptibility mapping in Jinbu, Korea. *Catena*, vol. 100, p. 15-30.
- Likkason, O. K., Shemang, E. M. et Suh, C. E. (1997) The application of evidential belief function in the integration of regional geochemical and geological data over the Ife-Ilesha goldfield, Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 25, n°3, p. 491-501.
- Lin, H. et Zhang, X. (2017) Retrieving the hydrous minerals on Mars by sparse unmixing and the Hapke model using MRO/CRISM data. *Icarus*, vol. 288, p. 160-171.
- Liu, Y., Cheng, Q., Xia, Q. et Wang, X. (2015) The use of evidential belief functions for mineral potential mapping in the Nanling belt, South China. *Frontiers of Earth Science*, vol. 9, n°2, p. 342-354.
- Liu, Z. G., Pan, Q. et Dezert, J. (2013) Evidential classifier for imprecise data based on belief functions. *Knowledge-Based Systems*, vol. 52, p. 246-257.
- Lobell, D. B. et Asner, G. P. (2002) Moisture Effects on Soil Reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 66, n°3, p. 722.
- Magendran, T. et Sanjeevi, S. (2014) Hyperion image analysis and linear spectral unmixing to evaluate the grades of iron ores in parts of Noamundi, Eastern India. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 26, p. 413-426.

- Mallat, S. G. et Zhang, Z. (1993) Matching pursuits with time-frequency dictionaries. IEEE Transactions on signal processing, vol. 41, n°12, p. 3397-3415.
- Marinoni, A. et Gamba, P. (2016) Accurate Detection of Anthropogenic Settlements in Hyperspectral Images by Higher Order Nonlinear Unmixing. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 9, n°5, p. 1792-1801.
- Marjoribanks, R. (2010) Geological methods in mineral exploration and mining. Springer Science & Business Media.
- Meerdink, S. K., Hook, S. J., Abbott, E. A. et Roberts, D. A. (s.d.) The ECOSTRESS Spectral Library 1.0.
- Meganem, I., Déliot, P., Briottet, X., Deville, Y. et Hosseini, S. (2013) Linear–quadratic mixing model for reflectances in urban environments. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 52, n°1, p. 544-558.
- MERN (2012) Les Grands Ensembles Géologiques du Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles,.
- Mielke, C., Boesche, N., Rogass, C., Kaufmann, H., Gauert, C., de Wit, M., 2014. Spaceborne Mine Waste Mineralogy Monitoring in South Africa, Applications for Modern Push-Broom Missions: Hyperion/OLI and EnMAP/Sentinel-2. Remote Sensing 6, p. 6790–6816.
- Mine Canadian Malartic (2019) Une histoire d'or à Malartic.
- Mitraka, Z., Del Frate, F. et Carbone, F. (2016) Nonlinear spectral unmixing of landsat imagery for urban surface cover mapping. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 9, n°7, p. 3340-3350.

- Mogaji, K. A., Lim, H. S. et Abdullah, K. (2015) Regional prediction of groundwater potential mapping in a multifaceted geology terrain using GIS-based Dempster-Shafer model. *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 8, n°5, p. 3235-3258.
- Mora, B., Fournier, R. A. et Foucher, S. (2011) Application of evidential reasoning to improve the mapping of regenerating forest stands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 13, n°3, p. 458-467.
- Moroz, L. et Arnold, G. (1999) Influence of neutral components on relative band contrasts in reflectance spectra of intimate mixtures: Implications for remote sensing: 1. Nonlinear mixing modeling. *Journal of Geophysical Research: Planets*, vol. 104, n°E6, p. 14109-14121.
- Murphy, R., Schneider, S., Monteiro, S., 2014. Mapping Layers of Clay in a Vertical Geological Surface Using Hyperspectral Imagery: Variability in Parameters of SWIR Absorption Features under Different Conditions of Illumination. *Remote Sensing* 6, p. 9104–9129.
- Murphy, R.J., Monteiro, S.T., 2013. Mapping the distribution of ferric iron minerals on a vertical mine face using derivative analysis of hyperspectral imagery (430–970nm). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 75, p. 29–39.
- Mustard, J. F. (1992) Chemical analysis of actinolite from reflectance spectra. *American Mineralogist*, vol. 77, n°3-4, p. 345-358.
- Mustard, J. F., Li, L. et He, G. (1998) Nonlinear spectral mixture modeling of lunar multispectral data: implications for lateral transport. *Journal of Geophysical Research E: Planets*, vol. 103, n°E8, p. 19419-19425.



- Mustard et Pieters (1987a) Abundance and distribution of ultramafic microbreccia in Moses Rock dike: Quantitative application of mapping spectroscopy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 92, n°B10, p. 10376-10390.
- Mustard et Pieters (1987b) Quantitative abundance estimates from bidirectional reflectance measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 92, n°B4, p. E617–E626.
- Mustard et Pieters (1989) Photometric phase functions of common geologic minerals and applications to quantitative analysis of mineral mixture reflectance spectra. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 94, n°B10, p. 13619-13634.
- Nampak, H., Pradhan, B. et Manap, M. A. (2014) Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *Journal of Hydrology*, vol. 513, p. 283-300.
- Nascimento, J. M. et Bioucas-Dias, J. M. (2009) Nonlinear mixture model for hyperspectral unmixing. *Image and Signal Processing for Remote Sensing XV*, vol. 7477, p. 74770I. International Society for Optics and Photonics.
- Nash, D. B. et Conel, J. E. (1974) Spectral reflectance systematics for mixtures of powdered hypersthene, labradorite, and ilmenite. *Journal of Geophysical Research*, vol. 79, n°11, p. 1615-1621.
- Nelsen, R. B. (2007) *An introduction to copulas*. Springer Science & Business Media.
- Onera, J. D. et Smarandache, F. (2012) AN INTRODUCTION TO DSMT FOR INFORMATION FUSION. *New Mathematics and Natural Computation*, vol. 08, n°03, p. 343-359.

- Park, N.-W. (2011) Application of Dempster-Shafer theory of evidence to GIS-based landslide susceptibility analysis. *Environmental Earth Sciences*, vol. 62, n°2, p. 367-376.
- Perrouy, S., Gaillard, N., Piette-Lauzière, N., Mir, R., Bardoux, M., Olivo, G. R., Linnen, R. L., Bérubé, C. L., Lypaczewski, P., Guilmette, C., Feltrin, L. et Morris, W. A. (2017) Structural setting for Canadian Malartic style of gold mineralization in the Pontiac Subprovince, south of the Cadillac Larder Lake Deformation Zone, Québec, Canada. *Ore Geology Reviews*, vol. 84, p. 185-201.
- Plaza, A., Martinez, P., Pérez, R. et Plaza, J. (2004) A quantitative and comparative analysis of endmember extraction algorithms from hyperspectral data. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 42, n°3, p. 650-663.
- Plaza, J., Hendrix, E. M., Garcia, I., Martín, G. et Plaza, A. (2012) On endmember identification in hyperspectral images without pure pixels: A comparison of algorithms. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, vol. 42, n°2-3, p. 163-175.
- Potts, P. J. (1992) *A Handbook of Silicate Rock Analysis*. Springer US.
- Poulet, F., Cuzzi, J., Cruikshank, D., Roush, T. et Dalle Ore, C. (2002) Comparison between the Shkuratov and Hapke scattering theories for solid planetary surfaces: Application to the surface composition of two Centaurs. *Icarus*, vol. 160, n°2, p. 313-324.
- Poulet, F. et Erard, S. (2004) Nonlinear spectral mixing: Quantitative analysis of laboratory mineral mixtures. *Journal of Geophysical Research: Planets*, vol. 109, n°E2.

- Pour, A. B. et Hashim, M. (2011) Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 42, n°6, p. 1309-1323.
- Pour, A. B., Hashim, M. et Marghany, M. (2011) Using spectral mapping techniques on short wave infrared bands of ASTER remote sensing data for alteration mineral mapping in SE Iran. *International Journal of Physical Sciences*, vol. 6, n°4, p. 917-929.
- Pu, R., Gong, P., Michishita, R. et Sasagawa, T. (2008) Spectral mixture analysis for mapping abundance of urban surface components from the Terra/ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, n°3, p. 939-954.
- Raeva, P.L., Filipova, S.L., Filipov, D.G., 2016. VOLUME COMPUTATION OF A STOCKPILE – A STUDY CASE COMPARING GPS AND UAV MEASUREMENTS IN AN OPEN PIT QUARRY. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLI-B1, p. 999–1004.
- Ran, Y. H., Li, X., Lu, L. et Li, Z. Y. (2012) Large-scale land cover mapping with the integration of multi-source information based on the Dempster-Shafer theory. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 26, n°1, p. 169-191.
- Ray, T. W. et Murray, B. C. (1996) Nonlinear spectral mixing in desert vegetation. *Remote sensing of environment*, vol. 55, n°1, p. 59-64.
- Reichl, C., Schatz, M. et Zsak, G. (2017) *WORLD MINING DATA*. Minerals Production, vol. 32.

- Ressources Naturelles Canada (2018a) Tableau 26 - Dépenses d'exploration minérale et de mise en valeur de gisements, par produit minéral recherché, 2013 - 2017 actuel et intentions des dépenses révisées pour 2018. Gouvernement du Canada.
- Ressources Naturelles Canada (2018b) Statistiques annuelles de la production minérale. Gouvernement du Canada.
- Ressources Naturelles Canada (2018c) Données et faits saillants sur le secteur des ressources naturelles. Gouvernement du Canada.
- Richter, N., Staenz, K. et Kaufmann, H. (2008) Spectral unmixing of airborne hyperspectral data for baseline mapping of mine tailings areas. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, n°13, p. 3937-3956.
- Robert, F. (1989) Internal structure of the Cadillac tectonic zone southeast of Val d'Or, Abitibi greenstone belt, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 26, n°12, p. 2661-2675.
- Robert, F. (2001) Syenite-associated disseminated gold deposits in the Abitibi greenstone belt, Canada. *Mineralium Deposita*, vol. 36, n°6, p. 503-516.
- Roberts, D. A., Gardner, M., Church, R., Ustin, S., Scheer, G., Green, R. O. et Hall, E. (1994) Mapping Chaparral in the Santa Monica Mountains Using Multiple Endmember Spectral Mixture Models Remote sensing represents one means for rapid, re, vol. 4257, n°98.
- Rommel, D., Grumpe, A., Felder, M. P., Wöhler, C., Mall, U. et Kronz, A. (2017) Automatic endmember selection and nonlinear spectral unmixing of Lunar analog minerals. *Icarus*, vol. 284, p. 126-149.
- Rossi, M. E. et Deutsch, C. V. (2013) Mineral resource estimation. Springer Science & Business Media.

- Rowan, L. C., Mars, J. C. et Simpson, C. J. (2005) Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *Remote Sensing of Environment*, vol. 99, n°1-2, p. 105-126.
- Rowan, L. C., Schmidt, R. G. et Mars, J. C. (2006) Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 104, n°1, p. 74-87.
- Sabins, F. F. (1999) Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, vol. 14, n°3-4, p. 157-183.
- Shafer, G. (1976) *A mathematical theory of evidence* (Vol. 42). Princeton university press.
- Shkuratov, Y., Starukhina, L., Hoffmann, H. et Arnold, G. (1999) A Model of Spectral Albedo of Particulate Surfaces: Implications for Optical Properties of the Moon. *Icarus*, vol. 137, n°2, p. 235-246.
- Singer, R. et McCord, T. (1979) Mars: large scale mixing of bright and dark materials and properties of dark material. *Lunar and Planetary Science Conference*, vol. 10, p. 1128-1130.
- Sklar, A. (1973) Random variables, joint distribution functions, and copulas. *Kybernetika*, vol. 9, n°6, p. 449-460.
- Smarandache, F. et Dezert, J. (2004) *Applications and advances of DSMT for information fusion*. Am. Res. Press, Rehoboth.

- Smarandache, F. et Dezert, J. (2006) *Advances et Applications of DSMT for Information Fusion (Collected works)*, second volume: *Collected Works (Vol. 2)*. Infinite Study.
- Smarandache, F. et Dezert, J. (2014) *Advances and Applications of DSMT for Information Fusion, Vol. III: Collected Works*. Infinite Study.
- Smets, P. (1999) *Practical Uses of Belief Functions*. *Proceedings of the Fifteenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, UAI'99*, p. 612-621. Stockholm, Sweden : Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Smets, P. (2000) *Data fusion in the transferable belief model*. *Proceedings of the 3rd International Conference on Information Fusion, FUSION 2000*, vol. 1, n°2, p. 21-33.
- Somers, B., Asner, G. P., Tits, L. et Coppin, P. (2011) *Endmember variability in Spectral Mixture Analysis: A review*. *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, n°7, p. 1603-1616.
- Somers, B., Cools, K., Delalieux, S., Stuckens, J., Zande, D. Van der, Verstraeten, W. W. et Coppin, P. (2009) *Nonlinear Hyperspectral Mixture Analysis for tree cover estimates in orchards*. *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, n°6, p. 1183-1193.
- Somers, B., Delalieux, S., Verstraeten, W. W., Verbesselt, J., Lhermitte, S. et Coppin, P. (2009) *Magnitude-and shape-related feature integration in hyperspectral mixture analysis to monitor weeds in citrus orchards*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, n°11, p. 3630-3642.
- Swayze, G. A., Clark, R. N., Goetz, A. F. H., Livo, K. E., Breit, G. N., Kruse, F. A., Sutley, S. J., Snee, L. W., Lowers, H. A., Post, J. L., Stoffregen, R. E. et Ashley,

- R. P. (2014) A. Swayze\_Mapping Advanced Argillic Alteration at Cuprite.pdf, p. 1179-1221.
- Tangestani, M. H. et Moore, F. (2002) The use of Dempster–Shafer model and GIS in integration of geoscientific data for porphyry copper potential mapping, north of Shahr-e-Babak, Iran. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 4, n°1, p. 65-74.
- Taylor, G. R. (2000) Mineral and lithology mapping of drill core pulps using visible and infrared spectrometry. *Natural Resources Research*, vol. 9, n°4, p. 257-268.
- Tian, J. et Dezert, J. (2019) Fusion of multispectral imagery and DSMs for building change detection using belief functions and reliabilities. *International Journal of Image and Data Fusion*, vol. 10, n°1, p. 1-27.
- Tits, L., De Keersmaecker, W., Somers, B., Asner, G. P., Farifteh, J. et Coppin, P. (2012) Hyperspectral shape-based unmixing to improve intra- and interclass variability for forest and agro-ecosystem monitoring. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 74, p. 163-174.
- Trivedi, P. K., Zimmer, D. M. et others (2007) Copula modeling: an introduction for practitioners. *Foundations and Trends® in Econometrics*, vol. 1, n°1, p. 1-111.
- Van Der Meer, F., Werff, H. M. A. van der, Ruitenbeek, F. J. A. van, Hecker, C. A., Bakker, W. H., Noomen, M. F., Meijde, M. van der, Carranza, E. J. M., Smeth, J. B. de et Woldai, T. (2012) Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 14, n°1, p. 112-128.
- Vicente, L. E. et Souza Filho, C. R. de (2011) Identification of mineral components in tropical soils using reflectance spectroscopy and advanced spaceborne thermal

- emission and reflection radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, n°8, p. 1824-1836.
- Voorde, T. van de, Roeck, T. de et Canters, F. (2009) A comparison of two spectral mixture modelling approaches for impervious surface mapping in urban areas. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 30, n°18, p. 4785-4806.
- Wang, X., Jia, K., Liang, S. et Zhang, Y. (2016) Fractional vegetation cover estimation method through dynamic Bayesian network combining radiative transfer model and crop growth model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, n°12, p. 7442-7450.
- Weidong, L., Baret, F., Xingfa, G., Qingxi, T., Lanfen, Z. et Bing, Z. (2002) Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote sensing of environment*, vol. 81, n°2-3, p. 238-246.
- Whalley, W. R., Leeds, P. B. et Harrison, P. B. et Bowman, G. E. (1991) Estimation of soil moisture status using near infrared reflectance. *Hydrological Processes*, vol. 5, n°3, p. 321-327.
- Wijewardane, N. K., Ge, Y. et Morgan, C. L. S. (2016) Moisture insensitive prediction of soil properties from VNIR reflectance spectra based on external parameter orthogonalization. *Geoderma*, vol. 267, p. 92-101.
- World Bank (2017) *Global Economic Prospects, June 2017: A Fragile Recovery*. World Bank Publications.
- Xu, X. et Shi, Z. (2017) Multi-objective based spectral unmixing for hyperspectral images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 124, p. 54-69.



- Yon, S. et Pieters, C. (1988) Interactions of light with rough dielectric surfaces-Spectral reflectance and polarimetric properties. Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, vol. 18, p. 581-592.
- Zabcic, N., Rivard, B., Ong, C. et Mueller, A. (2014) Using airborne hyperspectral data to characterize the surface pH and mineralogy of pyrite mine tailings. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 32, p. 152-162.
- Zadeh, L. A. (1979) On the validity of Dempster's rule of combination of evidence. Electronics Research Laboratory, College of Engineering, University of California, Berkeley.
- Zadeh, L. A. (1986) A Simple View of the Dempster-Shafer Theory of Evidence and its Implication for the Rule of Combination. AI Magazine, vol. 7, p. 6.
- Zhang, X., Pazner, M. et Duke, N. (2007) Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 62, n°4, p. 271-282.
- Zhong, Y., Wang, X., Zhao, L., Feng, R., Zhang, L. et Xu, Y. (2016) Blind spectral unmixing based on sparse component analysis for hyperspectral remote sensing imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 119, p. 49-63.

## ANNEXES

### Annexe A : Erreurs moyennes d'estimation des abondances estimées par les modèles de démixage sur les 94 mélanges RELAB

|            | ID Relab   | AG-TJM-009  | AG-TJM-010 | AG-TJM-008 | AG-TJM-011  | Erreur moyenne d'estimation d'abondance |       |       |       |       |           | Meilleur  |
|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|---|-------|-------|-------|-------|-----------|-----------|
|            |            | Hypersthène | Augite     | Olivine    | Labradorite | LMM                                     | PNMM  | MLM   | NBRU  | Hapke | Shkuratov |           |
| Mélanges   | AG-TJM-012 | 0,85        | 0,15       | -          | -           | 0,068                                   | 0,049 | 0,102 | 0,114 | 0,103 | 0,090     | PNMM      |
|            | AG-TJM-013 | 0,5         | 0,5        | -          | -           | 0,066                                   | 0,068 | 0,011 | 0,004 | 0,003 | 0,017     | Hapke     |
|            | AG-TJM-017 | 0,1         | -          | 0,9        | -           | 0,032                                   | 0,018 | 0,013 | 0,084 | 0,033 | 0,051     | MLM       |
|            | AG-TJM-018 | 0,3         | -          | 0,7        | -           | 0,127                                   | 0,089 | 0,064 | 0,013 | 0,029 | 0,027     | NBRU      |
|            | AG-TJM-019 | 0,5         | -          | 0,5        | -           | 0,184                                   | 0,161 | 0,108 | 0,026 | 0,051 | 0,029     | NBRU      |
|            | AG-TJM-014 | 0,7         | -          | 0,3        | -           | 0,221                                   | 0,216 | 0,121 | 0,077 | 0,036 | 0,007     | Shkuratov |
|            | AG-TJM-020 | 0,9         | -          | 0,1        | -           | 0,111                                   | 0,181 | 0,044 | 0,057 | 0,035 | 0,023     | Shkuratov |
|            | AG-TJM-015 | 0,51        | 0,09       | 0,4        | -           | 0,124                                   | 0,102 | 0,053 | 0,054 | 0,065 | 0,042     | Shkuratov |
|            | AG-TJM-021 | 0,68        | 0,12       | 0,2        | -           | 0,087                                   | 0,046 | 0,053 | 0,068 | 0,060 | 0,047     | PNMM      |
|            | AG-TJM-022 | 0,595       | 0,105      | 0,3        | -           | 0,099                                   | 0,070 | 0,045 | 0,068 | 0,071 | 0,052     | MLM       |
|            | AG-TJM-023 | 0,425       | 0,075      | 0,5        | -           | 0,161                                   | 0,138 | 0,075 | 0,035 | 0,045 | 0,017     | Shkuratov |
|            | AG-TJM-024 | 0,34        | 0,06       | 0,6        | -           | 0,147                                   | 0,148 | 0,074 | 0,039 | 0,068 | 0,044     | NBRU      |
|            | AG-TJM-025 | 0,255       | 0,045      | 0,7        | -           | 0,151                                   | 0,160 | 0,083 | 0,045 | 0,059 | 0,038     | Shkuratov |
|            | AG-TJM-026 | 0,17        | 0,03       | 0,8        | -           | 0,150                                   | 0,162 | 0,086 | 0,052 | 0,035 | 0,019     | Shkuratov |
|            | AG-TJM-035 | 0,4         | 0,4        | 0,2        | -           | 0,072                                   | 0,066 | 0,018 | 0,026 | 0,079 | 0,079     | MLM       |
|            | AG-TJM-036 | 0,35        | 0,35       | 0,3        | -           | 0,098                                   | 0,091 | 0,035 | 0,033 | 0,077 | 0,073     | NBRU      |
|            | AG-TJM-037 | 0,3         | 0,3        | 0,4        | -           | 0,116                                   | 0,110 | 0,048 | 0,026 | 0,070 | 0,061     | NBRU      |
|            | AG-TJM-038 | 0,25        | 0,25       | 0,5        | -           | 0,124                                   | 0,126 | 0,069 | 0,039 | 0,077 | 0,066     | NBRU      |
|            | AG-TJM-039 | 0,2         | 0,2        | 0,6        | -           | 0,122                                   | 0,141 | 0,061 | 0,035 | 0,073 | 0,062     | NBRU      |
|            | AG-TJM-040 | 0,15        | 0,15       | 0,7        | -           | 0,119                                   | 0,153 | 0,075 | 0,038 | 0,064 | 0,054     | NBRU      |
|            | AG-TJM-041 | 0,1         | 0,1        | 0,8        | -           | 0,111                                   | 0,150 | 0,061 | 0,050 | 0,040 | 0,034     | Shkuratov |
|            | AG-TJM-016 | 0,015       | 0,1        | 0,8        | 0,085       | 0,127                                   | 0,122 | 0,112 | 0,187 | 0,131 | 0,149     | MLM       |
|            | AG-TJM-032 | 0,0075      | 0,05       | 0,9        | 0,0425      | 0,081                                   | 0,094 | 0,131 | 0,163 | 0,152 | 0,171     | LMM       |
|            | AG-TJM-033 | 0,0225      | 0,15       | 0,7        | 0,1275      | 0,125                                   | 0,128 | 0,101 | 0,159 | 0,126 | 0,136     | MLM       |
|            | AG-TJM-034 | 0,03        | 0,2        | 0,6        | 0,17        | 0,129                                   | 0,130 | 0,079 | 0,141 | 0,096 | 0,103     | MLM       |
|            | AG-TJM-047 | 0,025       | 0,05       | 0,9        | 0,025       | 0,064                                   | 0,077 | 0,097 | 0,149 | 0,110 | 0,135     | LMM       |
|            | AG-TJM-048 | 0,05        | 0,1        | 0,8        | 0,05        | 0,099                                   | 0,109 | 0,119 | 0,179 | 0,137 | 0,155     | LMM       |
|            | AG-TJM-049 | 0,075       | 0,15       | 0,7        | 0,075       | 0,110                                   | 0,118 | 0,111 | 0,162 | 0,131 | 0,145     | LMM       |
|            | AG-TJM-050 | 0,1         | 0,2        | 0,6        | 0,1         | 0,122                                   | 0,122 | 0,096 | 0,146 | 0,098 | 0,112     | MLM       |
|            | AG-TJM-027 | 0,45        | 0,1        | -          | 0,45        | 0,084                                   | 0,075 | 0,036 | 0,025 | 0,030 | 0,038     | NBRU      |
|            | AG-TJM-028 | 0,4         | 0,2        | -          | 0,4         | 0,099                                   | 0,095 | 0,047 | 0,033 | 0,058 | 0,057     | NBRU      |
|            | AG-TJM-029 | 0,35        | 0,3        | -          | 0,35        | 0,119                                   | 0,119 | 0,070 | 0,024 | 0,074 | 0,069     | NBRU      |
|            | AG-TJM-030 | 0,3         | 0,4        | -          | 0,3         | 0,157                                   | 0,164 | 0,097 | 0,027 | 0,054 | 0,046     | NBRU      |
|            | AG-TJM-031 | 0,25        | 0,5        | -          | 0,25        | 0,168                                   | 0,185 | 0,100 | 0,027 | 0,062 | 0,050     | NBRU      |
| AG-TJM-042 | 0,135      | 0,1         | -          | 0,765      | 0,079       | 0,057                                   | 0,066 | 0,069 | 0,059 | 0,055 | Shkuratov |           |
| AG-TJM-043 | 0,12       | 0,2         | -          | 0,68       | 0,123       | 0,108                                   | 0,101 | 0,026 | 0,046 | 0,035 | NBRU      |           |
| AG-TJM-044 | 0,105      | 0,3         | -          | 0,595      | 0,136       | 0,125                                   | 0,129 | 0,042 | 0,067 | 0,052 | NBRU      |           |
| AG-TJM-045 | 0,09       | 0,4         | -          | 0,51       | 0,165       | 0,159                                   | 0,147 | 0,035 | 0,067 | 0,048 | NBRU      |           |
| AG-TJM-046 | 0,075      | 0,5         | -          | 0,425      | 0,206       | 0,207                                   | 0,154 | 0,032 | 0,046 | 0,025 | Shkuratov |           |
| AG-TJM-051 | 0,2        | 0,6         | -          | 0,2        | 0,192       | 0,212                                   | 0,132 | 0,038 | 0,045 | 0,033 | Shkuratov |           |

Annexe A 1 : Erreurs d'abondance calculées pour les mélanges RELAB hypersthène-augite-olivine-labradorite. Les spectres ont été acquis par Tim McCoy avec les infrastructures du RELAB. Les ID du catalogue RELAB sont également présentés à des fins de reproductibilité.

|          | ID Relab   | JB-JLB-946-E | JB-JLB-790-A | JB-JLB-945-A | Erreur moyenne d'estimation d'abondance |       |       |       |       |           | Meilleur  |
|----------|------------|--------------|--------------|--------------|---|-------|-------|-------|-------|-----------|-----------|
|          |            | Magnesite    | Nontronite   | Forsterite   | LMM                                     | PNMM  | MLM   | NBRU  | Hapke | Shkuratov |           |
| Mélanges | JB-JLB-953 | 0,5          | 0,5          | -            | 0,286                                   | 0,305 | 0,214 | 0,150 | 0,076 | 0,099     | Hapke     |
|          | JB-JLB-954 | 0,75         | -            | 0,25         | 0,270                                   | 0,249 | 0,146 | 0,111 | 0,023 | 0,031     | Hapke     |
|          | JB-JLB-955 | 0,5          | -            | 0,5          | 0,220                                   | 0,208 | 0,091 | 0,059 | 0,005 | 0,009     | Hapke     |
|          | JB-JLB-956 | 0,25         | -            | 0,75         | 0,151                                   | 0,129 | 0,044 | 0,002 | 0,012 | 0,012     | NBRU      |
|          | JB-JLB-957 | 0,1          | -            | 0,9          | 0,101                                   | 0,104 | 0,047 | 0,030 | 0,038 | 0,004     | Shkuratov |
|          | JB-JLB-958 | 0,9          | -            | 0,1          | 0,203                                   | 0,199 | 0,112 | 0,091 | 0,012 | 0,020     | Hapke     |
|          | JB-JLB-959 | -            | 0,75         | 0,25         | 0,183                                   | 0,153 | 0,154 | 0,164 | 0,202 | 0,194     | PNMM      |
|          | JB-JLB-961 | -            | 0,5          | 0,5          | 0,251                                   | 0,205 | 0,124 | 0,173 | 0,084 | 0,116     | Hapke     |
|          | JB-JLB-962 | -            | 0,25         | 0,75         | 0,270                                   | 0,239 | 0,111 | 0,205 | 0,037 | 0,086     | Hapke     |
|          | JB-JLB-963 | -            | 0,1          | 0,9          | 0,235                                   | 0,224 | 0,101 | 0,200 | 0,046 | 0,083     | Hapke     |
|          | JB-JLB-964 | -            | 0,9          | 0,1          | 0,091                                   | 0,089 | 0,089 | 0,060 | 0,071 | 0,040     | Shkuratov |
|          | JB-JLB-965 | 0,25         | 0,5          | 0,25         | 0,184                                   | 0,201 | 0,105 | 0,181 | 0,028 | 0,051     | Hapke     |
|          | JB-JLB-966 | 0,4          | 0,2          | 0,4          | 0,200                                   | 0,222 | 0,133 | 0,138 | 0,038 | 0,054     | Hapke     |
|          | JB-JLB-967 | 0,2          | 0,2          | 0,6          | 0,231                                   | 0,285 | 0,130 | 0,143 | 0,006 | 0,036     | Hapke     |
|          | JB-JLB-968 | 0,1          | 0,2          | 0,7          | 0,218                                   | 0,286 | 0,114 | 0,122 | 0,017 | 0,034     | Hapke     |

Annexe A 2 : Erreurs d'abondance calculées pour les mélanges RELAB magnésite-nontronite-forsterite. Les spectres ont été acquis par Janice L. Bishop avec les infrastructures du RELAB. Les ID du catalogue RELAB sont également présentés à des fins de reproductibilité.

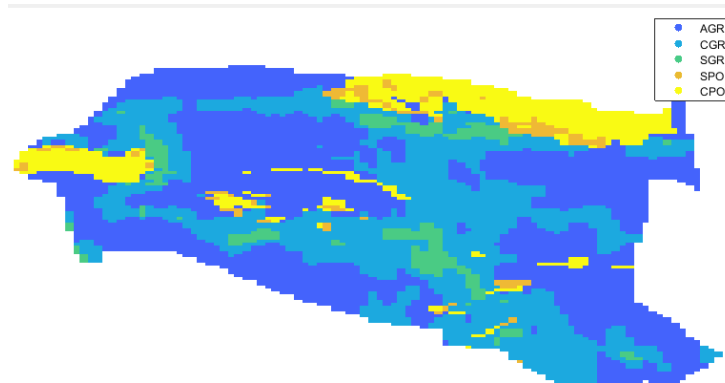
|          | ID Relab   | JB-JLB-E64-C | JB-JLB-E65-C | Erreur moyenne d'estimation d'abondance |       |       |       |       |           | Meilleur |
|----------|------------|--------------|--------------|---|-------|-------|-------|-------|-----------|----------|
|          |            | Gypsum       | Quartz       | LMM                                     | PNMM  | MLM   | NBRU  | Hapke | Shkuratov |          |
| Mélanges | JB-JLB-E66 | 0,1          | 0,9          | 0,311                                   | 0,307 | 0,150 | 0,305 | 0,062 | 0,108     | Hapke    |
|          | JB-JLB-E67 | 0,2          | 0,8          | 0,407                                   | 0,400 | 0,236 | 0,375 | 0,140 | 0,200     | Hapke    |
|          | JB-JLB-E68 | 0,5          | 0,5          | 0,284                                   | 0,282 | 0,158 | 0,281 | 0,102 | 0,148     | Hapke    |
|          | JB-JLB-E69 | 0,9          | 0,1          | 0,033                                   | 0,033 | 0,064 | 0,012 | 0,059 | 0,045     | NBRU     |
|          | JB-JLB-E70 | 0,95         | 0,05         | 0,056                                   | 0,056 | 0,088 | 0,009 | 0,069 | 0,062     | NBRU     |
|          | JB-JLB-E71 | 0,99         | 0,01         | 0,097                                   | 0,096 | 0,140 | 0,056 | 0,124 | 0,113     | NBRU     |

Annexe A 3 : Erreurs d'abondance calculées pour les mélanges RELAB gypse-quartz. Les spectres ont été acquis par Janice L. Bishop avec les infrastructures du RELAB. Les ID du catalogue RELAB sont également présentés à des fins de reproductibilité.

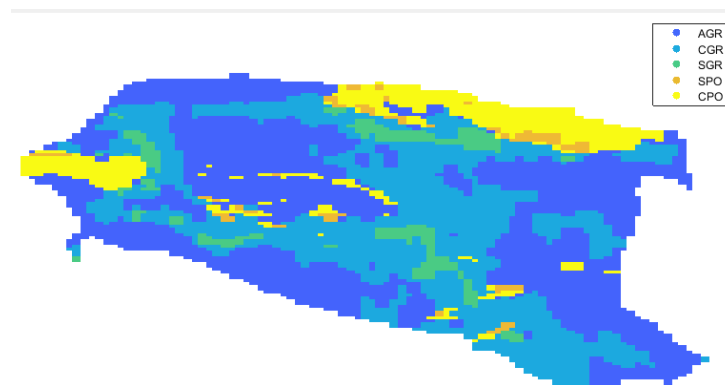
|          | ID Relab   | PO-CMP-081-C | PA-CMP-060-C | PE-CMP-041-C | Erreur moyenne d'estimation d'abondance |       |       |       |       |           | Meilleur  |
|----------|------------|--------------|--------------|--------------|---|-------|-------|-------|-------|-----------|-----------|
|          |            | Olivine      | Anorthite    | Bronzite     | LMM                                     | PNMM  | MLM   | NBRU  | Hapke | Shkuratov |           |
| Mélanges | XT-CMP-024 | 0,75         | 0,25         | -            | 0,154                                   | 0,154 | 0,049 | 0,022 | 0,008 | 0,007     | Shkuratov |
|          | XT-CMP-025 | 0,5          | 0,5          | -            | 0,212                                   | 0,212 | 0,046 | 0,049 | 0,026 | 0,014     | Shkuratov |
|          | XT-CMP-026 | 0,25         | 0,75         | -            | 0,226                                   | 0,226 | 0,070 | 0,055 | 0,022 | 0,002     | Shkuratov |
|          | XT-CMP-027 | -            | 0,75         | 0,25         | 0,291                                   | 0,364 | 0,113 | 0,111 | 0,011 | 0,022     | Hapke     |
|          | XT-CMP-028 | -            | 0,5          | 0,5          | 0,284                                   | 0,324 | 0,124 | 0,083 | 0,011 | 0,033     | Hapke     |
|          | XT-CMP-029 | -            | 0,25         | 0,75         | 0,190                                   | 0,204 | 0,107 | 0,026 | 0,018 | 0,009     | Shkuratov |
|          | XT-CMP-030 | 0,25         | -            | 0,75         | 0,134                                   | 0,114 | 0,030 | 0,014 | 0,014 | 0,010     | Shkuratov |
|          | XT-CMP-031 | 0,5          | -            | 0,5          | 0,226                                   | 0,189 | 0,055 | 0,040 | 0,002 | 0,031     | Hapke     |
|          | XT-CMP-032 | 0,75         | -            | 0,25         | 0,236                                   | 0,201 | 0,052 | 0,043 | 0,020 | 0,019     | Shkuratov |
|          | XT-CMP-033 | 0,667        | 0,167        | 0,167        | 0,162                                   | 0,143 | 0,041 | 0,036 | 0,010 | 0,016     | Hapke     |
|          | XT-CMP-034 | 0,167        | 0,167        | 0,667        | 0,150                                   | 0,148 | 0,068 | 0,056 | 0,007 | 0,011     | Hapke     |
|          | XT-CMP-035 | 0,167        | 0,667        | 0,167        | 0,224                                   | 0,251 | 0,096 | 0,070 | 0,012 | 0,015     | Hapke     |
|          | XT-CMP-036 | 0,333        | 0,333        | 0,333        | 0,209                                   | 0,206 | 0,079 | 0,066 | 0,007 | 0,021     | Hapke     |
|          | XT-CMP-037 | 0,167        | 0,417        | 0,417        | 0,218                                   | 0,229 | 0,098 | 0,077 | 0,007 | 0,020     | Hapke     |
|          | XT-CMP-038 | 0,417        | 0,417        | 0,167        | 0,192                                   | 0,191 | 0,061 | 0,053 | 0,010 | 0,012     | Hapke     |
|          | XT-CMP-039 | 0,417        | 0,167        | 0,417        | 0,186                                   | 0,177 | 0,057 | 0,066 | 0,007 | 0,016     | Hapke     |

Annexe A 4 : Erreurs d'abondance calculées pour les mélanges RELAB olivine-anorthite-bronzite. Les spectres ont été acquis par Carle M. Pieters avec les infrastructures du RELAB. Les ID du catalogue RELAB sont également présentés à des fins de reproductibilité.

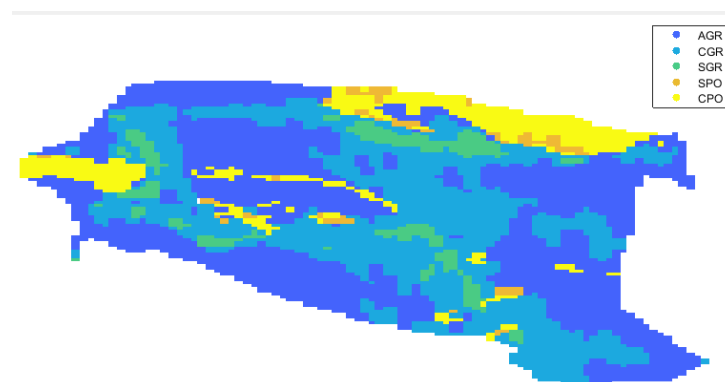
## Annexe B : Données de la mine



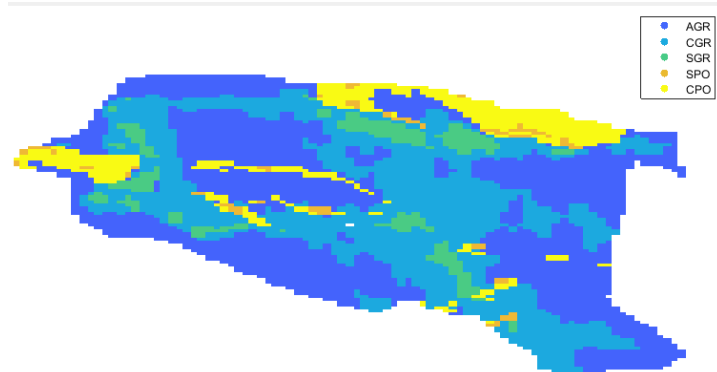
Annexe B 1 : Sections horizontales du modèle-bloc lithologique de la mine à 240 m d'altitude.



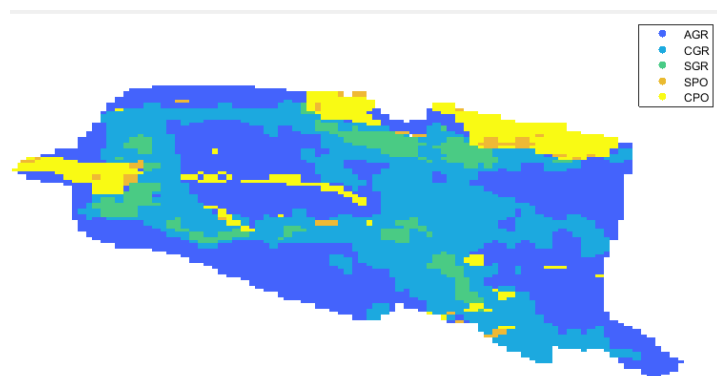
Annexe B 2 ; Sections horizontales du modèle-bloc lithologique de la mine à 230 m d'altitude.



Annexe B 3 : Sections horizontales du modèle-bloc lithologique de la mine à 220 m d'altitude.



Annexe B 4 : Sections horizontales du modèle-bloc lithologique de la mine à 210 m d'altitude.



Annexe B 5 : Sections horizontales du modèle-bloc lithologique de la mine à 200 m d'altitude.

Annexe B 6 : Analyses géochimiques utilisées dans la simulation d'échantillons. Les 114 échantillons dont l'identifiant commencent par « CM » (pour la fosse Canadian Malartic) sont ceux intégrés dans l'interpolation. « BA » Correspond à l'ancienne fosse *Barnat* et GL à la fosse *Gouldie* située au sud-est et aujourd'hui remblayée.

| N°<br>Échantillon | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | MnO  | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Perte<br>au<br>feu | Lithologie |
|-------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------|------------|
|                   | %                | %                              | %                              | %    | %    | %                 | %                | %    | %                | %                             | %                              | %                  |            |
| CM07-1322-01      | 64,11            | 15,77                          | 6,02                           | 1,87 | 3,14 | 2,85              | 3,71             | 0,06 | 0,61             | 0,12                          | 0,04                           | 1,93               | AGR        |
| CM07-1324-02      | 63,35            | 16,29                          | 6,39                           | 2,61 | 3,14 | 3,57              | 2,88             | 0,08 | 0,65             | 0,13                          | 0,04                           | 1,60               | AGR        |
| CM07-1030-02      | 61,90            | 16,62                          | 6,13                           | 2,20 | 3,21 | 4,14              | 2,79             | 0,07 | 0,62             | 0,14                          | 0,04                           | 1,85               | AGR        |
| CM07-1099-02      | 62,29            | 17,10                          | 5,71                           | 1,56 | 2,95 | 2,50              | 3,53             | 0,06 | 0,64             | 0,14                          | 0,04                           | 2,87               | AGR        |
| CM06-898-01       | 65,56            | 15,69                          | 5,28                           | 1,98 | 2,68 | 4,36              | 2,50             | 0,06 | 0,57             | 0,14                          | 0,05                           | 1,65               | AGR        |
| CM08-1817-01      | 63,00            | 16,57                          | 6,50                           | 2,39 | 3,27 | 3,33              | 3,03             | 0,07 | 0,66             | 0,14                          | 0,05                           | 1,60               | AGR        |
| CM06-913-01       | 62,91            | 16,48                          | 6,07                           | 2,24 | 3,22 | 4,10              | 2,74             | 0,07 | 0,63             | 0,15                          | 0,04                           | 1,47               | AGR        |
| CM07-1347-01      | 59,95            | 17,14                          | 7,48                           | 2,10 | 3,33 | 2,71              | 3,71             | 0,08 | 0,70             | 0,12                          | 0,04                           | 2,34               | AGR        |
| CM07-1102-01      | 61,40            | 16,61                          | 5,95                           | 2,45 | 3,18 | 4,03              | 2,99             | 0,07 | 0,62             | 0,14                          | 0,04                           | 1,76               | AGR        |
| CM07-1054-01      | 62,88            | 17,17                          | 5,97                           | 1,93 | 3,15 | 3,34              | 3,35             | 0,07 | 0,63             | 0,14                          | 0,04                           | 1,71               | AGR        |
| CM06-693-01       | 63,09            | 15,98                          | 5,60                           | 2,33 | 2,78 | 4,00              | 3,36             | 0,07 | 0,60             | 0,14                          | 0,04                           | 2,36               | AGR        |
| CM06-922-01       | 59,05            | 17,85                          | 6,47                           | 2,18 | 3,15 | 2,99              | 3,80             | 0,07 | 0,67             | 0,15                          | 0,04                           | 2,74               | AGR        |
| CM07-1109-04      | 65,25            | 15,19                          | 5,74                           | 2,45 | 2,90 | 4,05              | 2,27             | 0,07 | 0,59             | 0,14                          | 0,05                           | 1,86               | AGR        |
| CM07-961-02       | 62,10            | 16,74                          | 5,90                           | 2,65 | 2,97 | 4,02              | 2,77             | 0,07 | 0,61             | 0,14                          | 0,04                           | 1,32               | AGR        |
| CM07-1348-01      | 63,89            | 15,59                          | 5,77                           | 2,08 | 2,85 | 3,84              | 2,22             | 0,07 | 0,60             | 0,16                          | 0,05                           | 1,78               | AGR        |
| CM07-1119-01      | 63,75            | 15,75                          | 5,97                           | 2,83 | 3,01 | 4,06              | 2,11             | 0,08 | 0,63             | 0,15                          | 0,06                           | 1,73               | AGR        |
| CM07-1393-02      | 63,97            | 16,59                          | 5,83                           | 2,63 | 3,02 | 3,87              | 2,35             | 0,07 | 0,60             | 0,15                          | 0,04                           | 1,37               | AGR        |
| CM07-1240-01      | 64,28            | 16,56                          | 4,67                           | 1,89 | 3,86 | 2,65              | 3,97             | 0,06 | 0,56             | 0,14                          | 0,03                           | 1,71               | AGR        |
| CM07-1402-01      | 63,15            | 17,10                          | 6,06                           | 2,13 | 3,11 | 3,00              | 3,27             | 0,07 | 0,64             | 0,16                          | 0,04                           | 1,96               | AGR        |
| CM07-1229-01      | 64,58            | 15,50                          | 5,62                           | 2,44 | 2,85 | 4,01              | 2,49             | 0,07 | 0,55             | 0,14                          | 0,04                           | 2,07               | AGR        |
| CM06-771-01       | 62,16            | 17,70                          | 5,95                           | 1,77 | 3,19 | 2,70              | 2,88             | 0,06 | 0,63             | 0,14                          | 0,03                           | 2,78               | AGR        |
| CM07-1125-01      | 61,99            | 14,36                          | 5,61                           | 3,97 | 5,84 | 3,36              | 2,37             | 0,08 | 0,48             | 0,15                          | 0,07                           | 1,90               | AGR        |
| CM07-1294-01      | 63,23            | 15,68                          | 5,56                           | 2,94 | 2,79 | 4,61              | 2,20             | 0,08 | 0,59             | 0,14                          | 0,03                           | 1,32               | AGR        |
| CM07-1274-01      | 62,64            | 17,22                          | 6,03                           | 1,75 | 3,21 | 2,86              | 3,23             | 0,06 | 0,62             | 0,15                          | 0,04                           | 2,61               | AGR        |
| CM06-800-01       | 65,17            | 16,08                          | 5,53                           | 2,35 | 2,76 | 2,96              | 2,85             | 0,07 | 0,61             | 0,14                          | 0,05                           | 1,75               | AGR        |
| CM06-763-02       | 64,07            | 15,56                          | 5,37                           | 3,07 | 2,61 | 4,03              | 2,48             | 0,08 | 0,57             | 0,13                          | 0,07                           | 2,28               | AGR        |
| CM06-773-01       | 64,59            | 15,37                          | 6,23                           | 2,83 | 2,77 | 4,04              | 2,42             | 0,08 | 0,63             | 0,13                          | 0,08                           | 1,22               | AGR        |
| CM07-1669-04      | 64,18            | 15,95                          | 5,90                           | 2,65 | 3,08 | 3,32              | 2,95             | 0,07 | 0,61             | 0,15                          | 0,04                           | 1,19               | AGR        |
| CM07-1114-01      | 60,14            | 14,98                          | 6,53                           | 3,21 | 3,75 | 4,26              | 2,93             | 0,08 | 0,61             | 0,16                          | 0,04                           | 2,36               | AGR        |
| CM07-1094-01      | 58,97            | 16,90                          | 7,04                           | 2,68 | 3,97 | 3,45              | 3,25             | 0,08 | 0,70             | 0,18                          | 0,05                           | 2,73               | AGR        |
| CM07-1208-01      | 62,16            | 17,20                          | 5,87                           | 2,22 | 2,88 | 4,02              | 3,44             | 0,06 | 0,62             | 0,15                          | 0,04                           | 1,79               | AGR        |
| CM08-1754-03      | 62,92            | 16,42                          | 6,01                           | 2,52 | 3,16 | 3,24              | 2,71             | 0,07 | 0,63             | 0,14                          | 0,04                           | 1,32               | AGR        |
| CM08-1763-01      | 65,85            | 15,28                          | 5,66                           | 2,54 | 3,11 | 3,79              | 1,65             | 0,07 | 0,58             | 0,15                          | 0,05                           | 1,48               | AGR        |
| CM07-1536-01      | 65,72            | 15,51                          | 5,46                           | 2,48 | 2,78 | 4,19              | 2,12             | 0,07 | 0,57             | 0,14                          | 0,05                           | 1,62               | AGR        |
| CM07-1574-02      | 64,08            | 14,76                          | 4,93                           | 2,92 | 2,53 | 4,67              | 1,91             | 0,06 | 0,52             | 0,14                          | 0,04                           | 3,26               | AGR        |
| CM07-1397-01      | 64,74            | 15,77                          | 5,92                           | 2,43 | 3,05 | 4,25              | 2,62             | 0,07 | 0,58             | 0,16                          | 0,04                           | 1,14               | AGR        |
| CM07-1303-01      | 66,55            | 14,77                          | 5,86                           | 2,53 | 2,90 | 4,00              | 1,81             | 0,07 | 0,57             | 0,15                          | 0,05                           | 1,21               | AGR        |

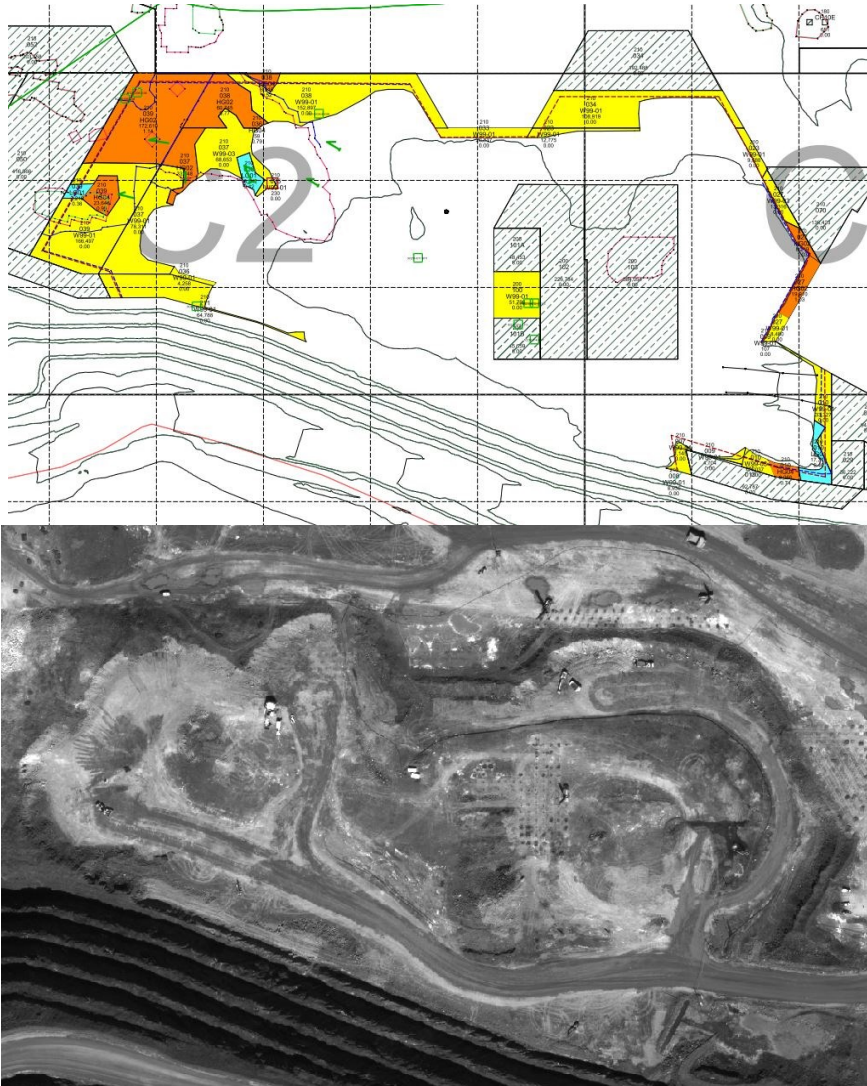
| Échantillon   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | MnO  | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Perte au feu | Lithologie |
|---------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------|------------|
|               | %                | %                              | %                              | %    | %    | %                 | %                | %    | %                | %                             | %                              | %            |            |
| CM07-975-01   | 62,86            | 16,61                          | 5,69                           | 2,38 | 3,18 | 3,00              | 3,48             | 0,05 | 0,56             | 0,14                          | 0,04                           | 2,08         | AGR        |
| CM06-791-01   | 67,47            | 14,69                          | 4,87                           | 2,41 | 2,41 | 4,58              | 2,09             | 0,06 | 0,45             | 0,12                          | 0,04                           | 1,34         | AGR        |
| CM07-1444-01  | 61,49            | 16,75                          | 6,38                           | 2,30 | 3,34 | 2,59              | 3,66             | 0,08 | 0,67             | 0,16                          | 0,05                           | 1,63         | AGR        |
| CM08-1901-02  | 60,66            | 17,55                          | 6,58                           | 2,44 | 3,05 | 2,69              | 3,86             | 0,08 | 0,66             | 0,16                          | 0,04                           | 1,73         | AGR        |
| CM08-1894-03  | 61,64            | 17,11                          | 5,83                           | 2,04 | 2,96 | 2,46              | 3,94             | 0,06 | 0,62             | 0,14                          | 0,04                           | 2,16         | AGR        |
| CM08-1791-01  | 58,23            | 18,73                          | 7,06                           | 1,93 | 3,74 | 2,18              | 3,66             | 0,08 | 0,75             | 0,16                          | 0,05                           | 2,70         | AGR        |
| CM09-2625-01  | 62,99            | 16,31                          | 5,73                           | 2,50 | 2,74 | 3,64              | 3,25             | 0,07 | 0,60             | 0,14                          | 0,05                           | 2,00         | AGR        |
| CM09-2603-01  | 59,97            | 18,06                          | 7,67                           | 1,90 | 3,38 | 1,90              | 4,21             | 0,08 | 0,69             | 0,17                          | 0,07                           | 2,51         | AGR        |
| CM08-1829-01  | 65,07            | 16,05                          | 5,70                           | 2,33 | 2,83 | 3,75              | 2,39             | 0,07 | 0,59             | 0,13                          | 0,04                           | 1,39         | AGR        |
| CM07-1613-01  | 59,72            | 18,08                          | 6,61                           | 1,59 | 3,49 | 2,82              | 3,56             | 0,07 | 0,64             | 0,13                          | 0,04                           | 2,42         | AGR        |
| CM07-1396-01  | 63,52            | 16,37                          | 6,38                           | 2,34 | 3,30 | 3,23              | 2,63             | 0,08 | 0,65             | 0,15                          | 0,05                           | 1,76         | AGR        |
| CM09-2606-01  | 63,16            | 17,05                          | 6,04                           | 2,62 | 3,00 | 3,65              | 2,65             | 0,07 | 0,62             | 0,17                          | 0,05                           | 1,66         | AGR        |
| CM08-1981-02  | 65,40            | 15,10                          | 5,42                           | 2,50 | 2,45 | 3,33              | 2,39             | 0,07 | 0,54             | 0,14                          | 0,05                           | 1,30         | AGR        |
| CM09-2585-01  | 65,88            | 15,52                          | 5,56                           | 2,62 | 2,63 | 3,89              | 2,19             | 0,07 | 0,56             | 0,14                          | 0,05                           | 1,23         | AGR        |
| CM08-1882-02  | 65,38            | 15,39                          | 5,44                           | 2,41 | 3,03 | 3,92              | 2,41             | 0,06 | 0,56             | 0,15                          | 0,05                           | 1,51         | AGR        |
| CM09-2642-01  | 62,54            | 16,82                          | 6,00                           | 1,92 | 3,05 | 3,63              | 3,34             | 0,07 | 0,62             | 0,15                          | 0,04                           | 1,75         | AGR        |
| CM09-2651-01  | 63,76            | 15,66                          | 5,54                           | 2,64 | 2,79 | 4,49              | 2,37             | 0,07 | 0,58             | 0,17                          | 0,05                           | 1,91         | AGR        |
| CM09-2501-01  | 63,76            | 15,51                          | 5,30                           | 2,36 | 3,08 | 3,99              | 2,14             | 0,06 | 0,54             | 0,13                          | 0,04                           | 2,62         | AGR        |
| CM09-2552-01  | 60,79            | 16,12                          | 6,50                           | 3,06 | 3,62 | 2,90              | 3,54             | 0,06 | 0,64             | 0,16                          | 0,04                           | 2,95         | AGR        |
| CM09-2559-01  | 66,18            | 13,04                          | 5,67                           | 3,18 | 2,83 | 4,33              | 2,08             | 0,08 | 0,54             | 0,15                          | 0,05                           | 2,29         | AGR        |
| CM09-2560-01  | 64,36            | 15,15                          | 5,62                           | 2,84 | 2,96 | 3,76              | 2,18             | 0,07 | 0,56             | 0,14                          | 0,04                           | 1,47         | AGR        |
| CM09-2567-01  | 62,92            | 16,99                          | 6,04                           | 2,28 | 2,90 | 3,87              | 2,75             | 0,07 | 0,60             | 0,14                          | 0,03                           | 1,73         | AGR        |
| CHL11-2374-02 | 62,07            | 17,26                          | 5,46                           | 2,78 | 3,08 | 3,82              | 2,74             | 0,06 | 0,56             | 0,14                          | 0,03                           | 1,36         | AGR        |
| CHL11-2374-01 | 64,27            | 16,19                          | 5,95                           | 2,40 | 2,95 | 3,73              | 2,84             | 0,06 | 0,61             | 0,16                          | 0,03                           | 1,30         | AGR        |
| BA11-4531-01  | 59,59            | 15,23                          | 6,39                           | 3,76 | 4,27 | 3,51              | 2,65             | 0,09 | 0,64             | 0,21                          | 0,05                           | 2,53         | AGR        |
| BA11-3997-01  | 62,68            | 16,29                          | 5,66                           | 2,68 | 3,13 | 2,90              | 3,58             | 0,07 | 0,58             | 0,16                          | 0,04                           | 2,29         | AGR        |
| BA11-4549-01  | 63,87            | 15,68                          | 6,10                           | 3,08 | 3,12 | 4,00              | 2,18             | 0,08 | 0,60             | 0,15                          | 0,05                           | 1,46         | AGR        |
| BA12-4557-01  | 57,70            | 14,78                          | 6,49                           | 4,45 | 4,72 | 3,51              | 2,42             | 0,09 | 0,60             | 0,21                          | 0,07                           | 3,97         | AGR        |
| BA09-3743-01  | 61,58            | 16,84                          | 6,17                           | 2,45 | 3,25 | 3,67              | 2,65             | 0,07 | 0,63             | 0,14                          | 0,04                           | 1,61         | AGR        |
| BA09-3720-02  | 63,15            | 16,23                          | 6,27                           | 2,28 | 3,26 | 3,13              | 3,09             | 0,07 | 0,63             | 0,14                          | 0,04                           | 1,74         | AGR        |
| BA09-3720-01  | 59,46            | 18,25                          | 6,38                           | 2,25 | 3,44 | 4,01              | 3,16             | 0,07 | 0,67             | 0,14                          | 0,04                           | 2,38         | AGR        |
| BA08-3153-01  | 62,27            | 17,02                          | 6,15                           | 2,28 | 3,22 | 2,94              | 2,83             | 0,07 | 0,64             | 0,14                          | 0,04                           | 2,39         | AGR        |
| CM09-2567-01  | 62,92            | 16,99                          | 6,04                           | 2,28 | 2,90 | 3,87              | 2,75             | 0,07 | 0,60             | 0,14                          | 0,03                           | 1,73         | AGR        |
| BA08-3092-01  | 61,44            | 15,22                          | 5,89                           | 3,50 | 3,61 | 4,13              | 2,51             | 0,08 | 0,56             | 0,19                          | 0,04                           | 2,11         | AGR        |
| BA09-3827-01  | 59,88            | 17,78                          | 6,49                           | 2,20 | 3,56 | 3,18              | 2,95             | 0,07 | 0,68             | 0,15                          | 0,03                           | 2,38         | AGR        |
| BA09-3550-01  | 64,48            | 16,09                          | 5,27                           | 2,34 | 2,70 | 3,39              | 2,68             | 0,07 | 0,58             | 0,14                          | 0,05                           | 1,60         | AGR        |
| BA09-3508-01  | 65,11            | 15,71                          | 5,66                           | 2,79 | 2,85 | 3,87              | 2,10             | 0,07 | 0,58             | 0,14                          | 0,04                           | 1,46         | AGR        |
| CM09-2501-01  | 63,76            | 15,51                          | 5,30                           | 2,36 | 3,08 | 3,99              | 2,14             | 0,06 | 0,54             | 0,13                          | 0,04                           | 2,62         | AGR        |
| BA09-3848-01  | 65,84            | 15,80                          | 4,67                           | 2,27 | 2,32 | 4,85              | 2,35             | 0,06 | 0,52             | 0,12                          | 0,03                           | 1,77         | AGR        |
| BA10-3927-01  | 64,52            | 15,08                          | 5,76                           | 3,15 | 2,81 | 3,69              | 2,18             | 0,08 | 0,58             | 0,12                          | 0,05                           | 1,72         | AGR        |
| BA09-3826-01  | 63,87            | 16,36                          | 5,86                           | 2,48 | 3,06 | 3,42              | 2,34             | 0,07 | 0,63             | 0,14                          | 0,04                           | 2,12         | AGR        |
| BA10-3938-01  | 64,41            | 15,67                          | 5,46                           | 2,87 | 2,47 | 4,22              | 2,54             | 0,07 | 0,57             | 0,14                          | 0,05                           | 1,64         | AGR        |

| Échantillon  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | MnO  | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Perte au feu | Lithologie |
|--------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------|------------|
|              | %                | %                              | %                              | %    | %    | %                 | %                | %    | %                | %                             | %                              | %            |            |
| BA09-3858-01 | 64,44            | 16,17                          | 5,54                           | 1,94 | 2,80 | 3,08              | 2,49             | 0,06 | 0,58             | 0,13                          | 0,04                           | 1,95         | AGR        |
| CM09-2560-01 | 64,36            | 15,15                          | 5,62                           | 2,84 | 2,96 | 3,76              | 2,18             | 0,07 | 0,56             | 0,14                          | 0,04                           | 1,47         | AGR        |
| BA10-3948-01 | 63,32            | 16,41                          | 6,18                           | 2,81 | 3,08 | 3,38              | 2,89             | 0,07 | 0,62             | 0,16                          | 0,04                           | 1,84         | AGR        |
| BA09-3788-02 | 63,42            | 16,55                          | 5,79                           | 1,85 | 2,93 | 3,14              | 3,23             | 0,07 | 0,61             | 0,14                          | 0,04                           | 1,93         | AGR        |
| BA10-3934-01 | 63,32            | 16,53                          | 6,23                           | 2,47 | 3,26 | 3,31              | 2,40             | 0,07 | 0,65             | 0,15                          | 0,04                           | 2,26         | AGR        |
| BA09-3590-02 | 64,26            | 16,26                          | 5,72                           | 2,74 | 2,89 | 2,98              | 3,21             | 0,07 | 0,59             | 0,15                          | 0,04                           | 1,81         | AGR        |
| BA09-3590-01 | 59,36            | 17,00                          | 5,96                           | 2,40 | 2,99 | 3,24              | 4,37             | 0,07 | 0,64             | 0,15                          | 0,04                           | 3,12         | AGR        |
| BA09-3532-01 | 64,86            | 15,20                          | 5,79                           | 2,41 | 2,96 | 3,64              | 2,90             | 0,07 | 0,60             | 0,16                          | 0,05                           | 1,40         | AGR        |
| BA09-3539-01 | 64,52            | 15,36                          | 5,48                           | 2,50 | 2,86 | 4,07              | 2,47             | 0,07 | 0,58             | 0,15                          | 0,06                           | 1,95         | AGR        |
| BA09-3542-02 | 63,91            | 16,49                          | 5,95                           | 2,64 | 3,16 | 3,63              | 2,38             | 0,07 | 0,61             | 0,14                          | 0,05                           | 1,46         | AGR        |
| BA09-3542-01 | 64,35            | 15,85                          | 5,74                           | 2,38 | 3,23 | 3,36              | 2,32             | 0,06 | 0,59             | 0,15                          | 0,05                           | 1,68         | AGR        |
| BA09-3540-01 | 63,74            | 16,23                          | 5,85                           | 2,18 | 3,05 | 3,80              | 2,40             | 0,07 | 0,61             | 0,15                          | 0,04                           | 1,75         | AGR        |
| BA09-3605-03 | 51,69            | 16,49                          | 9,28                           | 6,04 | 7,84 | 3,21              | 2,03             | 0,16 | 0,51             | 0,07                          | 0,03                           | 2,86         | AGR        |
| CM09-2552-01 | 60,79            | 16,12                          | 6,50                           | 3,06 | 3,62 | 2,90              | 3,54             | 0,06 | 0,64             | 0,16                          | 0,04                           | 2,95         | AGR        |
| CM09-2559-01 | 66,18            | 13,04                          | 5,67                           | 3,18 | 2,83 | 4,33              | 2,08             | 0,08 | 0,54             | 0,15                          | 0,05                           | 2,29         | AGR        |
| BA09-3534-02 | 63,38            | 16,86                          | 5,79                           | 2,32 | 3,01 | 3,56              | 3,25             | 0,07 | 0,60             | 0,14                          | 0,05                           | 1,48         | AGR        |
| BA10-3903-02 | 66,03            | 16,25                          | 5,43                           | 1,59 | 2,69 | 2,86              | 3,42             | 0,06 | 0,59             | 0,13                          | 0,03                           | 1,58         | AGR        |
| BA09-3760-01 | 60,78            | 17,46                          | 6,21                           | 2,40 | 3,26 | 3,06              | 2,83             | 0,07 | 0,64             | 0,16                          | 0,05                           | 2,49         | AGR        |
| GL09-2848-01 | 61,89            | 18,10                          | 6,14                           | 1,46 | 3,47 | 1,80              | 4,19             | 0,05 | 0,60             | 0,12                          | 0,04                           | 2,33         | AGR        |
| GL10-2921-01 | 65,22            | 15,52                          | 5,75                           | 2,52 | 2,72 | 3,83              | 2,39             | 0,07 | 0,60             | 0,16                          | 0,04                           | 1,24         | AGR        |
| GL09-2839-01 | 64,17            | 16,08                          | 6,01                           | 2,47 | 2,98 | 3,45              | 2,56             | 0,07 | 0,60             | 0,15                          | 0,04                           | 1,34         | AGR        |
| GL09-2867-01 | 66,54            | 15,32                          | 5,61                           | 2,34 | 2,64 | 3,51              | 2,47             | 0,07 | 0,55             | 0,14                          | 0,06                           | 1,37         | AGR        |
| GL09-2884-01 | 63,35            | 15,52                          | 5,36                           | 2,69 | 2,67 | 3,51              | 3,11             | 0,06 | 0,54             | 0,16                          | 0,04                           | 2,06         | AGR        |
| GL10-2908-01 | 63,17            | 16,26                          | 6,17                           | 2,55 | 2,92 | 3,26              | 2,39             | 0,07 | 0,63             | 0,15                          | 0,04                           | 1,68         | AGR        |
| GL10-2923-01 | 65,89            | 14,64                          | 5,38                           | 2,70 | 2,81 | 3,70              | 1,86             | 0,07 | 0,55             | 0,15                          | 0,04                           | 1,34         | AGR        |
| GL09-2813-01 | 65,47            | 15,51                          | 5,62                           | 2,84 | 2,77 | 3,84              | 2,06             | 0,07 | 0,58             | 0,17                          | 0,04                           | 1,19         | AGR        |
| CM07-1324-01 | 55,97            | 16,65                          | 6,31                           | 4,27 | 2,05 | 6,72              | 2,24             | 0,09 | 0,61             | 0,36                          | 0,01                           | 3,76         | CGR        |
| CM07-1030-01 | 60,46            | 15,18                          | 4,54                           | 4,49 | 3,52 | 5,41              | 2,20             | 0,07 | 0,54             | 0,28                          | 0,04                           | 3,29         | CGR        |
| CM07-1347-02 | 61,69            | 16,92                          | 6,30                           | 2,08 | 3,30 | 3,43              | 3,96             | 0,07 | 0,65             | 0,14                          | 0,05                           | 2,12         | CGR        |
| CM06-920-02  | 58,05            | 14,51                          | 6,30                           | 4,06 | 5,76 | 3,43              | 2,33             | 0,09 | 0,57             | 0,18                          | 0,09                           | 4,35         | CGR        |
| CM07-1109-01 | 61,52            | 16,60                          | 6,09                           | 2,79 | 3,04 | 3,98              | 3,02             | 0,08 | 0,62             | 0,14                          | 0,05                           | 2,62         | CGR        |
| CM07-961-03  | 63,47            | 15,66                          | 5,31                           | 2,22 | 2,77 | 4,03              | 3,81             | 0,06 | 0,58             | 0,13                          | 0,04                           | 2,15         | CGR        |
| CM07-1393-01 | 64,93            | 14,81                          | 5,39                           | 2,76 | 2,65 | 4,14              | 2,52             | 0,07 | 0,55             | 0,12                          | 0,07                           | 2,13         | CGR        |
| CM08-1741-02 | 61,80            | 16,23                          | 6,03                           | 2,66 | 2,92 | 3,26              | 3,17             | 0,07 | 0,60             | 0,15                          | 0,04                           | 2,37         | CGR        |
| CM06-820-01  | 63,59            | 14,67                          | 5,53                           | 2,78 | 2,75 | 3,45              | 3,85             | 0,07 | 0,53             | 0,13                          | 0,04                           | 2,41         | CGR        |
| CM07-1273-01 | 63,99            | 15,27                          | 5,33                           | 3,04 | 2,81 | 4,52              | 2,52             | 0,07 | 0,57             | 0,13                          | 0,04                           | 2,21         | CGR        |
| CM06-763-01  | 60,36            | 17,05                          | 6,50                           | 2,26 | 3,05 | 2,77              | 3,52             | 0,07 | 0,64             | 0,15                          | 0,04                           | 2,96         | CGR        |
| CM07-1669-02 | 64,62            | 14,88                          | 5,45                           | 2,78 | 2,77 | 4,23              | 2,26             | 0,07 | 0,55             | 0,14                          | 0,04                           | 1,39         | CGR        |
| CM07-1114-02 | 51,30            | 15,32                          | 7,98                           | 6,58 | 4,58 | 3,60              | 3,12             | 0,13 | 0,72             | 0,29                          | 0,03                           | 6,26         | CGR        |
| CM07-1208-02 | 56,61            | 13,51                          | 6,74                           | 4,64 | 7,07 | 2,11              | 3,84             | 0,10 | 0,58             | 0,18                          | 0,11                           | 4,61         | CGR        |
| CM08-1754-01 | 66,14            | 14,27                          | 4,85                           | 2,67 | 2,32 | 3,26              | 3,59             | 0,07 | 0,51             | 0,13                          | 0,04                           | 2,74         | CGR        |
| CM08-1933-01 | 63,92            | 14,93                          | 5,35                           | 2,47 | 2,42 | 3,18              | 3,61             | 0,07 | 0,52             | 0,14                          | 0,04                           | 3,17         | CGR        |

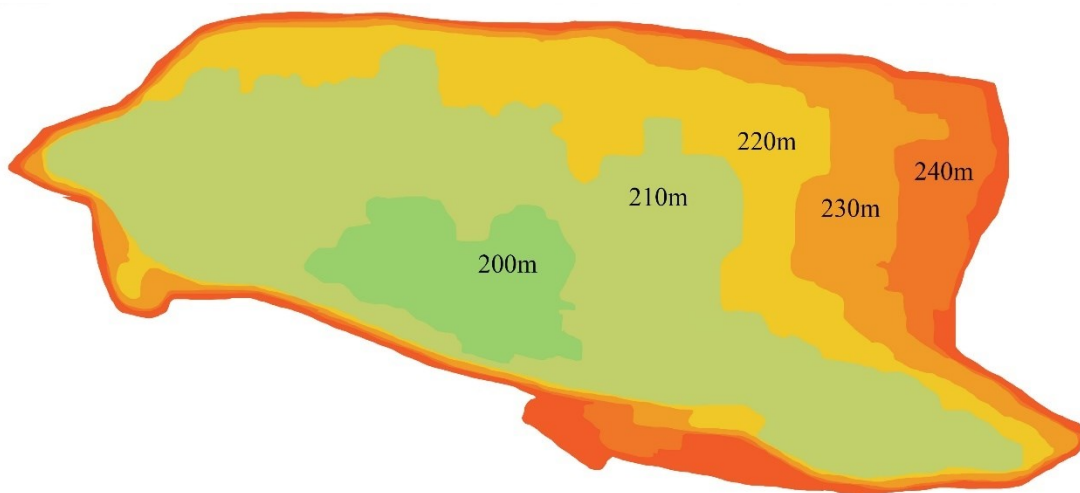


| Échantillon  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | MnO  | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Perte au feu | Lithologie |
|--------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------|------------|
|              | %                | %                              | %                              | %    | %    | %                 | %                | %    | %                | %                             | %                              | %            |            |
| CM07-975-02  | 63,90            | 15,18                          | 5,85                           | 2,95 | 2,82 | 4,12              | 2,35             | 0,07 | 0,60             | 0,15                          | 0,05                           | 2,08         | CGR        |
| CM08-1894-01 | 64,79            | 13,93                          | 5,84                           | 3,26 | 2,50 | 3,30              | 2,72             | 0,08 | 0,56             | 0,12                          | 0,05                           | 2,90         | CGR        |
| CM07-1396-02 | 65,60            | 14,61                          | 5,32                           | 3,67 | 2,36 | 3,60              | 2,35             | 0,09 | 0,56             | 0,11                          | 0,04                           | 1,83         | CGR        |
| CM08-1860-01 | 58,42            | 15,13                          | 6,90                           | 4,08 | 3,99 | 2,06              | 4,10             | 0,10 | 0,63             | 0,15                          | 0,04                           | 4,14         | CGR        |
| CM10-2716-01 | 66,41            | 15,58                          | 5,18                           | 2,54 | 2,38 | 4,72              | 1,97             | 0,07 | 0,55             | 0,13                          | 0,04                           | 1,31         | CGR        |
| CM08-1882-01 | 59,84            | 16,10                          | 6,53                           | 3,19 | 3,96 | 2,99              | 3,14             | 0,09 | 0,63             | 0,19                          | 0,05                           | 3,56         | CGR        |
| CM09-2642-02 | 60,32            | 14,76                          | 5,74                           | 3,55 | 3,48 | 4,37              | 2,92             | 0,08 | 0,59             | 0,16                          | 0,05                           | 3,32         | CGR        |
| CM07-1555-01 | 65,54            | 14,72                          | 4,29                           | 2,48 | 2,29 | 4,97              | 2,32             | 0,05 | 0,46             | 0,15                          | 0,03                           | 2,21         | CGR        |
| CM07-1555-01 | 65,54            | 14,72                          | 4,29                           | 2,48 | 2,29 | 4,97              | 2,32             | 0,05 | 0,46             | 0,15                          | 0,03                           | 2,21         | CGR        |
| GL10-2921-02 | 58,53            | 13,20                          | 5,34                           | 6,00 | 4,31 | 4,02              | 2,06             | 0,09 | 0,58             | 0,24                          | 0,06                           | 6,23         | CGR        |
| CM07-961-01  | 61,40            | 15,66                          | 3,67                           | 4,04 | 1,12 | 7,81              | 1,17             | 0,04 | 0,66             | 0,33                          | 0,01                           | 4,06         | CPO        |
| CM07-1461-01 | 73,87            | 14,08                          | 0,90                           | 0,82 | 0,20 | 6,24              | 2,77             | 0,01 | 0,11             | 0,09                          | 0,03                           | 1,05         | CPO        |
| CM07-1681-02 | 67,85            | 15,44                          | 2,68                           | 2,36 | 0,76 | 6,32              | 2,68             | 0,03 | 0,44             | 0,21                          | 0,02                           | 1,47         | CPO        |
| BA09-3758-01 | 65,06            | 15,85                          | 3,08                           | 2,68 | 1,22 | 7,44              | 2,34             | 0,04 | 0,56             | 0,30                          | 0,02                           | 1,66         | CPO        |
| BA10-3987-01 | 58,17            | 13,23                          | 5,07                           | 3,69 | 5,78 | 5,90              | 1,76             | 0,06 | 0,50             | 0,15                          | 0,08                           | 4,62         | CPO        |
| BA09-3525-02 | 62,26            | 17,29                          | 3,68                           | 2,79 | 1,05 | 9,99              | 0,35             | 0,03 | 0,61             | 0,27                          | 0,01                           | 1,42         | CPO        |
| BA09-3605-02 | 61,03            | 15,22                          | 4,11                           | 3,79 | 3,10 | 6,73              | 2,02             | 0,05 | 0,48             | 0,19                          | 0,03                           | 3,09         | CPO        |
| CM07-1681-02 | 67,85            | 15,44                          | 2,68                           | 2,36 | 0,76 | 6,32              | 2,68             | 0,03 | 0,44             | 0,21                          | 0,02                           | 1,47         | CPO        |
| CM07-1461-01 | 73,87            | 14,08                          | 0,90                           | 0,82 | 0,20 | 6,24              | 2,77             | 0,01 | 0,11             | 0,09                          | 0,03                           | 1,05         | CPO        |
| CM07-961-01  | 61,40            | 15,66                          | 3,67                           | 4,04 | 1,12 | 7,81              | 1,17             | 0,04 | 0,66             | 0,33                          | 0,01                           | 4,06         | CPO        |
| CM07-1099-01 | 57,86            | 17,02                          | 5,92                           | 2,26 | 2,99 | 4,67              | 3,80             | 0,06 | 0,62             | 0,15                          | 0,04                           | 3,46         | CGR        |
| CM07-1817-01 | 63,68            | 13,59                          | 5,16                           | 2,60 | 2,34 | 5,21              | 2,65             | 0,05 | 0,49             | 0,11                          | 0,04                           | 3,17         | CGR        |
| CM06-920-01  | 57,90            | 15,68                          | 6,16                           | 3,46 | 3,13 | 4,85              | 2,28             | 0,06 | 0,67             | 0,19                          | 0,04                           | 4,94         | CGR        |
| CM07-1109-03 | 56,41            | 15,46                          | 5,39                           | 3,77 | 2,18 | 4,33              | 5,51             | 0,06 | 0,55             | 0,06                          | 0,04                           | 4,92         | CGR        |
| CM07-1119-02 | 52,81            | 15,33                          | 6,82                           | 3,89 | 4,44 | 4,74              | 5,35             | 0,08 | 0,75             | 0,21                          | 0,04                           | 4,90         | CGR        |
| CM07-1240-02 | 62,35            | 12,52                          | 5,65                           | 3,68 | 3,32 | 3,36              | 3,49             | 0,07 | 0,57             | 0,13                          | 0,05                           | 4,51         | CGR        |
| CM07-1461-02 | 60,99            | 14,82                          | 5,05                           | 2,64 | 2,32 | 4,83              | 4,86             | 0,05 | 0,55             | 0,11                          | 0,03                           | 3,94         | CGR        |
| CM06-771-02  | 67,32            | 12,09                          | 4,50                           | 2,55 | 2,05 | 3,20              | 4,26             | 0,05 | 0,46             | 0,14                          | 0,05                           | 3,54         | CGR        |
| CM06-763-03  | 61,33            | 15,87                          | 5,36                           | 2,38 | 2,73 | 5,47              | 2,64             | 0,05 | 0,56             | 0,23                          | 0,05                           | 3,69         | CGR        |
| CM07-1273-02 | 63,42            | 14,20                          | 5,33                           | 2,53 | 2,77 | 5,22              | 2,49             | 0,06 | 0,53             | 0,12                          | 0,04                           | 2,77         | CGR        |
| CM08-1754-02 | 56,55            | 14,97                          | 6,35                           | 3,94 | 4,71 | 3,36              | 3,91             | 0,09 | 0,60             | 0,13                          | 0,06                           | 4,74         | CGR        |
| CM07-1194-01 | 63,08            | 16,75                          | 6,11                           | 2,78 | 3,05 | 3,62              | 3,19             | 0,07 | 0,62             | 0,15                          | 0,05                           | 1,42         | CGR        |
| CM07-1669-03 | 58,51            | 14,42                          | 5,42                           | 3,15 | 2,61 | 4,68              | 4,82             | 0,07 | 0,55             | 0,08                          | 0,04                           | 4,77         | CGR        |
| CM07-1397-02 | 60,94            | 14,17                          | 5,52                           | 3,55 | 3,01 | 3,91              | 3,18             | 0,08 | 0,52             | 0,14                          | 0,04                           | 3,87         | CGR        |
| CM09-2625-02 | 58,58            | 15,17                          | 6,44                           | 3,64 | 3,45 | 3,73              | 3,66             | 0,08 | 0,60             | 0,15                          | 0,04                           | 4,47         | CGR        |
| CM08-1894-02 | 62,92            | 14,44                          | 5,54                           | 2,11 | 2,80 | 5,19              | 2,93             | 0,06 | 0,55             | 0,12                          | 0,04                           | 3,66         | CGR        |
| CM08-1860-02 | 58,06            | 15,29                          | 6,38                           | 3,77 | 3,72 | 2,28              | 4,06             | 0,08 | 0,59             | 0,13                          | 0,05                           | 5,07         | CGR        |
| CM09-2603-02 | 62,19            | 15,45                          | 5,57                           | 2,69 | 2,89 | 3,34              | 3,92             | 0,07 | 0,58             | 0,14                          | 0,04                           | 3,21         | CGR        |
| CM10-2716-02 | 62,94            | 15,33                          | 5,71                           | 2,11 | 3,07 | 3,85              | 2,30             | 0,05 | 0,57             | 0,14                          | 0,04                           | 3,52         | CGR        |
| CM07-1555-02 | 64,78            | 14,58                          | 4,68                           | 2,52 | 2,35 | 3,13              | 3,90             | 0,05 | 0,49             | 0,15                          | 0,03                           | 3,63         | CGR        |
| CM09-2510-01 | 57,86            | 17,00                          | 6,41                           | 2,39 | 3,39 | 3,52              | 4,69             | 0,07 | 0,68             | 0,17                          | 0,04                           | 3,80         | GR         |
| CM07-1109-02 | 62,44            | 15,48                          | 3,64                           | 3,06 | 1,20 | 6,20              | 3,22             | 0,04 | 0,51             | 0,27                          | 0,02                           | 3,73         | CPO        |

| Échantillon   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO   | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | MnO  | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Perte au feu | Lithologie |
|---------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|-------------------|------------------|------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------|------------|
|               | %                | %                              | %                              | %    | %     | %                 | %                | %    | %                | %                             | %                              | %            |            |
| CM07-1574-01  | 66,70            | 12,96                          | 2,67                           | 2,74 | 0,53  | 2,69              | 7,08             | 0,03 | 0,38             | 0,31                          | 0,01                           | 3,22         | SPO        |
| CM07-1681-01  | 65,49            | 15,88                          | 2,63                           | 2,45 | 0,77  | 6,04              | 3,56             | 0,03 | 0,45             | 0,24                          | 0,03                           | 2,41         | CPO        |
| CM08-1900-01  | 63,36            | 15,61                          | 3,52                           | 2,95 | 1,24  | 5,46              | 3,85             | 0,04 | 0,52             | 0,28                          | 0,02                           | 2,78         | SPO        |
| BA09-3498-02  | 60,72            | 16,19                          | 3,72                           | 3,10 | 1,48  | 7,85              | 2,35             | 0,03 | 0,63             | 0,38                          | 0,01                           | 2,82         | CPO        |
| BA09-3533-01  | 65,36            | 15,58                          | 2,93                           | 2,73 | 0,88  | 6,19              | 3,53             | 0,03 | 0,49             | 0,21                          | 0,03                           | 2,71         | CPO        |
| GL09-2884-02  | 66,09            | 15,43                          | 2,61                           | 2,51 | 1,04  | 5,22              | 3,53             | 0,03 | 0,32             | 0,17                          | 0,02                           | 3,08         | CPO        |
| CM07-1054-02  | 49,82            | 11,67                          | 9,16                           | 8,13 | 8,11  | 1,82              | 3,72             | 0,16 | 0,67             | 0,31                          | 0,08                           | 7,24         | SCH        |
| CM06-729-01   | 47,25            | 13,29                          | 9,80                           | 9,44 | 6,11  | 2,42              | 1,85             | 0,15 | 0,82             | 0,36                          | 0,05                           | 7,28         | SCH        |
| CM06-775-01   | 49,51            | 12,58                          | 8,01                           | 8,95 | 5,91  | 2,40              | 3,66             | 0,13 | 0,64             | 0,20                          | 0,04                           | 7,69         | SCH        |
| BA10-3943-01  | 42,05            | 5,16                           | 10,38                          | 6,67 | 24,03 | 0,24              | 0,35             | 0,17 | 0,31             | 0,02                          | 0,30                           | 10,12        | SCH        |
| CHL09-2194-01 | 41,76            | 7,47                           | 9,70                           | 7,65 | 18,28 | 1,22              | 2,49             | 0,16 | 0,51             | 0,06                          | 0,22                           | 10,60        | SCH        |
| BA10-3986-01  | 44,52            | 5,29                           | 9,88                           | 7,76 | 22,52 | 0,18              | 1,71             | 0,17 | 0,33             | 0,03                          | 0,28                           | 7,85         | SCH        |
| BA08-3108-02  | 37,25            | 3,32                           | 8,53                           | 8,01 | 26,35 | 0,03              | 0,01             | 0,13 | 0,22             | 0,02                          | 0,23                           | 15,90        | SCH        |
| CM07-1322-02  | 64,01            | 14,91                          | 3,92                           | 3,22 | 1,40  | 6,87              | 1,41             | 0,04 | 0,64             | 0,26                          | 0,02                           | 3,51         | SGR        |
| CM06-805-01   | 66,03            | 15,25                          | 5,25                           | 2,97 | 2,63  | 4,09              | 1,88             | 0,08 | 0,55             | 0,15                          | 0,06                           | 1,72         | SGR        |
| CM10-2703-01  | 64,97            | 15,22                          | 4,71                           | 2,57 | 2,18  | 4,14              | 2,79             | 0,06 | 0,54             | 0,17                          | 0,04                           | 2,66         | SGR        |
| CM05-679-01   | 63,25            | 13,75                          | 5,56                           | 2,84 | 2,62  | 4,99              | 2,37             | 0,07 | 0,54             | 0,12                          | 0,05                           | 3,39         | SGR        |
| CM07-1229-02  | 68,45            | 12,50                          | 2,67                           | 3,00 | 0,50  | 4,94              | 3,08             | 0,02 | 0,39             | 0,21                          | 0,02                           | 3,51         | SPO        |
| CM08-1741-01  | 73,15            | 14,45                          | 0,86                           | 1,17 | 0,14  | 5,92              | 3,58             | 0,01 | 0,12             | 0,05                          | 0,03                           | 1,15         | SPO        |
| CM06-820-02   | 60,91            | 15,36                          | 4,93                           | 3,49 | 2,32  | 6,36              | 2,28             | 0,05 | 0,64             | 0,27                          | 0,04                           | 3,75         | SPO        |
| CM07-1669-01  | 73,08            | 14,68                          | 1,30                           | 0,94 | 0,30  | 6,88              | 2,02             | 0,01 | 0,19             | 0,10                          | 0,01                           | 1,23         | SPO        |
| CM08-1901-01  | 70,98            | 15,61                          | 1,55                           | 1,31 | 0,48  | 6,93              | 1,89             | 0,02 | 0,19             | 0,08                          | 0,03                           | 1,83         | SPO        |
| CM08-1981-01  | 71,68            | 15,05                          | 0,93                           | 0,84 | 0,13  | 8,06              | 0,58             | 0,01 | 0,12             | 0,10                          | 0,02                           | 1,06         | SPO        |
| CHL11-2376-01 | 70,18            | 16,06                          | 0,97                           | 1,22 | 0,38  | 7,07              | 2,95             | 0,01 | 0,16             | 0,05                          | 0,01                           | 1,26         | SPO        |
| BA08-3006-01  | 62,75            | 16,93                          | 2,41                           | 2,78 | 1,17  | 10,27             | 0,21             | 0,03 | 0,25             | 0,12                          | 0,02                           | 1,68         | SPO        |
| BA08-3205-01  | 63,08            | 15,33                          | 3,56                           | 3,40 | 1,83  | 6,14              | 2,70             | 0,04 | 0,52             | 0,22                          | 0,02                           | 3,11         | SPO        |
| GL09-2814-01  | 71,68            | 14,97                          | 0,99                           | 1,31 | 0,15  | 6,27              | 2,96             | 0,01 | 0,18             | 0,12                          | 0,03                           | 1,55         | SPO        |
| GL09-2867-02  | 73,38            | 12,91                          | 1,01                           | 1,54 | 0,20  | 5,39              | 2,14             | 0,01 | 0,16             | 0,06                          | 0,04                           | 1,80         | SPO        |
| GL09-2884-03  | 71,62            | 14,30                          | 1,06                           | 1,56 | 0,22  | 5,89              | 2,93             | 0,01 | 0,17             | 0,07                          | 0,02                           | 1,85         | SPO        |



Annexe B 7 : Illustrations d'un extrait de plan d'exploitation (haut) et de l'image panchromatique WV3 (bas) utilisés pour produire la carte d'élévation du plancher.



Annexe B 8 : Illustration de la carte d'élévation reconstituée à partir de l'image WV3 et du plan d'exploitation de la Mine Canadian Malartic.

## Annexe C : Résultats de fusion complémentaires

| Maille          | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Nb. Ech.</b> | <b>4676</b>         | <b>2817</b>         | <b>1089</b>         | <b>659</b>          | <b>483</b>          | <b>295</b>          | <b>235</b>            | <b>142</b>            | <b>150</b>            | <b>92</b>             |
| <b>100</b>      | 86,657              | 85,242              | 78,042              | 77,975              | 73,775              | 73,611              | 61,288                |                       | 64,505                | 63,031                |
| <b>300</b>      | 86,657              | 85,123              | 78,101              | 78,057              | 73,693              | 73,403              | 61,244                |                       | 64,840                | 63,477                |
| <b>500</b>      | 86,590              | 85,220              | 78,146              | 78,064              | 73,887              | 73,708              | 61,415                |                       | 64,937                | 63,671                |
| <b>800</b>      | 86,746              | 85,242              | 78,273              | 78,243              | 74,192              | 73,879              | 62,442                |                       | 64,974                | 64,319                |
| <b>1000</b>     | 86,746              | 85,294              | 78,340              | 78,287              | 73,820              | 73,686              | 62,763                |                       | 65,354                | 65,034                |
| <b>1200</b>     | 86,813              | 85,302              | 78,399              | 78,511              | 74,200              | 73,976              | 62,777                |                       | 65,659                | 65,451                |
| <b>1400</b>     | 86,783              | 85,376              | 78,474              | 78,526              | 74,259              | 73,909              | 63,261                |                       | 65,711                | 65,302                |
| <b>1600</b>     | 86,932              | 85,473              | 78,585              | 78,667              | 74,371              | 74,051              | 64,423                |                       | 65,927                | 66,240                |
| <b>1800</b>     | 86,984              | 85,570              | 78,771              | 78,645              | 74,430              | 74,371              | 64,140                |                       | 66,180                | 66,500                |
| <b>2000</b>     | 86,888              | 85,644              | 78,704              | 78,794              | 74,401              | 74,430              | 64,572                |                       | 66,508                | 66,798                |

Annexe C 1 : Résultats de fusion exprimés en précisions après transformation pignistique des masses.

| Maille          | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Nb. Ech.</b> | <b>4676</b>         | <b>2817</b>         | <b>1089</b>         | <b>659</b>          | <b>483</b>          | <b>295</b>          | <b>235</b>            | <b>142</b>            | <b>150</b>            | <b>92</b>             |
| <b>100</b>      | 0,777               | 0,754               | 0,631               | 0,631               | 0,558               | 0,554               | 0,354                 |                       | 0,387                 | 0,365                 |
| <b>300</b>      | 0,777               | 0,751               | 0,632               | 0,633               | 0,557               | 0,550               | 0,351                 |                       | 0,393                 | 0,370                 |
| <b>500</b>      | 0,775               | 0,753               | 0,633               | 0,633               | 0,560               | 0,556               | 0,355                 |                       | 0,394                 | 0,375                 |
| <b>800</b>      | 0,778               | 0,753               | 0,635               | 0,635               | 0,565               | 0,559               | 0,371                 |                       | 0,394                 | 0,385                 |
| <b>1000</b>     | 0,778               | 0,754               | 0,636               | 0,636               | 0,559               | 0,555               | 0,376                 |                       | 0,401                 | 0,397                 |
| <b>1200</b>     | 0,779               | 0,754               | 0,637               | 0,640               | 0,565               | 0,560               | 0,374                 |                       | 0,406                 | 0,404                 |
| <b>1400</b>     | 0,779               | 0,756               | 0,638               | 0,640               | 0,566               | 0,559               | 0,382                 |                       | 0,407                 | 0,401                 |
| <b>1600</b>     | 0,781               | 0,757               | 0,640               | 0,642               | 0,568               | 0,561               | 0,401                 |                       | 0,410                 | 0,417                 |
| <b>1800</b>     | 0,782               | 0,759               | 0,643               | 0,642               | 0,569               | 0,567               | 0,396                 |                       | 0,415                 | 0,422                 |
| <b>2000</b>     | 0,780               | 0,760               | 0,642               | 0,645               | 0,569               | 0,568               | 0,404                 |                       | 0,421                 | 0,428                 |

Annexe C 2 : Résultats de fusion exprimés en kappa après transformation pignistique des masses.

| Maille   | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nb. Ech. | 4676                | 2817                | 1089                | 659                 | 483                 | 295                 | 235                   | 142                   | 150                   | 92                    |
| 100      | 86,545              | 85,145              | 77,945              | 77,841              | 73,820              | 73,611              | 60,901                |                       | 64,594                | 63,135                |
| 300      | 86,642              | 85,071              | 77,982              | 77,975              | 73,582              | 73,395              | 60,752                |                       | 64,654                | 63,425                |
| 500      | 86,560              | 85,160              | 78,094              | 78,034              | 73,879              | 73,641              | 60,834                |                       | 64,900                | 63,649                |
| 800      | 86,679              | 85,220              | 78,116              | 78,109              | 74,185              | 73,879              | 61,847                |                       | 65,048                | 64,512                |
| 1000     | 86,739              | 85,242              | 78,273              | 78,243              | 73,872              | 73,611              | 62,130                |                       | 65,168                | 65,011                |
| 1200     | 86,768              | 85,235              | 78,295              | 78,436              | 74,229              | 73,939              | 62,204                |                       | 65,547                | 65,503                |
| 1400     | 86,754              | 85,331              | 78,310              | 78,392              | 74,185              | 73,820              | 62,569                |                       | 65,607                | 65,369                |
| 1600     | 86,843              | 85,473              | 78,489              | 78,556              | 74,363              | 74,013              | 63,589                |                       | 65,741                | 66,128                |
| 1800     | 86,940              | 85,510              | 78,682              | 78,600              | 74,341              | 74,244              | 63,462                |                       | 66,002                | 66,471                |
| 2000     | 86,843              | 85,555              | 78,548              | 78,697              | 74,267              | 74,282              | 63,656                |                       | 66,210                | 66,806                |

Annexe C 3 : Résultats de fusion exprimés en précision après transformation par la fonction de croyance généralisée.

| Maille   | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nb. Ech. | 4676                | 2817                | 1089                | 659                 | 483                 | 295                 | 235                   | 142                   | 150                   | 92                    |
| 100      | 0,775               | 0,752               | 0,630               | 0,629               | 0,559               | 0,554               | 0,347                 |                       | 0,389                 | 0,366                 |
| 300      | 0,776               | 0,750               | 0,630               | 0,631               | 0,554               | 0,550               | 0,342                 |                       | 0,389                 | 0,369                 |
| 500      | 0,775               | 0,752               | 0,632               | 0,632               | 0,560               | 0,554               | 0,344                 |                       | 0,394                 | 0,374                 |
| 800      | 0,777               | 0,753               | 0,633               | 0,633               | 0,565               | 0,558               | 0,361                 |                       | 0,396                 | 0,388                 |
| 1000     | 0,778               | 0,753               | 0,635               | 0,635               | 0,560               | 0,554               | 0,365                 |                       | 0,398                 | 0,397                 |
| 1200     | 0,778               | 0,753               | 0,635               | 0,639               | 0,566               | 0,559               | 0,364                 |                       | 0,405                 | 0,405                 |
| 1400     | 0,778               | 0,755               | 0,636               | 0,638               | 0,565               | 0,557               | 0,370                 |                       | 0,405                 | 0,402                 |
| 1600     | 0,780               | 0,757               | 0,638               | 0,640               | 0,567               | 0,560               | 0,387                 |                       | 0,407                 | 0,415                 |
| 1800     | 0,781               | 0,758               | 0,642               | 0,641               | 0,567               | 0,564               | 0,384                 |                       | 0,412                 | 0,421                 |
| 2000     | 0,780               | 0,758               | 0,639               | 0,643               | 0,566               | 0,565               | 0,388                 |                       | 0,415                 | 0,428                 |

Annexe C 4 : Résultats de fusion exprimés en kappa après transformation par la fonction de croyance généralisée.

| Maille   | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nb. Ech. | 4676                | 2817                | 1089                | 659                 | 483                 | 295                 | 235                   | 142                   | 150                   | 92                    |
| 100      | -0,059              | 0,313               | 0,253               | 0,238               | 0,231               | -0,030              | 1,526                 |                       | -1,169                | 1,162                 |
| 300      | -0,104              | 0,030               | -0,275              | 0,059               | -0,275              | -0,216              | 1,660                 |                       | -1,273                | 0,968                 |
| 500      | -0,223              | -0,134              | 0,283               | 0,417               | 0,238               | 0,246               | 1,787                 |                       | -0,603                | 2,055                 |
| 800      | -0,089              | 0,000               | 0,745               | 0,797               | 0,477               | 0,789               | 3,246                 |                       | 0,231                 | 2,748                 |
| 1000     | 0,156               | 0,290               | 0,998               | 1,102               | 0,745               | 0,521               | 4,907                 |                       | 1,169                 | 3,336                 |
| 1200     | -0,089              | 0,074               | 0,879               | 1,162               | 1,244               | 1,229               | 5,480                 |                       | 1,951                 | 4,468                 |
| 1400     | 0,149               | 0,395               | 1,177               | 1,325               | 1,474               | 1,534               | 5,011                 |                       | 1,802                 | 4,095                 |
| 1600     | 0,082               | 0,417               | 1,363               | 1,638               | 1,765               | 1,869               | 6,240                 |                       | 2,800                 | 5,242                 |
| 1800     | 0,454               | 0,603               | 1,668               | 2,092               | 1,869               | 2,085               | 6,106                 |                       | 3,343                 | 5,897                 |
| 2000     | 0,395               | 0,894               | 1,653               | 1,847               | 2,390               | 2,457               | 6,880                 |                       | 4,259                 | 6,433                 |

Annexe C 5 : Amélioration par fusion exprimée en précision après transformation par la fonction de croyance généralisée.

| Maille   | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nb. Ech. | 4676                | 2817                | 1089                | 659                 | 483                 | 295                 | 235                   | 142                   | 150                   | 92                    |
| 100      | -0,001              | 0,005               | 0,003               | 0,003               | 0,003               | -0,001              | 0,017                 |                       | -0,023                | 0,018                 |
| 300      | -0,003              | -0,001              | -0,007              | -0,001              | -0,008              | -0,006              | 0,010                 |                       | -0,030                | 0,007                 |
| 500      | -0,004              | -0,004              | 0,003               | 0,005               | 0,002               | 0,003               | 0,016                 |                       | -0,012                | 0,031                 |
| 800      | -0,002              | -0,002              | 0,010               | 0,010               | 0,005               | 0,012               | 0,041                 |                       | 0,004                 | 0,045                 |
| 1000     | 0,002               | 0,003               | 0,014               | 0,016               | 0,010               | 0,007               | 0,069                 |                       | 0,019                 | 0,054                 |
| 1200     | -0,003              | -0,001              | 0,012               | 0,016               | 0,018               | 0,019               | 0,077                 |                       | 0,033                 | 0,074                 |
| 1400     | 0,002               | 0,005               | 0,017               | 0,019               | 0,022               | 0,024               | 0,069                 |                       | 0,029                 | 0,066                 |
| 1600     | 0,000               | 0,005               | 0,020               | 0,024               | 0,026               | 0,029               | 0,089                 |                       | 0,046                 | 0,086                 |
| 1800     | 0,007               | 0,008               | 0,025               | 0,032               | 0,029               | 0,034               | 0,089                 |                       | 0,058                 | 0,100                 |
| 2000     | 0,006               | 0,013               | 0,025               | 0,028               | 0,039               | 0,041               | 0,104                 |                       | 0,076                 | 0,111                 |

Annexe C 6 : Amélioration par fusion exprimée en kappa après transformation par la fonction de croyance généralisée.

| Maille   | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nb. Ech. | 4676                | 2817                | 1089                | 659                 | 483                 | 295                 | 235                   | 142                   | 150                   | 92                    |
| 100      | 86,634              | 85,227              | 78,057              | 77,982              | 73,790              | 73,656              | 61,244                |                       | 64,497                | 63,008                |
| 300      | 86,657              | 85,138              | 78,079              | 78,034              | 73,738              | 73,395              | 61,199                |                       | 64,780                | 63,492                |
| 500      | 86,582              | 85,197              | 78,191              | 78,057              | 73,924              | 73,701              | 61,415                |                       | 64,959                | 63,693                |
| 800      | 86,754              | 85,272              | 78,258              | 78,258              | 74,244              | 73,932              | 62,442                |                       | 65,004                | 64,319                |
| 1000     | 86,761              | 85,294              | 78,347              | 78,280              | 73,879              | 73,731              | 62,800                |                       | 65,398                | 64,989                |
| 1200     | 86,813              | 85,272              | 78,421              | 78,511              | 74,207              | 73,961              | 62,859                |                       | 65,689                | 65,458                |
| 1400     | 86,776              | 85,391              | 78,511              | 78,548              | 74,252              | 73,932              | 63,232                |                       | 65,696                | 65,376                |
| 1600     | 86,940              | 85,488              | 78,623              | 78,690              | 74,408              | 74,058              | 64,460                |                       | 65,875                | 66,299                |
| 1800     | 86,992              | 85,570              | 78,749              | 78,630              | 74,438              | 74,423              | 64,162                |                       | 66,188                | 66,642                |
| 2000     | 86,865              | 85,637              | 78,712              | 78,786              | 74,438              | 74,445              | 64,654                |                       | 66,553                | 66,932                |

Annexe C 7 : Résultats de fusion exprimés en précision après transformation par la fonction de plausibilité généralisée.

| Maille   | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nb. Ech. | 4676                | 2817                | 1089                | 659                 | 483                 | 295                 | 235                   | 142                   | 150                   | 92                    |
| 100      | 0,776               | 0,753               | 0,632               | 0,632               | 0,559               | 0,555               | 0,356                 |                       | 0,388                 | 0,366                 |
| 300      | 0,777               | 0,752               | 0,632               | 0,632               | 0,557               | 0,550               | 0,353                 |                       | 0,392                 | 0,372                 |
| 500      | 0,775               | 0,753               | 0,634               | 0,633               | 0,561               | 0,556               | 0,357                 |                       | 0,395                 | 0,377                 |
| 800      | 0,778               | 0,754               | 0,635               | 0,636               | 0,566               | 0,560               | 0,373                 |                       | 0,395                 | 0,386                 |
| 1000     | 0,778               | 0,754               | 0,637               | 0,636               | 0,560               | 0,556               | 0,378                 |                       | 0,402                 | 0,398                 |
| 1200     | 0,779               | 0,754               | 0,637               | 0,640               | 0,566               | 0,560               | 0,377                 |                       | 0,407                 | 0,405                 |
| 1400     | 0,778               | 0,756               | 0,639               | 0,641               | 0,566               | 0,559               | 0,383                 |                       | 0,407                 | 0,404                 |
| 1600     | 0,781               | 0,757               | 0,641               | 0,643               | 0,568               | 0,561               | 0,403                 |                       | 0,410                 | 0,419                 |
| 1800     | 0,782               | 0,759               | 0,643               | 0,642               | 0,569               | 0,568               | 0,398                 |                       | 0,415                 | 0,425                 |
| 2000     | 0,780               | 0,760               | 0,642               | 0,645               | 0,569               | 0,568               | 0,407                 |                       | 0,422                 | 0,431                 |

Annexe C 8 : Résultats de fusion exprimés en kappa après transformation par la fonction de plausibilité généralisée.

| Maille   | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nb. Ech. | 4676                | 2817                | 1089                | 659                 | 483                 | 295                 | 235                   | 142                   | 150                   | 92                    |
| 100      | -0,037              | 0,313               | 0,238               | 0,246               | 0,298               | -0,067              | 1,735                 |                       | -1,214                | 1,154                 |
| 300      | -0,089              | 0,022               | -0,231              | 0,089               | -0,216              | -0,216              | 1,802                 |                       | -1,132                | 0,879                 |
| 500      | -0,223              | -0,141              | 0,261               | 0,439               | 0,275               | 0,268               | 1,921                 |                       | -0,432                | 2,010                 |
| 800      | -0,082              | 0,030               | 0,789               | 0,797               | 0,506               | 0,797               | 3,388                 |                       | 0,313                 | 2,815                 |
| 1000     | 0,149               | 0,305               | 1,020               | 1,117               | 0,782               | 0,558               | 5,004                 |                       | 1,191                 | 3,336                 |
| 1200     | -0,074              | 0,082               | 0,901               | 1,214               | 1,273               | 1,273               | 5,458                 |                       | 2,010                 | 4,453                 |
| 1400     | 0,141               | 0,365               | 1,169               | 1,333               | 1,489               | 1,556               | 5,182                 |                       | 1,876                 | 4,162                 |
| 1600     | 0,075               | 0,432               | 1,378               | 1,653               | 1,809               | 1,899               | 6,307                 |                       | 2,815                 | 5,294                 |
| 1800     | 0,462               | 0,618               | 1,675               | 2,092               | 1,869               | 2,077               | 6,225                 |                       | 3,403                 | 5,897                 |
| 2000     | 0,395               | 0,886               | 1,675               | 1,832               | 2,420               | 2,457               | 6,947                 |                       | 4,356                 | 6,463                 |

Annexe C 9 : Amélioration par fusion exprimée en précision après transformation par la fonction de plausibilité généralisée.

| Maille   | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nb. Ech. | 4676                | 2817                | 1089                | 659                 | 483                 | 295                 | 235                   | 142                   | 150                   | 92                    |
| 100      | -0,001              | 0,005               | 0,003               | 0,003               | 0,005               | -0,001              | 0,021                 |                       | -0,023                | 0,018                 |
| 300      | -0,002              | -0,001              | -0,007              | -0,001              | -0,007              | -0,006              | 0,013                 |                       | -0,028                | 0,006                 |
| 500      | -0,004              | -0,004              | 0,002               | 0,005               | 0,002               | 0,003               | 0,019                 |                       | -0,009                | 0,031                 |
| 800      | -0,002              | -0,001              | 0,010               | 0,010               | 0,006               | 0,012               | 0,044                 |                       | 0,005                 | 0,046                 |
| 1000     | 0,002               | 0,004               | 0,015               | 0,016               | 0,011               | 0,008               | 0,071                 |                       | 0,019                 | 0,055                 |
| 1200     | -0,002              | -0,001              | 0,012               | 0,017               | 0,019               | 0,020               | 0,077                 |                       | 0,034                 | 0,074                 |
| 1400     | 0,001               | 0,004               | 0,017               | 0,019               | 0,022               | 0,024               | 0,073                 |                       | 0,030                 | 0,067                 |
| 1600     | 0,000               | 0,005               | 0,020               | 0,025               | 0,027               | 0,030               | 0,091                 |                       | 0,046                 | 0,087                 |
| 1800     | 0,007               | 0,008               | 0,026               | 0,032               | 0,029               | 0,034               | 0,091                 |                       | 0,059                 | 0,100                 |
| 2000     | 0,006               | 0,013               | 0,026               | 0,028               | 0,039               | 0,041               | 0,105                 |                       | 0,078                 | 0,112                 |

Annexe C 10 : Amélioration par fusion exprimée en kappa après transformation par la fonction de plausibilité généralisée.



| Maille   | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nb. Ech. | 4676                | 2817                | 1089                | 659                 | 483                 | 295                 | 235                   | 142                   | 150                   | 92                    |
| 100      | 86,605              | 85,480              | 78,295              | 78,146              | 73,991              | 73,314              | 61,832                |                       | 63,410                | 63,939                |
| 300      | 86,560              | 85,190              | 77,818              | 77,982              | 73,455              | 73,157              | 62,055                |                       | 63,321                | 63,656                |
| 500      | 86,426              | 85,019              | 78,295              | 78,332              | 73,969              | 73,634              | 62,063                |                       | 64,125                | 64,818                |
| 800      | 86,560              | 85,182              | 78,816              | 78,682              | 74,200              | 74,185              | 63,619                |                       | 64,855                | 65,599                |
| 1000     | 86,791              | 85,473              | 79,054              | 79,010              | 74,512              | 73,939              | 65,168                |                       | 65,838                | 66,128                |
| 1200     | 86,567              | 85,249              | 78,898              | 79,107              | 74,952              | 74,654              | 65,644                |                       | 66,515                | 67,260                |
| 1400     | 86,791              | 85,525              | 79,203              | 79,211              | 75,175              | 74,922              | 65,354                |                       | 66,366                | 66,962                |
| 1600     | 86,716              | 85,599              | 79,412              | 79,538              | 75,495              | 75,287              | 66,441                |                       | 67,409                | 68,139                |
| 1800     | 87,104              | 85,771              | 79,702              | 79,985              | 75,577              | 75,458              | 66,433                |                       | 67,923                | 68,719                |
| 2000     | 87,044              | 86,046              | 79,725              | 79,725              | 76,113              | 75,853              | 67,096                |                       | 68,913                | 69,255                |

Annexe C 11 : Résultats de fusion exprimés en précision après transformation par la probabiliste DS<sub>m</sub>P.

| Maille   | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nb. Ech. | 4676                | 2817                | 1089                | 659                 | 483                 | 295                 | 235                   | 142                   | 150                   | 92                    |
| 100      | 0,775               | 0,757               | 0,635               | 0,633               | 0,561               | 0,549               | 0,356                 |                       | 0,367                 | 0,378                 |
| 300      | 0,774               | 0,751               | 0,625               | 0,629               | 0,550               | 0,544               | 0,351                 |                       | 0,359                 | 0,367                 |
| 500      | 0,772               | 0,748               | 0,634               | 0,635               | 0,559               | 0,553               | 0,355                 |                       | 0,379                 | 0,392                 |
| 800      | 0,774               | 0,751               | 0,642               | 0,640               | 0,562               | 0,562               | 0,381                 |                       | 0,394                 | 0,407                 |
| 1000     | 0,778               | 0,756               | 0,646               | 0,646               | 0,568               | 0,558               | 0,408                 |                       | 0,409                 | 0,415                 |
| 1200     | 0,774               | 0,752               | 0,643               | 0,647               | 0,575               | 0,570               | 0,414                 |                       | 0,422                 | 0,435                 |
| 1400     | 0,778               | 0,756               | 0,648               | 0,649               | 0,579               | 0,574               | 0,409                 |                       | 0,417                 | 0,428                 |
| 1600     | 0,776               | 0,758               | 0,651               | 0,654               | 0,584               | 0,580               | 0,427                 |                       | 0,436                 | 0,449                 |
| 1800     | 0,783               | 0,760               | 0,657               | 0,662               | 0,586               | 0,584               | 0,428                 |                       | 0,447                 | 0,461                 |
| 2000     | 0,782               | 0,765               | 0,657               | 0,658               | 0,596               | 0,591               | 0,442                 |                       | 0,466                 | 0,472                 |

Annexe C 12 : Résultats de fusion exprimés en kappa après transformation par la probabiliste DS<sub>m</sub>P.

| Maille   | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nb. Ech. | 4676                | 2817                | 1089                | 659                 | 483                 | 295                 | 235                   | 142                   | 150                   | 92                    |
| 100      | -0,037              | 0,320               | 0,268               | 0,253               | 0,305               | -0,067              | 1,660                 |                       | -1,147                | 1,139                 |
| 300      | -0,082              | 0,030               | -0,209              | 0,089               | -0,231              | -0,223              | 1,884                 |                       | -1,236                | 0,856                 |
| 500      | -0,216              | -0,141              | 0,268               | 0,439               | 0,283               | 0,253               | 1,891                 |                       | -0,432                | 2,018                 |
| 800      | -0,082              | 0,022               | 0,789               | 0,789               | 0,514               | 0,804               | 3,448                 |                       | 0,298                 | 2,800                 |
| 1000     | 0,149               | 0,313               | 1,028               | 1,117               | 0,826               | 0,558               | 4,996                 |                       | 1,281                 | 3,328                 |
| 1200     | -0,074              | 0,089               | 0,871               | 1,214               | 1,266               | 1,273               | 5,473                 |                       | 1,958                 | 4,460                 |
| 1400     | 0,149               | 0,365               | 1,177               | 1,318               | 1,489               | 1,541               | 5,182                 |                       | 1,809                 | 4,162                 |
| 1600     | 0,075               | 0,439               | 1,385               | 1,646               | 1,809               | 1,906               | 6,269                 |                       | 2,852                 | 5,339                 |
| 1800     | 0,462               | 0,611               | 1,675               | 2,092               | 1,891               | 2,077               | 6,262                 |                       | 3,366                 | 5,920                 |
| 2000     | 0,402               | 0,886               | 1,698               | 1,832               | 2,427               | 2,472               | 6,925                 |                       | 4,356                 | 6,456                 |

Annexe C 13 : Amélioration par fusion exprimée en précision après transformation probabiliste DSMP.

| Maille   | 300<br>x300<br>x100 | 300<br>x300<br>x200 | 600<br>x600<br>x100 | 600x<br>600<br>x200 | 900<br>x900<br>x100 | 900<br>x900<br>x200 | 1200<br>x1200<br>x100 | 1200<br>x1200<br>x200 | 1500<br>x1500<br>x100 | 1500<br>x1500<br>x200 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Nb. Ech. | 4676                | 2817                | 1089                | 659                 | 483                 | 295                 | 235                   | 142                   | 150                   | 92                    |
| 100      | -0,001              | 0,005               | 0,004               | 0,003               | 0,005               | -0,001              | 0,019                 |                       | -0,022                | 0,017                 |
| 300      | -0,002              | -0,001              | -0,006              | -0,001              | -0,007              | -0,006              | 0,014                 |                       | -0,030                | 0,006                 |
| 500      | -0,004              | -0,004              | 0,002               | 0,005               | 0,003               | 0,003               | 0,018                 |                       | -0,009                | 0,031                 |
| 800      | -0,002              | -0,001              | 0,010               | 0,010               | 0,006               | 0,012               | 0,045                 |                       | 0,005                 | 0,046                 |
| 1000     | 0,002               | 0,004               | 0,015               | 0,016               | 0,011               | 0,008               | 0,071                 |                       | 0,021                 | 0,055                 |
| 1200     | -0,002              | -0,001              | 0,012               | 0,017               | 0,019               | 0,020               | 0,077                 |                       | 0,033                 | 0,074                 |
| 1400     | 0,002               | 0,004               | 0,017               | 0,019               | 0,022               | 0,024               | 0,073                 |                       | 0,029                 | 0,068                 |
| 1600     | 0,000               | 0,005               | 0,020               | 0,024               | 0,027               | 0,030               | 0,090                 |                       | 0,047                 | 0,088                 |
| 1800     | 0,007               | 0,008               | 0,026               | 0,032               | 0,030               | 0,034               | 0,092                 |                       | 0,058                 | 0,100                 |
| 2000     | 0,006               | 0,013               | 0,026               | 0,028               | 0,039               | 0,041               | 0,105                 |                       | 0,078                 | 0,112                 |

Annexe C 14 : Amélioration par fusion exprimée en kappa après transformation probabiliste DSMP.