

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

**APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE DE DONNÉES
MULTIPARAMÉTRIQUES AU GISEMENT DE SULFURES
MASSIFS VOLCANOGÈNES BRACEMAC-MCLEOD, DISTRICT
MINIER DE MATAGAMI, QUÉBEC**

Par
Nathalie Schnitzler

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès science (M. Sc.)
en sciences de la terre

Jury d'évaluation

Président du jury et examinateur interne	Bernard Giroux INRS centre Eau-Terre-Environnement
Examineur externe	Paul Bédard Université du Québec à Chicoutimi
Directeur de recherche	Pierre-Simon Ross INRS centre Eau-Terre-Environnement
Codirecteur de recherche	Erwan Gloaguen INRS centre Eau-Terre-Environnement

AVANT PROPOS

Le présent rapport a été rédigé dans le cadre du programme de maîtrise en sciences de la terre à l'Institut national de la recherche scientifique (INRS).

Il présente la problématique abordée portant sur l'analyse de l'altération hydrothermale, effectuée sur le gisement de Bracemac-McLeod, dans le camp minier de Matagami dans la région de l'Abitibi, Québec, Canada. Il expose également les méthodes utilisées et les résultats auxquels elles ont abouti.

Ce travail a été effectué pendant trois ans sous la tutelle de Pierre-Simon Ross (Géologie) et Erwan Gloaguen (Analyse statistique). Deux étés de terrain de 2 mois chacun ont permis de récolter les données avec le Laboratoire mobile de caractérisation physique, minéralogique et chimique des roches (LAMROC). Il a été réalisé, en plus de la description de carottes de forage de 9 forages, le traitement et l'analyse de l'ensemble des données multiparamétriques obtenues.

REMERCIEMENTS

Avant de présenter les résultats de mes travaux, je tenais à remercier les personnes étant intervenues directement ou non dans la réalisation de ce rapport, et tout particulièrement :

- Pierre-Simon Ross, mon directeur de recherche, qui m'a permis de réaliser cette maîtrise au sein de l'INRS. Merci à lui pour sa disponibilité, sa patience et son soutien tout au long de ce projet;
- Mon codirecteur Erwan Gloaguen. Merci pour son soutien et son temps. Mais surtout merci de m'avoir montré la puissance des statistiques;
- Alexandre Bourke, sans qui les étés à Matagami auraient été bien différents. Un grand merci à lui pour son soutien sans faille, sa complicité, sa bonne humeur, son aide précieuse et les soirées jeux;
- Le FRQNT pour son soutien financier;
- Glencore Exploration pour son soutien matériel et l'accès aux infrastructures. Merci à toute l'équipe, en particulier les deux Roberts, Val, Lindsay, Alexis, Max et François pour leur disponibilité et dynamisme;
- Catherine Frigon et Andréa Allard pour leur assistance lors de l'acquisition des mesures avec le LAMROC;
- Ma famille, au-delà de l'Atlantique, mais pourtant très présente. Merci à elle pour son soutien constant. Merci en particulier à mon frère Jean-Yves, qui s'est beaucoup intéressé à mon travail. Merci pour ses conseils en statistique et ses cours de langage informatique;
- Jordi, pour son soutien. Merci de m'avoir transmis la motivation nécessaire à l'achèvement de ce travail. Merci de t'être occupé de moi;
- Merci à Mikael, mon plus grand fan. Toujours curieux de l'avancée de ma maîtrise. Merci pour ta bonne humeur et ton dynamisme;
- Les amis qui ont suivi de près ou de loin l'avancée de ce travail. Merci à eux pour leur soutien : Aurélie, Cha', Marion et Marc, Julie et Antoine, Max, Steph et Max, Adina et Vincent, Arnaud, Vivien, Lorelei et les amis de Val d'Or, Noémie.

Merci à tous.

RÉSUMÉ

En exploration minière, le forage au diamant représente la majorité des dépenses des projets avancés. L'utilisation des carottes de forage est cependant souvent limitée à la description visuelle du géologue et aux analyses en métaux des zones minéralisées ou potentiellement minéralisées. L'acquisition non destructive et l'intégration de mesures de propriétés physiques, chimiques et minéralogiques à haute résolution spatiale, notamment dans les parties non échantillonnées, permettraient de mieux connaître les gisements, les roches et l'altération qui les entourent.

Dans ce contexte, le Laboratoire mobile de caractérisation physique, minéralogique et chimique des roches (LAMROC) de l'INRS a été conçu pour valoriser les carottes de forage. Le LAMROC permet de mesurer la densité, la susceptibilité magnétique, la géochimie et la minéralogie, en plus de pouvoir prendre une image de la carotte. La quantité importante de mesures colocalisées générées par le LAMROC ouvre la voie à l'intégration quantitative et la prédiction de vecteurs d'exploration, c'est-à-dire définir les caractéristiques spécifiques au type de gisement cherché pour créer des vecteurs qui pointent vers la minéralisation.

L'étude est réalisée dans la région de Matagami, un camp minier situé dans le nord de la Sous-province de l'Abitibi et riche en gisements de sulfures massifs volcanogènes (SMV). Neuf forages d'exploration, pour un total d'environ 6000 m, ont été analysés autour du gisement McLeod. L'objectif est d'estimer le sodium, un élément chimique important pour l'étude de l'altération hydrothermale et le développement de vecteurs d'exploration en contexte de SMV, mais manquant dans les analyses du LAMROC en raison de limitations technologiques.

L'approche proposée dans cette maîtrise est basée sur une branche de l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique (*Machine learning*). Un des principaux enjeux de l'apprentissage automatique consiste à élaborer des systèmes de classification performants à partir d'un ensemble d'exemples représentatifs d'une population de données. La méthode sélectionnée ici est celle de la « forêt aléatoire » (*Random forest*). L'utilisation de cet algorithme sur l'ensemble du secteur ou une partie restreinte montre son efficacité pour l'estimation du sodium. L'estimation de cet élément par algorithme révèle de bons résultats tant sur la précision de la prédiction que sur le choix des variables (paramètres multivariés). Des tests d'estimations faits à partir des données géochimiques de Glencore montrent que le magnésium est l'élément le plus influent pour estimer le sodium. Ceci s'explique par le processus de chloritisation des rhyolites qui apporte un gain en magnésium et une perte de sodium. Cependant, lorsque

l'estimation est faite à partir des données provenant du LAMROC, le magnésium est un élément moins influent. Ceci est possiblement dû à l'abondance de mesures sous la limite de détection du XRF portatif pour le magnésium. C'est plutôt le strontium qui devient l'élément le plus influent dans l'estimation du sodium, car il est contenu dans les plagioclases et donc susceptible d'être mobilisé pendant l'altération. Les propriétés physiques apportées par le LAMROC sont également un ajout important, puisque la densité est le deuxième élément le plus influent dans l'estimation. La contribution potentielle de la minéralogie a été peu approfondie, mais étant donné qu'une corrélation existe entre la perte de sodium et la variation des micas blancs et des chlorites, les variables minéralogiques mériteraient d'être utilisées. Les résultats d'estimation sont présentés par forage en fonction de leur profondeur, permettant une analyse spatiale des variations de l'altération hydrothermale.

Finalement, des outils technologiques facilitant l'interprétation des données ont été développés permettant de prédire les éléments utilisés dans l'étude de variation de l'altération hydrothermale liée à la mise en place des gisements de SMV tout en garantissant une bonne résolution spatiale grâce aux nombreuses données récoltées avec le LAMROC.

ABSTRACT

In mineral exploration, diamond drilling accounts for the majority of expenditures on advanced projects. However, the use of drill cores is often limited to the geologist's visual description and metal analyzes of mineralized or potentially mineralized zones. Non-destructive acquisition and integration of physical, chemical and mineralogical properties measured at high spatial resolution, particularly in non-sampled areas, would allow better knowledge of the deposits, rocks and alteration that surround them.

In this context, the Mobile Laboratory for the Physical, Mineralogical and Chemical Characterization of Rocks (LAMROC) of the INRS has been designed to maximize the information from drill cores. The LAMROC is used to measure density, magnetic susceptibility, geochemistry and mineralogy and performs core imagery. The large number of colocalized measurements generated by LAMROC opens the way to quantitative integration and prediction of exploration vectors, i.e. to define the specific characteristics to the type of deposit sought, to create vectors that point to mineralization.

This study is carried out in the Matagami region, a mining camp in the northern Abitibi Subprovince, rich in volcanogenic massive sulphide (VMS) deposits. Nine exploration drill holes, totaling approximately 6,000 m, were analyzed around the McLeod deposit. The principal objective is to estimate sodium, an important chemical element for the study of hydrothermal alteration and the development of vectors in a VMS context, but missing in the LAMROC analyzes due to technological limitations.

The approach proposed is based on a branch of artificial intelligence, machine learning. One of the main challenges of automatic learning is to develop efficient classification systems based on a set of representative examples of a population of data. The method selected here is the random forest. The use of this algorithm over the whole sector or a restricted part shows its effectiveness for the estimation of sodium. Its estimation based on a regression algorithm show good results both on the precision of the prediction and on the choice of the variables (multivariate parameters). Tests based on Glencore's geochemical data show that magnesium is the most influential element for estimating sodium. This is explained by the process of chloritization of rhyolites which brings a gain in magnesium and a loss of sodium. However, when the estimate is made from LAMROC's data, magnesium is a less influential element. This is possibly due to the proportion of magnesium measurements below the detection limit of the portable XRF. Instead, strontium becomes the most influential element in the estimation of the

sodium, because it is contained in plagioclase and thus mobilized during alteration. The physical properties provided by LAMROC are also an important addition, since density is the second most influential variable in Na estimation. The contribution of mineralogy was not extensively studied; however, a correlation exists between the loss of sodium and the variation of white micas and chlorites, so these variables deserve to be used. The estimation results are plotted by drill hole as a function of depth, allowing a spatial analysis of the variations of hydrothermal alteration.

Finally, tools facilitating the interpretation of the data acquired with the LAMROC have been developed, and it is possible to predict the elements used in the study of hydrothermal alteration variation related to the emplacement of VMS deposits while guaranteeing a good spatial resolution.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT PROPOS	II
REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES TABLEAUX	XVI
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Contexte de l'étude.....	1
1.2 Problématique	2
1.3 Objectifs	2
1.4 Méthodologie générale et travaux antérieurs	4
1.4.1 <i>Acquisition de données et premiers traitements statistiques</i>	4
1.4.2 <i>Apprentissage automatique supervisé</i>	6
1.5 Organisation du mémoire.....	7
CHAPITRE 2 : CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET MÉTALLOGÉNIQUE	9
2.1 Géologie régionale.....	9
2.1.1 <i>Province du Supérieur</i>	9
2.1.2 <i>Sous-province de l'Abitibi</i>	12
2.1.3 <i>Région de Matagami</i>	13
2.2 Métallogénie	15
2.2.1 <i>Sulfures massifs volcanogènes - SMV</i>	15
2.2.2 <i>Altération hydrothermale</i>	17

2.2.3	<i>Classification des SMV</i>	20
2.3	Le gisement de Bracemac-McLeod	21
2.3.1	<i>Séquence lithologique</i>	21
2.3.2	<i>Minéralisation et altération hydrothermale</i>	24
CHAPITRE 3 : LE LABORATOIRE DE CARACTÉRISATION PHYSIQUE, MINÉRALOGIQUE ET CHIMIQUE DES ROCHES		27
3.1	Le LAMROC	27
3.1.1	<i>Acquisition et correction des données multiparamétriques</i>	27
3.1.2	<i>Préparation de la carotte et choix des points de mesure</i>	32
3.2	Choix des forages.....	34
3.3	Données du LAMROC	36
3.4	Traitement des données corrigées en préparation aux analyses statistiques.....	41
3.4.1	<i>Prétraitement des données du LAMROC</i>	41
3.4.2	<i>Présentation des données pour analyse statistique multivariée</i>	41
3.4.3	<i>Transformation en log-ratio centré</i>	42
3.4.4	<i>Traitement des limites de détection</i>	44
CHAPITRE 4 : APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE APPLIQUÉ À L'EXPLORATION MINIÈRE		45
4.1	Méthodes non supervisées	45
4.2	Méthodes supervisées	46
4.2.1	<i>Réseaux de neurones</i>	46
4.2.2	<i>Machine à vecteurs de support</i>	47
4.2.3	<i>Méthode d'ensemble, la forêt aléatoire ou Random Forest</i>	48
CHAPITRE 5 : RÉSULTATS		51
5.1	Estimation de la concentration en sodium.....	51

5.1.1	<i>Étape 1 : test de l'apprentissage automatique pour l'estimation du sodium avec les données géochimiques de Glencore de 314 forages</i>	51
5.1.2	<i>Test de l'apprentissage automatique pour l'estimation du sodium avec les données géochimiques de Glencore puis du LAMROC, de neufs forages choisis</i>	56
5.1.3	<i>Étape 5 : résultats de l'apprentissage automatique pour l'estimation du sodium avec les données du LAMROC</i>	65
5.2	Vecteur d'exploration - Interprétation des variations de la concentration estimée en sodium	69
5.2.1	<i>Variation de la concentration en sodium en forage</i>	69
5.2.2	<i>Variation de la concentration en sodium latéralement</i>	73
5.3	Calculs d'indices d'altération.....	75
CHAPITRE 6 : DISCUSSION		79
6.1	Données du LAMROC	79
6.2	Choix de l'algorithme	80
6.3	Choix des variables	80
6.4	Estimation de la concentration en sodium.....	81
6.5	Vecteurs d'altération	82
6.5.1	<i>Variation de la concentration en sodium</i>	82
6.5.2	<i>Corrélation entre chimie et minéralogie infrarouge</i>	83
6.6	Indices d'altération.....	83
6.7	L'apprentissage automatique en exploration minière	84
CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS		85
TRAVAUX FUTURS		86
RÉFÉRENCES		87

Sur le CD :

ANNEXE 1 : Section NO-SE pentée vers le NE (soit perpendiculairement aux couches volcaniques), montrant la répartition des forages étudiés au LAMROC (bleu) et les forages dont seule la minéralogie a été analysée (en noir).

ANNEXE 2 : Profils des propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et variations du sodium, en fonction de la profondeur pour chacun des neuf forages analysés au LAMROC.

ANNEXE 3 : Fichiers Excel des données du LAMROC, pour chacun des neuf forages analysés au LAMROC.

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schéma des processus d'acquisition de données jusqu'à l'interprétation des mesures multiparamétriques.....	3
Figure 2.1 : Contexte géologique du district minier de Matagami.....	10
Figure 2.2 : Carte géologique de la Province du Supérieur.....	11
Figure 2.3 : Géologie simplifiée de la région de Matagami.	13
Figure 2.4 : Schéma d'un dépôt classique de SMV au niveau d'une ride médio-océanique, présentant le halo d'altération associé.	16
Figure 2.5 : Schéma de la morphologie et de la zonation de l'altération de dépôts de SMV.	17
Figure 2.6 : Représentation de deux types d'altération hydrothermale locale sous des lentilles de SMV.....	19
Figure 2.7 : Carte géologique du secteur Bracemac-McLeod.	21
Figure 2.8 : Section verticale passant par le gisement McLeod	22
Figure 3.1 : a. Vue extérieure du LAMROC ; b. Vue intérieure du LAMROC.	29
Figure 3.2 : Carte géologique du secteur de Bracemac-McLeod, montrant la position des forages étudiés au LAMROC (bleu), les forages dont seule la minéralogie a été analysée (en noir).	34
Figure 3.3 : Section NO-SE, pentée vers le NE (soit perpendiculairement aux couches volcaniques), montrant la répartition des forages étudiés au LAMROC (bleu) et les forages dont seule la minéralogie a été analysée (en noir).	35
Figure 3.4 : De gauche à droite : description lithologique par le géologue (nouveau log effectué dans le cadre de cette étude), profils des propriétés physiques et ratios en fonction de la profondeur pour le forage MCL-12-09.....	37
Figure 3.5 : De gauche à droite : description lithologique par le géologue (nouveau log effectué dans le cadre de cette étude), profils des oxydes majeurs corrigés en fonction de la profondeur pour le forage MCL-12-09.....	38

Figure 3.6 : De gauche à droite : description lithologique par le géologue (nouveau log effectué dans le cadre de cette étude), profils des éléments traces corrigés en fonction de la profondeur pour le forage MCL-12-09.....	39
Figure 3.7 : De gauche à droite : description lithologique par le géologue (nouveau log effectué dans le cadre de cette étude), groupes minéralogiques détectés (« A.M.D. » = aucun minéral détecté), caractéristiques spectrales analysées, en fonction de la profondeur pour le forage MCL-12-09.....	40
Figure 3.8 : Illustration de la transformation en log ratio centré avec le graphique Fe_2O_3 fonction de MgO et Na_2O (en couleur).....	43
Figure 4.1 : Représentation du résultat du calcul d'un neurone.	47
Figure 4.2 : Schéma représentant le fonctionnement du RF, basé sur le « <i>bagging</i> ».	49
Figure 4.3 : Comparaison de l'estimation du sodium avec la méthode RF (Na_2O en LRC), avec un nombre d'arbres différent (10, 100, 1000 et 5000), en fonction du sodium réellement mesuré.....	50
Figure 5.1 : Carte géologique du secteur de Bracemac-McLeod, montrant la répartition des collets des forages de surface réalisés par Glencore (2004-2014) et dont la géochimie est utilisée pour analyse statistique.	53
Figure 5.2 : Étape 1. Comparaison de l'estimation du sodium avec la méthode RF en fonction du sodium réellement mesuré.....	54
Figure 5.3 : Étape 1. Importance des variables pour l'estimation du sodium avec les données géochimiques de Glencore, dans le cas des 314 forages.	55
Figure 5.4 : Étape 2 A. Comparaison de l'estimation du sodium avec la méthode RF en fonction du sodium réellement mesuré.....	57
Figure 5.5 : Étape 2 A. Importance des variables pour l'estimation du sodium avec les données géochimiques de Glencore, pour les neuf forages sélectionnés.....	57
Figure 5.6 : Étape 2 B. Comparaison de l'estimation du sodium avec la méthode RF en fonction du sodium réellement mesuré.....	58
Figure 5.7 : Étape 2 B. Importance des variables pour l'estimation du sodium avec les données géochimiques de Glencore, pour les neuf forages sélectionnés.....	58

Figure 5.8 : Étape 3. Comparaison de l'estimation du sodium avec la méthode RF en fonction du sodium réellement mesuré, pour 3 ensembles aléatoires différents (A, B et C).....	59
Figure 5.9 : Étape 3. Importance des variables pour l'estimation du sodium avec les données géochimiques de Glencore, pour les neuf forages sélectionnés, pour trois ensembles aléatoires différents (A, B et C).....	60
Figure 5.10 : Étape 4. Comparaison de l'estimation du sodium avec la méthode RF en fonction du sodium réellement mesuré, pour 3 ensembles aléatoires différents (A, B et C).....	63
Figure 5.11 : Étape 4. Importance des variables pour l'estimation du sodium avec les données géochimiques du LAMROC, pour les neuf forages sélectionnés, pour trois ensembles aléatoires différents (A, B et C).....	64
Figure 5.12 : En bleu, estimation du sodium (Na ₂ O, %) avec les données du LAMROC, en rouge données géochimiques de Glencore, en fonction de la profondeur des forages MCL-12-09, MCL-13-29 et MC-04-11.....	66
Figure 5.13 : En bleu, estimation du sodium (Na ₂ O, %) avec les données du LAMROC, en rouge données géochimiques de Glencore, en fonction de la profondeur des forages MC-08-67, MC-05-19/19A et MC-05-15.....	67
Figure 5.14 : En bleu, estimation du sodium (Na ₂ O, %) avec les données du LAMROC, en rouge données géochimiques de Glencore, en fonction de la profondeur des forages MC-05-14, MC-04-06 et MC-09-76.....	68
Figure 5.15 : Carte géologique du secteur de Bracemac-McLeod, montrant la position des forages étudiés au LAMROC (bleu), les forages dont seule la minéralogie a été analysée (noir).....	69
Figure 5.16 : Section verticale passant en bordure de la lentille McLeod, montrant la séquence géologique du secteur et en bleu les forages MC-04-11 et MC-08-67.....	71
Figure 5.17 : Mise en relation des variations de sodium avec la minéralogie obtenue avec le LAMROC pour le forage MCL-12-09.....	72
Figure 5.18 : Longitudinale du secteur McLeod, localisant les forages analysés au LAMROC (en bleu) et ceux sélectionnés pour analyse minéralogique (en noir) par rapport à la lentille McLeod et son extension McLeod Deep	73
Figure 5.19 : Comparaison latérale des variations des micas blancs et de la concentration en Na pour les forages MCL-12-09, MC-04-11 et MC-05-19/19A.....	75

Figure 5.20 : Diagramme CCPI en fonction de AI avec les données géochimiques de Glencore pour les neuf forages sélectionnés..... 76

Figure 5.21 : Diagramme CCPI en fonction de AI avec les données du LAMROC pour les neuf forages sélectionnés..... 77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Codes lithologiques utilisés par Glencore pour l'ensemble des 9 forages choisis pour le projet et couleurs associées.....	36
Tableau 3.2 : Codes numériques appliqués aux données "texte" pour une application en statistique multivariée.	42
Tableau 5.1 : Tableau de synthèse des étapes de test et validation effectués pour estimer le sodium.....	52

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1 Contexte de l'étude

En exploration minière et en particulier dans le cas des gisements de sulfures massifs volcanogènes (SMV), de nombreux outils d'exploration existent déjà, tel que la géophysique de surface, la géophysique aéroportée, le forage d'exploration (incluant entre autres la description géologique des carottes de forage, l'analyse chimique des métaux dans les intervalles minéralisés, la géochimie traditionnelle sur roche totale (« lithogéochimie ») aux 30-50 m, la prise de la susceptibilité magnétique aux 1,5 m), ainsi que les diagraphies ou autres mesures dans les trous de forage. Ces outils ont fait leurs preuves étant donné le nombre de gisements découverts grâce à ces techniques. Par rapport aux carottes de forage, les analyses lithogéochimiques sont parmi les données les plus utilisées de l'exploration à l'exploitation, car elles permettent de vérifier les assignations lithologiques, de mesurer l'altération hydrothermale et de chercher une possible corrélation entre un ou plusieurs éléments chimiques et la minéralisation.

Les forages au diamant représentent la majorité des dépenses de l'exploration minière. Leur utilisation est cependant limitée, en particulier le nombre d'analyses géochimiques, en raison de leurs coûts ou de leur nature destructive. L'acquisition non destructive et l'intégration de mesures de propriétés physiques, chimiques et minéralogiques à haute résolution spatiale sur les carottes de forage permettraient de mieux connaître le gisement et les roches qui l'entourent. C'est dans l'optique de valoriser les carottes de forage que le Laboratoire mobile de caractérisation physique, minéralogique et chimique des roches (LAMROC) de l'INRS a été conçu. Le LAMROC permet de mesurer la densité, la susceptibilité magnétique, la géochimie et la minéralogie, en plus de pouvoir prendre une photographie linéaire de la carotte. Le LAMROC génère une quantité importante de mesures colocalisées qui ouvrent la voie à l'intégration quantitative et la prédiction de vecteurs d'exploration.

En exploration minière, l'utilisation de vecteurs d'exploration est une méthode couramment utilisée pour découvrir de nouveaux gisements. Elle consiste à définir les caractéristiques spécifiques au type de gisement cherché et à les utiliser pour créer des vecteurs qui pointent vers la minéralisation. Par exemple, les variations de l'altération hydrothermale peuvent représenter un vecteur d'exploration efficace pour la recherche de SMV (Barrett et MacLean, 1994; Shanks et Thurston, 2012).

1.2 Problématique

Des vecteurs d'exploration peuvent être définis suite aux descriptions visuelles faites par les géologues, ainsi qu'aux analyses lithogéochimiques. Cependant, les descriptions des lithologies, des altérations et de leurs intensités sont parfois variables d'un géologue à l'autre en raison de la subjectivité des observations visuelles. Cela est d'autant plus vrai que la géologie d'un secteur est peu connue. Un autre problème réside dans la faible résolution spatiale de l'échantillonnage lithogéochimique, qui n'est pas toujours systématique, du fait de son coût, du caractère destructif, et de l'attente des résultats pouvant aller jusqu'à quelques mois.

La grande quantité de données et la diversité des paramètres (plusieurs milliers de points de mesure par forage avec plus de 20 variables) engendrés par le LAMROC augmentent la résolution spatiale et la quantité d'information quantitative, ce qui, par la suite, permet de mieux comprendre la géologie autour d'un gisement ou le gisement lui-même. Par contre, cette abondance de données demande des approches nouvelles d'assimilation quantitative des données pour faciliter les processus d'interprétation des mesures multiparamétriques de façon simultanée et non subjective (Fig. 1.1). En outre, certains paramètres chimiques qui sont intéressants dans le type de contexte étudié sont absents dans la plupart des jeux de données multiparamétriques, comme le sodium par exemple. Il serait donc intéressant de vérifier si on peut estimer ces paramètres manquants à partir des autres paramètres mesurés par le LAMROC.

1.3 Objectifs

Ce projet de maîtrise a été réalisé au gisement McLeod, dans le camp minier de Matagami, Québec, Canada. Cette région est réputée pour ses gisements de SMV. Deux étés de terrain de deux mois chacun ont permis d'analyser neuf forages d'exploration avec le LAMROC pour un total d'environ 6000 mètres, répartis sur et autour du gisement. Le but principal du projet était d'investiguer de nouvelles méthodes d'interprétation avec les données recueillies par le LAMROC sur un gisement connu, pour pouvoir ensuite les utiliser en exploration à Matagami ou dans d'autres districts miniers.

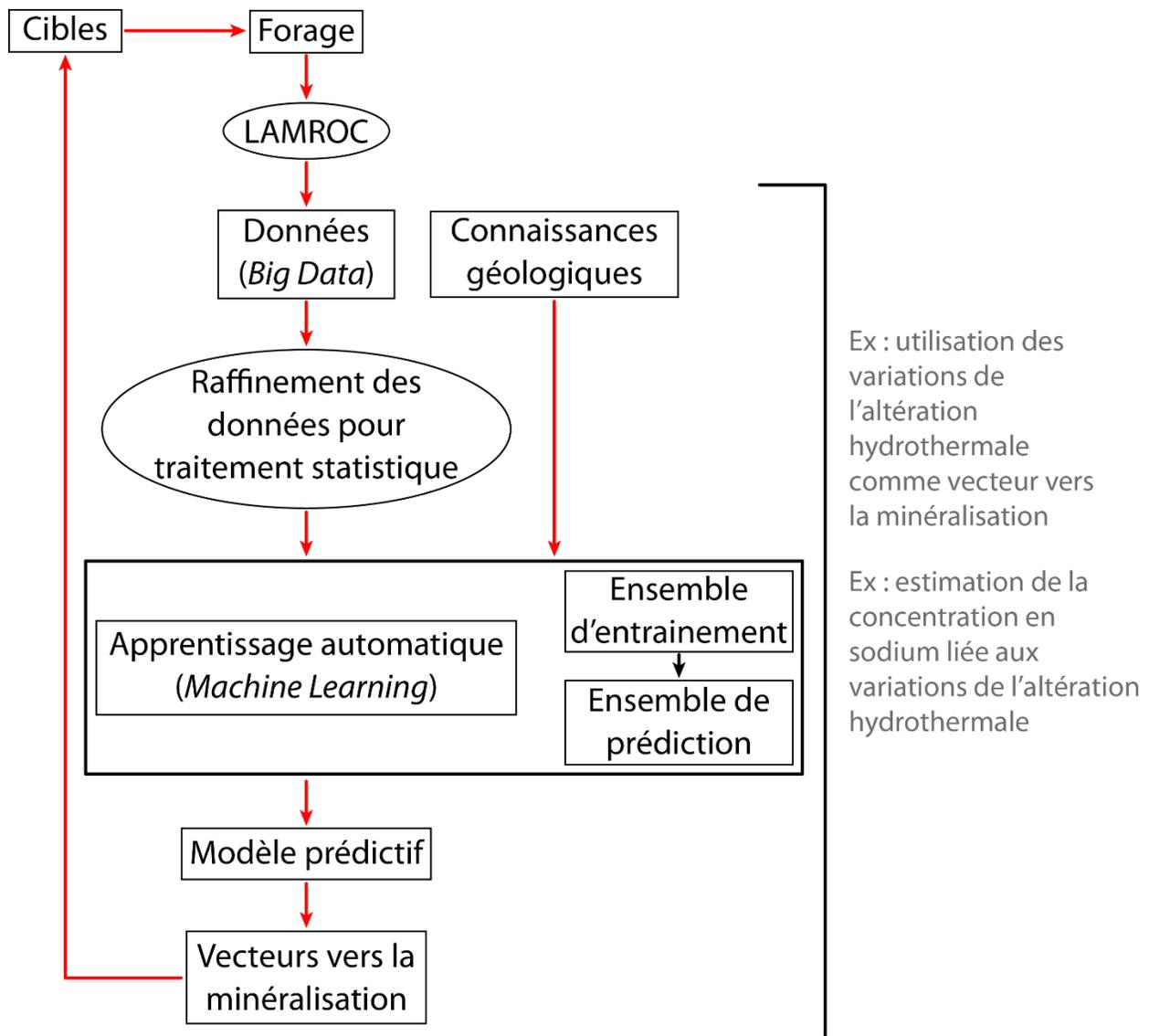


Figure 1.1 : Schéma des processus d'acquisition de données jusqu'à l'interprétation des mesures multiparamétriques.

Compte tenu du grand nombre d'applications possibles des données du LAMROC et du grand nombre de paramètres mesurés, deux objectifs spécifiques ont été définis : (1) estimer le sodium, un élément chimique utile pour l'étude de l'altération hydrothermale ; (2) utiliser les résultats pour élaborer des vecteurs d'exploration. Une approche de l'apprentissage automatique a été adaptée au projet et est décrite dans la partie méthodologie générale (section 1.4), qui fait suite aux objectifs.

Autour des gisements de SMV, les anomalies en concentrations de certains éléments peuvent servir à déduire l'altération que les roches ont subies, mais aussi à calculer des indices d'altération comme celui d'Ishikawa (AI) et chlorite-carbonate-pyrite (CCPI) (Ishikawa et al.,

1976; Large et al., 2001). Les analyseurs à fluorescence des rayons X (FRX) utilisés dans le LAMROC ne donnent pas une analyse géochimique complète qui permettrait de calculer ces indices, notamment la concentration en sodium qui intervient directement dans leur calcul. Pour élaborer des vecteurs d'exploration via l'étude de l'altération hydrothermale, il est donc nécessaire de prédire la concentration en sodium à partir des paramètres mesurés avec le LAMROC.

1.4 Méthodologie générale et travaux antérieurs

La méthodologie détaillée du projet est présentée aux chapitres 3 et 4; la présente section donne simplement un bref aperçu, tout en évoquant les travaux antérieurs avec le LAMROC à Matagami.

1.4.1 Acquisition de données et premiers traitements statistiques

Le LAMROC acquiert des données multiparamétriques sur les carottes de forage d'exploration de façon non destructive, quasi simultanément et directement sur leurs sites d'entreposage. Le laboratoire mesure, avec une résolution spatiale de quelques millimètres si désiré, la densité par atténuation des rayons gamma, la minéralogie par spectrométrie infrarouge, la géochimie par fluorescence des rayons X (FRX) et la susceptibilité magnétique.

L'ensemble des données mesurées est ensuite corrigé, traité et compilé sous forme de profils. On obtient ainsi l'évolution des paramètres en fonction de la profondeur, pour chaque forage.

Travaux antérieurs avec le LAMROC

De 2010 à 2014, quatre campagnes d'acquisition de données (à Matagami et Chibougamau) ont été réalisées avec le LAMROC, soit plus de 15 000 mètres de carottes de forage analysées. Le LAMROC a pu être développé et perfectionné afin d'optimiser l'acquisition et le traitement des données.

Une première approche avec les statistiques linéaires multivariées a été réalisée pour interpréter la grande quantité de données (campagnes de 2010-2011 à Matagami) par Fresia (2013), pour son projet de maîtrise (voir aussi Fresia et al., 2017). Son travail a essentiellement

porté sur le partitionnement des données avec des algorithmes de classification non supervisée (ces algorithmes ne prennent pas en compte les variables recherchées et déjà mesurées). Plus spécifiquement, il a fait une analyse de partitionnement de données (*cluster analysis*) afin de grouper les points de données par classes (pseudo-lithologies) en fonction de leur signature physique et géochimique. Il a obtenu des pseudo-logs des lithologies primaires pour chacun des forages analysés. Bien que pertinente et ayant donné de bons résultats (Fresia, 2013), la prédiction des lithologies n'est pas parfaite, vraisemblablement à cause de la relation non linéaire entre les différents paramètres mesurés, l'absence de lissage des données et le manque de prise en compte de la profondeur des mesures le long des carottes. Fresia (2013) a également initié une étude de la zonation de l'altération hydrothermale le long des forages en travaillant avec l'analyse en composantes principales (ACP). L'ACP permet de regrouper de manière linéaire les altérations en types selon le ou les élément(s) chimique(s) principalement affecté(s), mais ne tient pas compte de l'intensité de l'altération.

Campagne de 2014-2015 à Matagami

Tel qu'évoqué ci-dessus et expliqué en détail au chapitre 3, neuf forages d'exploration ont été complètement caractérisés avec le LAMROC lors de la campagne de 2014 et 2015, pour un total d'environ 6000 mètres de carottes analysées, dans le secteur McLeod, depuis le gisement jusqu'à 1,5 km vers l'ESE. C'est sur ce jeu de données que porte le présent travail de maîtrise.

De plus, durant la même campagne, des mesures aux 10 m avec le spectromètre infrarouge (mais pas les autres paramètres) ont été effectuées sur 22 autres forages choisis dans un rayon de 500 m autour du gisement McLeod pour accroître la densité d'information minéralogique. Ce sous-projet se focalise sur la composition des micas blancs et des chlorites qui est mesurée par la position des pics d'absorption associés à Al, Fe et Mg. Dans le cas des SMV, l'appauvrissement ou l'enrichissement en aluminium des micas blancs peut servir d'indicateur de proximité au gisement. Il en va de même pour la variation du fer et du magnésium dans les chlorites. En compilant ces caractéristiques, on obtient l'évolution de la composition des micas blancs et des chlorites sous forme de profils selon la profondeur, pour chaque forage analysé. Ce jeu de données ne sera pas exploité dans ce mémoire puisque d'autres chercheurs travaillent dessus (Ross et Bourke, en prép.).

1.4.2 Apprentissage automatique supervisé

Depuis peu, l'exploration minière s'intéresse à des méthodes qui permettent d'analyser un grand nombre de données simultanément afin de prédire de nouvelles cibles d'exploration. Par exemple, la compagnie Integra Gold Corp a lancé en 2015 un des plus grands concours internationaux de *crowdsourcing* de l'industrie minière : *Integra Gold Rush*. A suivi en 2017 le concours *Disrupt Mining*, organisé par Goldcorp et Integra Gold Corp, et visant à développer et recenser toutes les idées innovatrices pour le développement de l'industrie minière. Des méthodes d'intelligence artificielle ont été utilisées par certains participants de ces concours, mais restent généralement peu connues dans le domaine minier. Pourtant elles ont fait leur preuve dans de nombreux domaines appliqués (systèmes de diagnostic dans les hôpitaux, gestion des réseaux électriques, moteurs de recherche, traitement d'image, ...). Une branche de l'intelligence artificielle particulièrement intéressante pour le secteur minier est l'apprentissage automatique supervisé (*supervised machine learning*) (Heutte et al., 2008).

Un des principaux enjeux de l'apprentissage automatique consiste à élaborer des systèmes de classification performants à partir d'un ensemble d'exemples représentatifs d'une population de données. Ceci peut permettre d'estimer des variables non mesurées directement, par exemple le sodium.

Plusieurs méthodes potentiellement applicables par rapport à cet objectif ont déjà montré leur efficacité et en particulier sur des cas, dans la littérature, qui semblent similaires à ce projet de maîtrise. La méthode sélectionnée ici, qui permet l'estimation du sodium, est celle de la « forêt aléatoire » (*Random Forest* ou RF). Ce choix se justifie par la simplicité d'utilisation de la méthode (Heutte et al., 2008), et suite à son utilisation réussie lors du concours international *Integra Gold Rush*¹. La méthode des RF permet de créer des modèles simples de prédiction à partir de l'analyse statistique de nombreuses variables par arbres décisionnels (Breiman, 2001).

Les *Random Forest* font partie de la famille des algorithmes dits de « *bagging* ». Ils permettent de construire des arbres décisionnels optimaux au sens de sous-ensembles aléatoires des données (ensemble d'entraînement) utilisées pour le calibrer. L'ensemble d'entraînement consiste en une partie de la base de données pour laquelle tous les paramètres sont connus, dont celui que l'on veut estimer par la suite. L'algorithme est ensuite appliqué à un sous-ensemble test pour lequel le paramètre à estimer a été mis de côté à des fins de

¹ Ce concours visait la prédiction de cibles pour l'exploration aurifère avec un ensemble conséquent de données historiques en plus du développement d'idées innovantes pour répondre à l'objectif. L'équipe des Data Miners, dont faisait partie l'auteur de ce mémoire, a remporté la seconde place.

validation. Finalement, si ces deux étapes sont satisfaisantes, l'étape de prédiction peut être déployée.

1.5 Organisation du mémoire

Ce mémoire s'articule sur cinq chapitres, en plus de cette introduction. D'abord le chapitre 2 présente le contexte géologique et métallogénique du secteur d'étude. Les chapitres 3 et 4 développent la méthodologie appliquée pour récolter les données avec le LAMROC et la méthode statistique développée pour répondre aux objectifs principaux du projet. Les résultats obtenus sont exposés au chapitre 5. Finalement ce travail se termine par des chapitres de discussion et de conclusion (chapitres 6 et 7).

CHAPITRE 2 : CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET MÉTALLOGÉNIQUE

Le gisement de sulfures massifs volcanogènes (SMV) Bracemac-McLeod, sujet de cette étude, est situé dans le camp minier de Matagami. Ce dernier est localisé dans la Province du Supérieur, en particulier dans la partie nord de la Sous-province de l'Abitibi, au Québec. Le camp de Matagami, réputé pour ses gisements de SMV, est situé à 200 km au nord de Val d'Or (Figs. 2.1a et b). Le plus gros gisement du district, Mattagami Lake, a été découvert en 1957 (25,64 Mt, 8,2% Zn, 0,56% Cu, 20,91 g/t Ag, 0,41 g/t Au) (Jenney, 1961; Sharpe, 1968; Roberts, 1975). Dix gisements ont été minés depuis, dont le gisement de Bracemac-McLeod, actuellement en cours d'exploitation par Glencore.

Ce chapitre présente le contexte géologique et métallogénique du secteur d'étude, en commençant par la géologie régionale, puis un résumé des caractéristiques générales des SMV et finalement la géologie et la minéralisation à Bracemac-McLeod.

2.1 Géologie régionale

2.1.1 Province du Supérieur

La Province du Supérieur forme le cœur du Bouclier Canadien. Les plus vieilles roches de la Province du Supérieur datent d'environ 4,3 Ga (O'Neil et al., 2008). La province, composée d'un assemblage de roches archéennes, s'est formée par accréation de fragments continentaux et océaniques entre 2,72 et 2,68 Ga (Percival, 2007). Les terrains accrés forment des alignements de sous-provinces, dont la Sous-province de l'Abitibi (Fig. 2.2), qui serait un terrane océanique. Les gîtes minéraux principaux du Supérieur sont les SMV, formés surtout entre 2,74 et 2,70 Ga, les gisements magmatiques de Ni-Cu-EGP, et les gîtes d'or orogéniques (Percival, 2007).

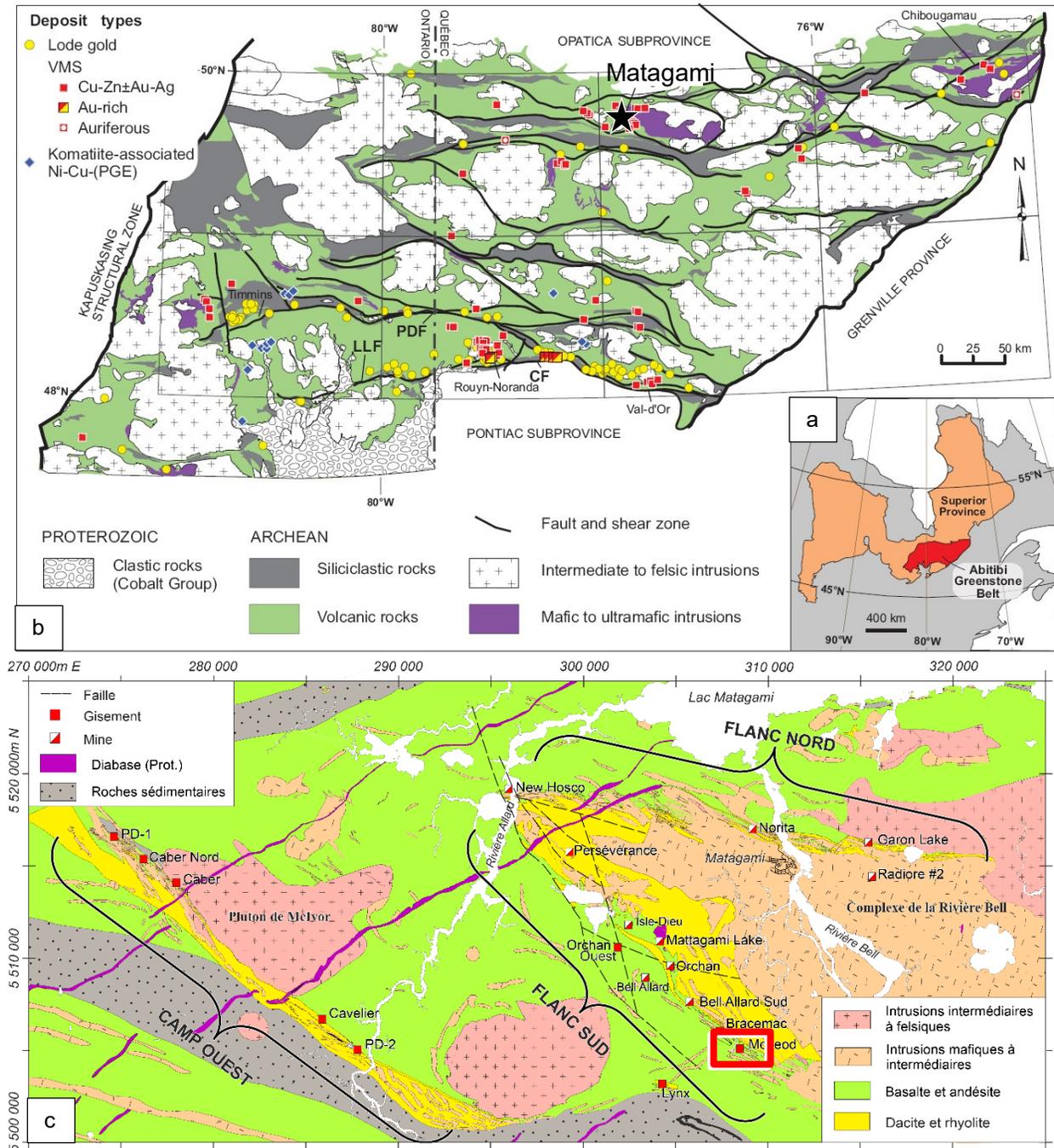


Figure 2.1 : Contexte géologique du district minier de Matagami. (a) Localisation de la Sous-province de l'Abitibi. (b) Carte simplifiée de la Sous-province de l'Abitibi, montrant la position de la ville de Matagami (en noir), d'après Mercier-Langevin et al. (2014a). (c) Carte géologique simplifiée du secteur de Matagami, d'après Roy et Allard (2006). Localisation du secteur d'étude (en rouge). Grille UTM Nad 83 Zone 18.

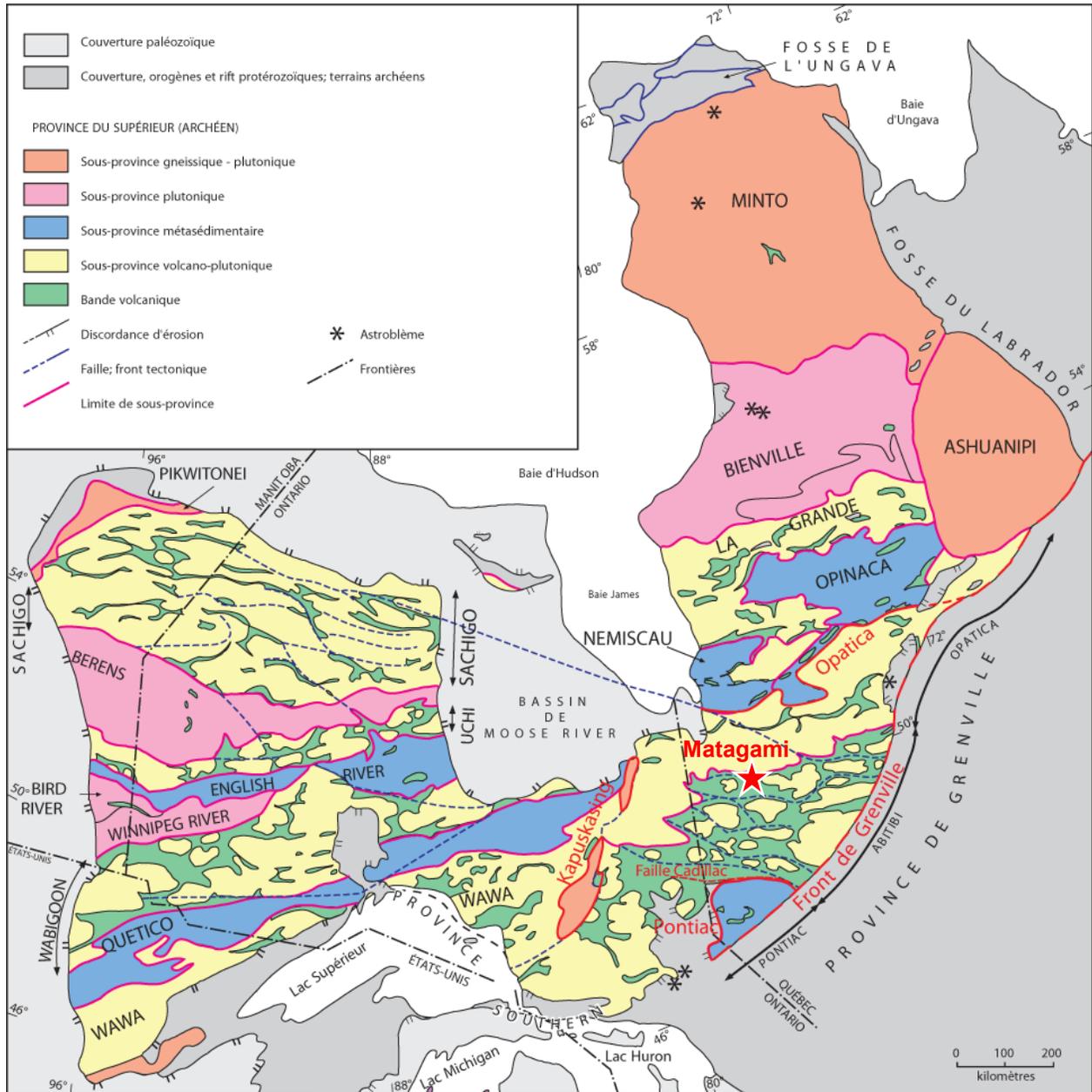


Figure 2.2 : Carte géologique de la Province du Supérieur. Modifiée d'après Card (1990), d'après la carte 2545 de l'OGS (1991) et d'après Percival et al. (1992). Figure tirée du Ministère des ressources naturelles et de la faune, bulletin d'information minière.

2.1.2 Sous-province de l'Abitibi

La Sous-province de l'Abitibi est située dans le sud de la Province du Supérieur. Elle est composée de roches métavolcaniques et métasédiments recoupés par des plutons granitiques syn-volcaniques à post-orogéniques et de nombreux couloirs de failles (Card, 1990; Thurston et Chivers, 1990). La prédominance de roches volcaniques mafiques ainsi que sa grande superficie, 700 km par 300 km (Goodwin, 1982), définissent la Sous-province de l'Abitibi comme la plus grande ceinture de roches vertes du monde (Laflèche et al., 1992). La ceinture de roches vertes de l'Abitibi est limitée à l'Est par le Front de Grenville et à l'Ouest par une zone de roche gneissique d'orientation générale NE-SW, la Zone Structurale Kapuskasing (Dimroth et al., 1982). Au Nord, la frontière est définie par la Sous-Province de l'Opatca, formée de paragneiss et d'orthogneiss (Card, 1990), tandis que le contact au Sud est souligné par la faille Cadillac qui sépare la Sous-province d'Abitibi des métasédiments de la Sous-province du Pontiac (Fig. 2.2).

De direction est-ouest, la Sous-province de l'Abitibi est marquée par deux zones de failles régionales : la zone de faille Destor-Porcupine-Manneville au Nord, allant jusqu'à Timmins et la zone Cadillac-Lader Lake au Sud, traversant la région Malartic-Val d'Or (Pilote, 1998).

Plusieurs travaux ont permis de distinguer huit assemblages volcaniques et volcano-sédimentaires en se basant sur la géochronologie, la stratigraphie et la géochimie (Mortensen, 1993; Heather et Shore, 1999; Ayer et al., 2002; Goutier et Mélançon, 2007; Thurston et al., 2008). Les assemblages Pacaud (2750-2735 Ma), Deloro, dont fait partie le secteur de Matagami (2734-2724 Ma), Stoughton-Roquemaure (2723-2720 Ma), Kidd Munro (2719-2710 Ma), Tisdale (2710-2704 Ma) et Blake River (2704-2695 Ma), sont dominés par des roches volcaniques sous-marines sub-alkalines. L'assemblage Porcupine (2690-2685 Ma) est dominé par des roches sédimentaires, tandis que celui de Timiskaming (2676-2670 Ma) comprend aussi des volcanites alcalines.

La Sous-province de l'Abitibi héberge une partie des gisements métallifères les plus riches de la Province du Supérieur, dont le dépôt géant de SMV de Kidd Creek (148 Mt @ 6,18 % Zn, 2,31 % Cu, 0,22 % Pb, et 87 ppm Ag; Huston et al., 2011). D'autres SMV sont présents à Selbaie (Faure et al., 1996; Piché et Jébrak, 2006); Normétal (Lafrance et al., 2000); Joutel (Legault et al., 2002); Coniagas (Doucet et al., 1994); Chibougamau (Lafrance et al., 2006; Carignan, 2010; Leclerc et al., 2012; Mercier-Langevin et al., 2014b); Rouyn-Noranda (Gibson et Watkinson, 1990; Gibson et Galley, 2007), dont le gisement Horne (53,7 Mt @ 6,1 g/t Au, 2,2 % Cu et 13,0 g/t Ag); dans le camp de Doyon-Bousquet-LaRonde (Mercier-Langevin et al.,

2007a, b et c); dans la région de Val-d'Or (Pilote et al., 2000); et à Matagami (Jenney, 1961; Sharpe, 1968).

2.1.3 Région de Matagami

La géologie du secteur de Matagami a entre autres été décrite par Sharpe (1968), Beaudry et Gaucher (1986), Piché (1991), Piché et al. (1993), Lavallière et al. (1994), Carr et al. (2008), Pilote et al. (2011), Debreil (2014) et Ross et al. (2014d). La région de Matagami est dominée par des roches volcaniques mafiques avec une quantité moindre de roches felsiques. Les travaux les plus récents (Pilote et al., 2011; Debreil, 2014) décrivent deux domaines : le Domaine Nord et le Domaine Sud, à la géologie et au style structural différents (Fig. 2.3).

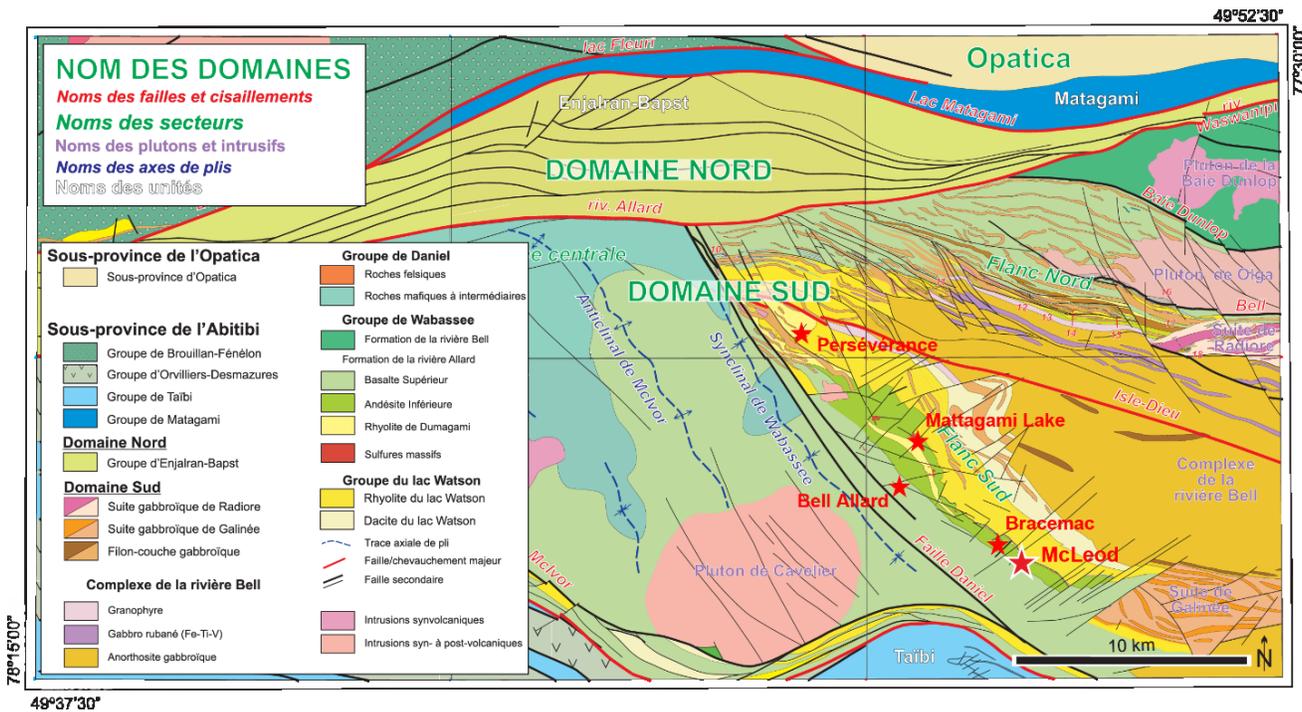


Figure 2.3 : Géologie simplifiée de la région de Matagami (Pilote et al., 2011). Certains des gisements importants du Flanc Sud sont signalés par des étoiles rouges.

Le Domaine Nord est défini par une stratigraphie et une structure orientées E-O à ENE. Il est composé de deux groupes volcaniques, Brouillan-Fénélon et Enjarlan-Bapst, et du Groupe de Matagami, formé de roches sédimentaires. Le Domaine Sud regroupe une vingtaine de gisements de SMV riches en zinc, qui sont principalement compris le long de deux bandes, nommées le Flanc Nord et le Flanc Sud. Ceux-ci sont séparés par le Complexe de la Rivière

Bell, intrusion de gabbro-anorthosite litée (Piché, 1991). Un secteur plus à l'ouest, nommé informellement le « Camp Ouest », forme une troisième bande prospective pour l'exploration (Fig. 2.1c).

a. Complexe de la Rivière Bell

Le complexe de la Rivière Bell est une intrusion de gabbro-anorthosite (Piché, 1991). Trois zones sont définies (Sharpe, 1968) : (1) une zone centrale anorthositique; (2) une zone litée, inférieure à 2000 m d'épaisseur. Le litage comprend des bandes décimétriques de gabbro anorthositique, de pyroxénite amphibolitisée et de gabbro pegmatitique riche en magnétite; (3) un granophyre en bordure, constituée de diorite ou tonalite pegmatitique riche en xénolites, allant de 300 à 1000 m d'épaisseur. Cette intrusion sépare le Flanc Sud du Flanc Nord. Ses dimensions et sa localisation sont compatibles avec l'idée qu'il pourrait s'agir de la source de chaleur à l'origine de la formation des SMV à Matagami (MacGeehan et al., 1981; MacLean, 1984; Piché et al., 1993; Maier et al., 1996; Carr et al., 2008).

b. Flanc Sud

Le Flanc Sud est faiblement déformé (Lavallière et al., 1994; Piché et al., 1993; Ross et al., 2014d). La stratigraphie volcanique est moyennement à fortement pentée vers le sud-ouest, avec un pendage qui varie selon les secteurs, de sub-horizontal dans le secteur de Persévérance, à 40° dans la partie centrale, et à 70° dans le secteur de Bracemac-McLeod. Les roches volcaniques du Flanc Sud se divisent en deux grandes unités : 1) le Groupe du Lac Watson, dominé par des roches volcaniques felsiques, surmonté du 2) Groupe de Wabasee, composé de roches volcaniques mafiques et moindrement de roches felsiques. Entre les deux se trouve la Tuffite Clé (p. ex. Genna et al., 2014), principal horizon repère dans le camp, le long duquel la grande majorité des gisements ont été trouvés (Sharpe, 1968; Davidson, 1977). La stratigraphie du Flanc Sud est détaillée dans la partie 2.3.1.

L'altération dominante sous les lentilles de sulfures massifs est une zone de forte chloritisation et séricitisation, souvent discordante, avec un lessivage de la silice, du sodium et du calcium et une quantité variable de talc (Roberts, 1966; Lavallière, 1995; Pierre et al., 2016) (voir paragraphe 2.2.2).

c. Flanc Nord

Le Flanc Nord est situé dans le « couloir de déformation du Lac Garon » (Piché, 1991). Sa stratigraphie est équivalente à celle du Flanc Sud, donc on retrouve les deux groupes principaux

du Lac Watson et de Wabasse. La zone est affectée par un système de failles régionales créé par la collision entre les sous-provinces de l'Opatica et de l'Abitibi (Beaudry et Gaucher, 1986; Piché, 1991; Pilote et al., 2011), entraînant la formation de plis et une première schistosité E-W lors d'une première phase de déformation et une schistosité SW-NE, pendant une seconde phase de déformation. Contrairement au Flanc Sud, le Flanc Nord enregistre une plus forte déformation, pénétrative et caractérisée par des roches fortement foliées et une rotation des lentilles minéralisées le long de la schistosité principale (p.ex. Norita) (Piché et al., 1993).

d. Camp Ouest

Malgré un fort potentiel économique, cette région reste peu connue d'un point de vue géologique. La stratigraphie, subverticale, avec polarité vers le NE est recoupée par de nombreuses intrusions. Masson (2000) décrit un horizon exhalatif similaire à la Tuffite Clé.

2.2 Métallogénie

2.2.1 Sulfures massifs volcanogènes - SMV

Les sulfures massifs volcanogènes (SMV) sont majoritairement exploités pour le cuivre, le zinc, le plomb, l'argent et l'or (Galley et al., 2007). Plus de 800 gisements de SMV, dont 350 au Canada, sont reconnus (Galley et al., 2007). Ces gisements se retrouvent majoritairement dans des milieux tectoniques de distension (fonds océaniques en expansion, arrières-arcs, et arcs en extension), dans des zones de rifts ou de caldeiras (Gibson et al., 1999). Ils se forment lors de la précipitation et de la sédimentation de sulfures sur le fond marin ou juste en dessous, par l'intermédiaire de fluides hydrothermaux qui précipitent et forment des lentilles (Franklin et al., 2005). La taille des SMV varie généralement de 0,2 à 150 millions de tonnes.

Les gisements de SMV classiques comprennent deux styles de minéralisation (Fig. 2.4) : (1) l'amas stratiforme ou monticule de sulfure massif est formé lors de la décharge des fluides sur le fond océanique (Galley et al., 2007). Sa formation est due à un processus de convection de fluide hydrothermal dans la croûte océanique. La convection est rendue possible par une source de chaleur produite par différents mécanismes, dont des intrusions sub-volcaniques qui peuvent contribuer à l'enrichissement en métaux (Galley et al., 2007). (2) À la base, la zone de stockwerk correspond à un système de fractures et permet l'ascension des fluides. Il peut y avoir un horizon d'exhalite correspondant au niveau minéralisé dans la stratigraphie et qui

représente une pause dans l'activité volcanique, permettant l'accumulation des sulfures. À Matagami, les exhalites sont appelées "tuffites" (p. ex. Liaghat et MacLean, 1992).

Contrairement aux gisements classiques, les SMV formés par remplacement sous le fond marin (*subseafloor replacement*) n'ont pas une forme de monticule classique, ils sont plutôt en feuillets plus ou moins concordants (Doyle et Allen, 2003). La zone de stockwerk peut alors être plus restreinte latéralement par rapport à la partie concordante. Ce type de gisement formé par remplacement sous le fond marin semble représenté à McLeod (Debreil, 2014).

La taille, la teneur, la forme des lentilles minéralisées, la répartition de l'altération et la position des gisements de SMV sont contrôlées en partie par l'architecture volcanique (Gibson et al., 1999; Ross et Mercier-Langevin, 2014) et donc la circulation des fluides hydrothermaux dans la séquence stratigraphique. Dans plusieurs districts, comme Matagami, Noranda ou Snow Lake, plusieurs gisements sont au même niveau stratigraphique (Gibson et Galley, 2007), il est donc important de connaître et suivre les unités volcaniques ou sédimentaires encaissantes (Fig. 2.5).

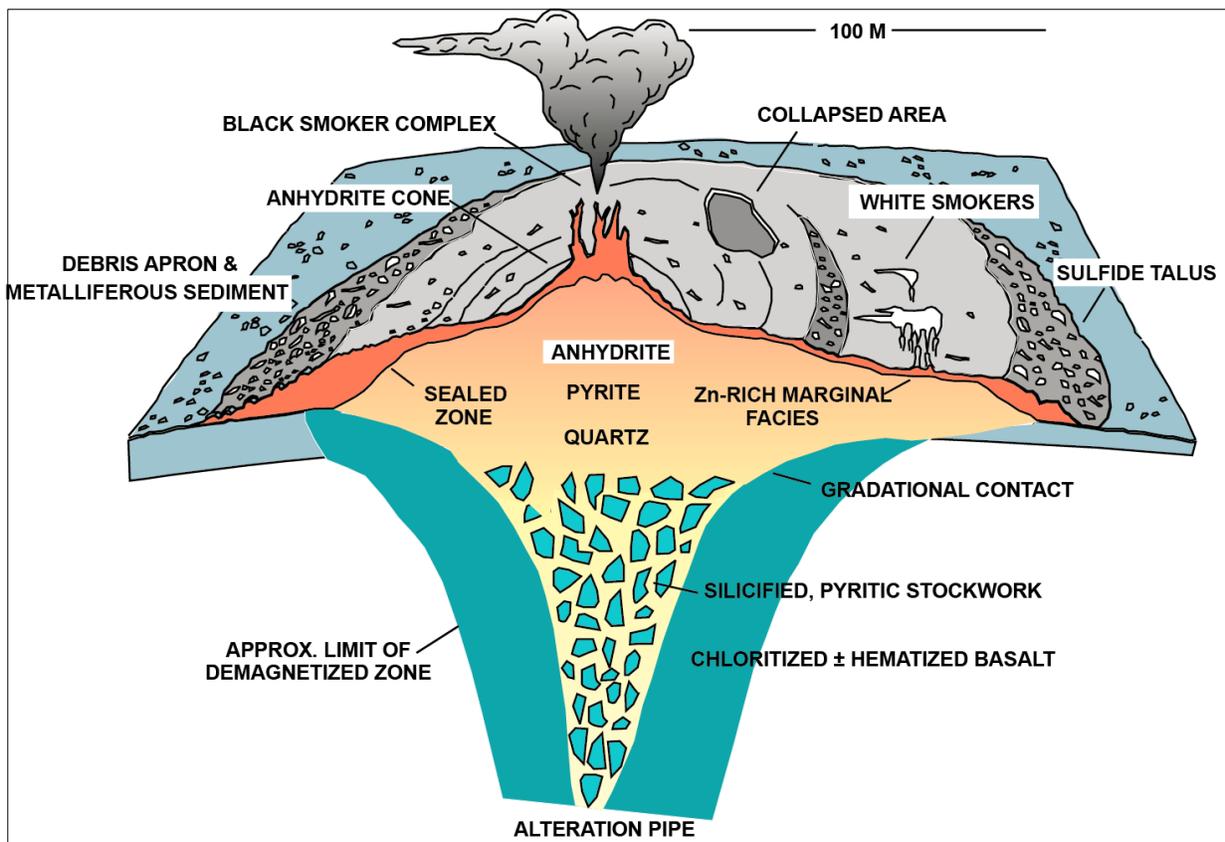


Figure 2.4 : Schéma d'un dépôt classique de SMV au niveau d'une ride médio-océanique, présentant le halo d'altération associé. La lentille concordante de sulfures semi-massifs à massifs surmonte le système en stockwerk discordant. D'après Hannington et al. (1998).

2.2.2 Altération hydrothermale

Les fluides hydrothermaux laissent des traces sous forme d'altération des roches. Cette empreinte étant de plus grand volume que la minéralisation et souvent discordante, son utilisation permet de se rapprocher de la minéralisation (Fig. 2.5).

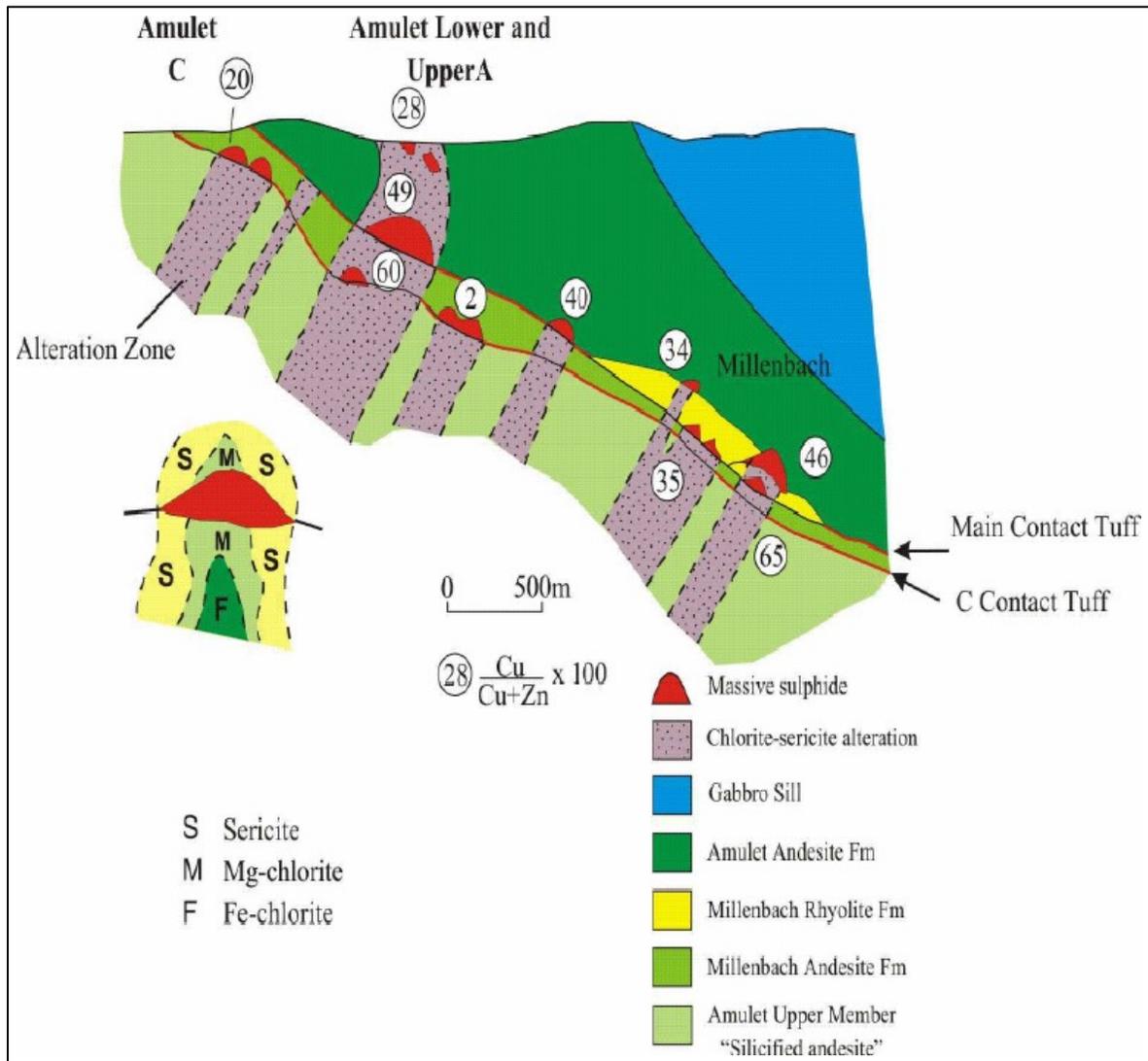


Figure 2.5 : Schéma type de la morphologie et de la zonation de l'altération de dépôts de SMV, d'après Gibson et Galley (2007).

Les lentilles de sulfures massifs comportent un halo d'altération hydrothermale. Deux types d'altération sont décrits par Gibson et al. (1999). À une échelle plus régionale, les zones d'altération semi-concordantes sont produites par les interactions entre fluides et roches au sein de systèmes géothermaux dans le mur stratigraphique du gisement. Elles comprennent des minéraux tels que la chlorite, les micas blancs, l'albite, l'épidote et le quartz (Galley, 1993). En se rapprochant du gisement, l'intensité de l'altération augmente et devient souvent discordante, surtout dans les laves (Figs. 2.5 et 2.6a). L'altération discordante plus intense est restreinte aux structures qui contrôlent les décharges hydrothermales et présente une zonation. Du centre vers l'extérieur, on retrouve :

- Une zone de silicification, dans les zones les plus intensément altérées. Cette zone correspond à une augmentation de la silice et un lessivage important des éléments et est associée à des zones de stringers à pyrite-chalcopyrite;
- Une altération chloriteuse, composée de chlorite, séricite et quartz, marqué par une augmentation des concentrations en magnésium et fer;
- Une altération séricitique, composée de séricite, chlorite, quartz en composition variable. Cette zone est marquée par une augmentation des concentrations en potassium, fer et magnésium.

L'altération peut également être concordante et localisée dans le mur et dans le toit de la minéralisation, lorsque celle-ci se met en place par remplacement, dans le cas de séquences plus poreuses, typiquement dans les roches volcanoclastiques (Doyle et Allen, 2003) (Fig. 2.6b).

Localement (et parfois régionalement), les variations minéralogiques qui s'opèrent lors de l'altération peuvent être mises en évidence par l'étude des changements chimiques dans la roche. Par exemple, la destruction des plagioclases, plus intense en s'approchant du gisement (augmentation de l'intensité de l'altération), entraîne une diminution du sodium dans la roche. Il est ainsi possible d'utiliser les éléments majeurs pour quantifier les variations de l'altération et naviguer autour du gisement.

Lors de l'exploration de ce type de gisement, il est donc important de combiner les connaissances stratigraphiques et du système d'altération.

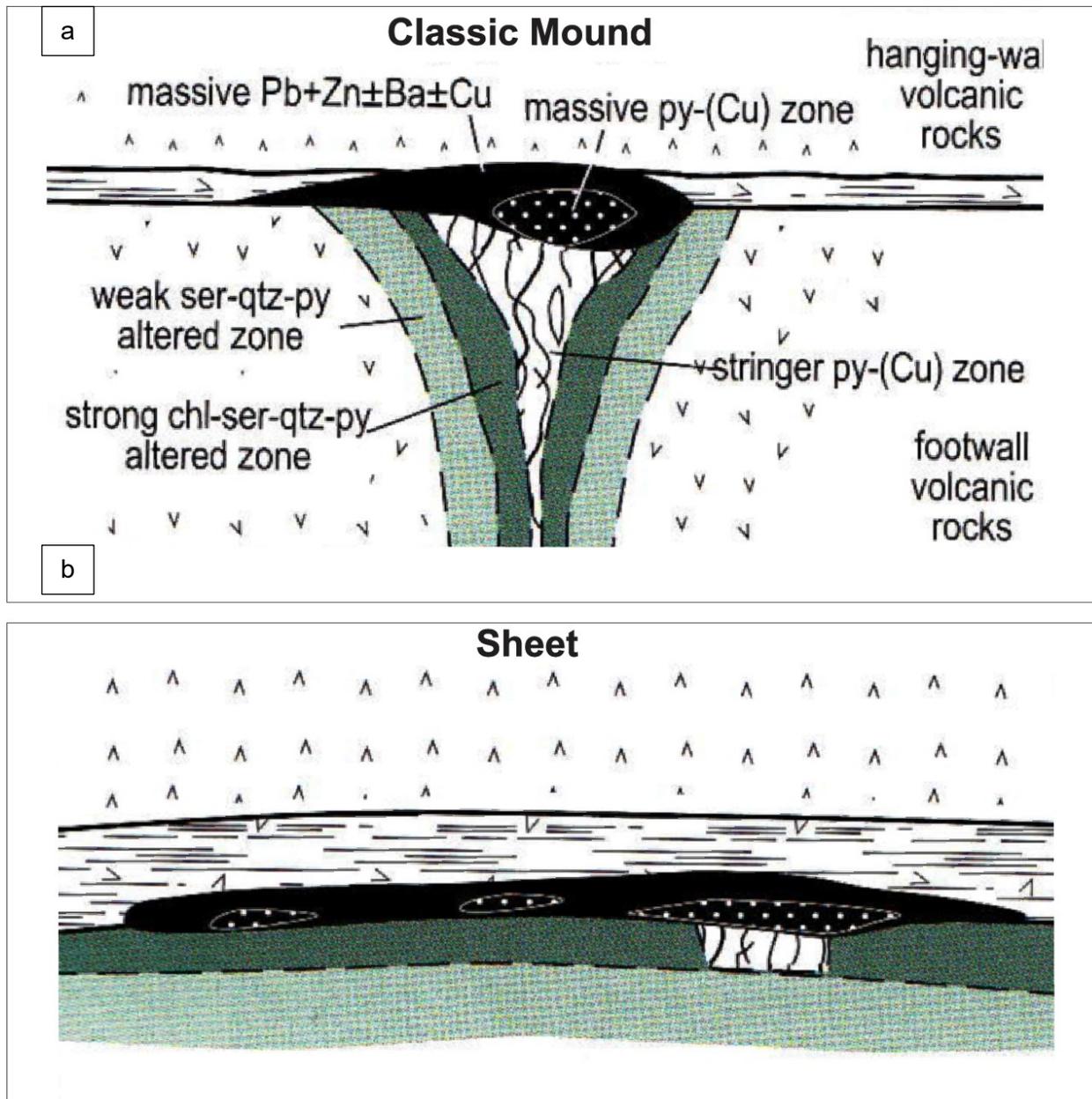


Figure 2.6 : Représentation de deux types d'altération hydrothermale locale sous des lentilles de SMV. a. Altération discordante, dans le cas de monticule (contexte de laves; précipitation des sulfures sur le fond marin) ; b. Altération concordante aux zones minéralisées, dans le cas de lentilles tabulaires (contexte de dépôts volcanoclastiques, remplacement sous le fond marin). Extrait de Large (1992).

2.2.3 Classification des SMV

Plusieurs classifications des SMV ont été proposées, suivant leur contenu en métaux de base ou en or, le caractère des roches encaissantes, ou de l'altération hydrothermale des assemblages de minéraux. La classification la plus couramment utilisée est celle basée les lithologies des roches encaissantes. Six environnements sont distingués (Barrie et Hannington, 1999; Franklin et al., 2005; Galley et al., 2007) :

- Le type mafique est caractérisé par un environnement de coulées de laves mafiques, massives à coussinées et de hyaloclastites. Ce type de gisement est rencontré dans des zones d'arrière-arcs et de rides médio-océaniques. La circulation de fluides est facilitée par la présence de hyaloclastites.
- Le type pélitique-mafique est constitué d'une alternance de roches sédimentaires de milieu profond et de roches intrusives à extrusives mafiques, ainsi que de moins de 5% de roches felsiques. Les sulfures massifs et la zone d'altération sous-jacente sont tabulaires et sont retrouvés en domaine d'arrière-arcs riches en sédiments.
- Les SMV provenant de volcanisme bimodal à dominance mafique se trouvent au niveau des arcs océaniques et peuvent comporter jusqu'à 25% de roches felsiques. Ils se retrouvent souvent sous forme de lentilles stratiformes au niveau de dépôts volcaniques ou sédimentaires, ou au contact entre roches volcaniques mafiques et felsiques.
- Le type bimodal-felsique est compris dans des successions dominées par les roches felsiques, avec 20 à 50% de roches mafiques. Les dépôts se trouvent sous forme de lentilles stratiformes liées aux dépôts volcaniques créés lors de la formation des dômes felsiques, au niveau de domaines d'arrière-arcs continentaux, de marges continentales et de rifts continentaux submergés.
- Le type bimodal-felsique à forte activité de soufre, est un sous-type de l'environnement précédent. Il correspond à un croisement entre un SMV et une minéralisation épithermale en eau peu profonde.
- Le type silicoclastique-felsique est composé d'au moins 80% de roches silicoclastiques, complétées par des roches felsiques et moindrement des roches mafiques. Les lentilles de sulfures sont tabulaires et étalées. Ces gisements sont généralement localisés dans un environnement d'arrière-arc épicontinental mature.

2.3 Le gisement de Bracemac-McLeod

La mine Bracemac-McLeod, présentement en exploitation par Glencore, est située dans le SE du Flanc Sud. Il s'agit en fait de deux gisements de SMV, Bracemac et McLeod, espacés de 1,0 à 1,2 km l'un de l'autre et exploités par une seule mine (Fig. 2.7).

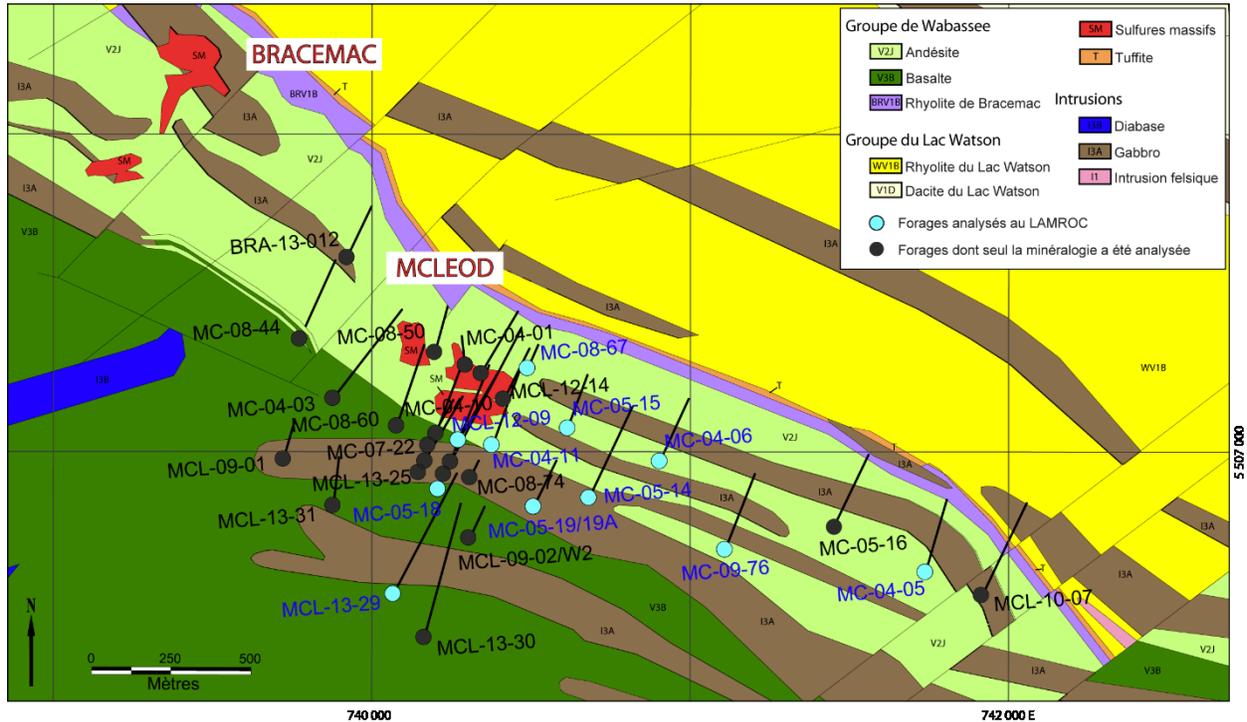


Figure 2.7 : Carte géologique du secteur Bracemac-McLeod, compilée par Glencore. Le collet des forages analysés au LAMROC pour tous les paramètres et utilisés dans cette étude est montré en bleu.

2.3.1 Séquence lithologique

La succession lithologique à Bracemac-McLeod est typique du Flanc Sud. Elle est pentée d'environ 70° vers le sud-ouest, son sommet stratigraphique est dans la même direction et elle comprend les groupes du Lac Watson et de Wabassée (Sharpe, 1968). Vu la grande épaisseur du Wabassée, la succession dans son ensemble est dominée par des coulées mafiques à intermédiaires avec une proportion moindre de coulées felsiques (Fig. 2.8). La minéralisation est principalement retrouvée au niveau de la Tuffite Clé, localisée entre la Rhyolite du Lac Watson et la Rhyolite de Bracemac. Cette dernière est surmontée de la Tuffite de Bracemac, puis par les roches mafiques à intermédiaires (Groupe de Wabassée). Finalement les roches volcaniques sont localement recoupées par des intrusions de gabbro et diorite et de rares intrusions felsiques.

Groupe du Lac Watson

Le Groupe du Lac Watson comprend deux unités felsiques (Sharpe, 1968; Clark, 1983), d'affinité tholéiitique (rapports Zr/Y et La/Yb faibles, spectres d'éléments traces étendus plats) et ayant subi une forte altération (Debreil, 2014). À la base, la Dacite du Lac Watson, d'une épaisseur minimum de 500 m (Piché et al., 1993), est composée de coulées massives à grains fins, amygdalaires, intercalées de hyaloclastites. Elle est affectée par un lessivage quasi complet du sodium et du calcium et un enrichissement en silice, fer et magnésium (Piché, 1991).

Au-dessus, la Rhyolite du Lac Watson est présente sur l'ensemble du Flanc Sud. Elle correspond à des coulées de laves felsiques massives à textures sphérulitiques, fines et lobées, amygdalaires et porphyriques à quartz, avec des passages hyaloclastiques. Cette unité peut atteindre jusqu'à 1500 mètres d'épaisseur (Piché et al., 1993), mais fait environ 200 m d'épaisseur dans le secteur de McLeod.

Tuffite Clé

Le Groupe du Lac Watson est surmonté par la Tuffite Clé, horizon marqueur régional permettant de localiser les lentilles minéralisées. Elle est composée de lits fins de tufs felsiques à mafiques, de niveaux riches en silice (Davidson, 1977) et contient généralement peu de sulfures (pyrite, chalcopryrite et sphalérite) (Adair, 2009). Elle varie de quelques centimètres à mètres, voire localement absente à Bracemac. Une première hypothèse sur l'origine de la Tuffites Clé est qu'elle proviendrait d'un apport de matériel de la Rhyolite du Lac Watson et de roches andésitiques du groupe de Wabassée (Liaghat et MacLean, 1992). Des travaux plus récents montrent que la Tuffite Clé est un tuf calco-alcalin, andésitique, de source unique, déposé avant la formation du dépôt de SMV (Genna et al., 2014) et provenant possiblement d'une source distale (Debreil, 2014).

Groupe de Wabassée

Sur le Flanc Sud, le Groupe de Wabassée est essentiellement composé de la Formation de la rivière Allard (Pilote et al., 2011). Situé au-dessus du Groupe du Lac Watson, le Groupe de Wabassée est constitué de roches volcaniques mafiques à felsiques, massives à coussinées, avec des quantités mineures de hyaloclastite (Debreil, 2014). Le sommet du groupe comprend des coulées basaltiques à andésitiques. Le Basalte Supérieur, d'affinité tholéiitique, surmonte l'Andésite Inférieure, d'affinité transitionnelle, elle-même surmontée d'une tuffite, marquant une pause dans l'activité volcanique (Debreil, 2014). Au-dessus du Basalte Supérieur et uniquement dans le secteur de McLeod, Debreil (2014) décrit le Basalte de McLeod, d'affinité magmatique,

tholéiitique à transitionnelle, différencié géochimiquement du Basalte Supérieur. La base du groupe est formée de la Rhyolite de Bracemac, uniquement retrouvée dans le secteur de Bracemac-McLeod. Elle est constituée d'une coulée de lave felsique, tholéiitique, de type lobes-hyaloclastite, comprenant de nombreuses sphérules (jusqu'à 20%), d'environ 1 mm, dans une matrice de plagioclase, quartz et chlorite (Adair, 2009).

Plusieurs tuffites, semblables à la Tuffite Clé, mais très peu ou pas minéralisées, sont interceptés dans le Groupe de Wabasee. La plus remarquable est la Tuffite de Bracemac, située au sommet de la Rhyolite de Bracemac, mais pas toujours visible. Elle marque la transition vers les roches volcaniques mafiques à intermédiaires du Groupe de Wabasee. Plusieurs tuffites, minéralisées ou non, se retrouvent dans le Basalte Supérieur, dans les secteurs de Bracemac et Orchan (Debreil, 2014).

Roches intrusives

Trois types de roches intrusives sont distingués par Sharpe (1968), dont les intrusions synvolcaniques, qui ont donc subi les mêmes déformations que les roches volcaniques ; les roches intrusives post-volcaniques comprenant des massifs granitiques et dioritiques ; et les roches intrusives tardives qui recoupent toute la stratigraphie, les dykes de diabase.

La majorité des intrusions recoupe la minéralisation et ne présente pas d'altération. Ceci confirme leur mise en place après l'activité hydrothermale responsable de la précipitation des sulfures (Adair, 2009).

2.3.2 Minéralisation et altération hydrothermale

Le gisement de Bracemac-McLeod est de type bimodal-mafique (Galley et al., 2007), car il est associé à des niveaux de roches volcaniques felsiques dans une séquence dominée par des laves mafiques sous-marines.

Minéralisation

À Bracemac, la minéralisation est localisée à trois niveaux stratigraphiques (au niveau de la Tuffite Clé et à 300 et 410 m au-dessus de cette dernière), toujours encaissée dans de la tuffite. À McLeod, la minéralisation est essentiellement au niveau de la Tuffite Clé (Adair, 2009), du sommet de la Rhyolite du Lac Watson jusqu'à la base de la Rhyolite de Bracemac. Dans tous les cas, les lentilles minéralisées sont concordantes à la stratigraphie.

La minéralisation des lentilles est variée. Composée essentiellement de pyrite, chalcopyrite, sphalérite, parfois pyrrhotite, leur texture est massive, semi-massive ou en bande fine (*stringer*). En particulier à McLeod, la minéralisation est hébergée dans les faciès de forte chloritisation, sous la Tuffite Clé, dans la Rhyolite du Lac Watson (Adair, 2009).

De récents travaux suggèrent que la formation de la minéralisation à Bracemac-McLeod est le résultat du remplacement sous le fond marin de la Tuffite Clé et des unités hyaloclastiques au sommet de la Rhyolite du Lac Watson et à la base de la Rhyolite de Bracemac (Debreil, 2014; Genna et al., 2014). Ceci est en accord avec une forme de lentille minéralisée semi-concordante et une minéralisation partiellement synchrone au dépôt de la Tuffite Clé.

Altération hydrothermale

Contrairement à la plupart des gisements de SMV du camp de Matagami (altération discordante), le large halo d'altération à Bracemac-McLeod est semi-concordant à la stratigraphie (Fig. 2.8). L'altération proximale et la plus intense est sous-jacente aux lentilles minéralisées, au sommet de la Rhyolite du Lac Watson. Appelée informellement « pipe » d'altération dans certains logs de forages, elle correspond à une chloritisation intense avec un lessivage de la silice, du sodium, du calcium et du potassium. Dans certains forages on retrouve également l'altération intense juste au-dessus des lentilles minéralisées, dans la partie inférieure de la Rhyolite de Bracemac. En s'éloignant de la minéralisation, l'altération en chlorite est moins intense, pour terminer par une séricitisation.

Il existe une correspondance entre les zones d'altération et les structures syn-volcaniques, mise en évidence par Clark (1983) de façon générale et décrite à Bracemac par Adair (2009). Les structures de failles syn-volcaniques ont servi de canaux pour les fluides hydrothermaux.

CHAPITRE 3 : LE LABORATOIRE DE CARACTÉRISATION PHYSIQUE, MINÉRALOGIQUE ET CHIMIQUE DES ROCHES

Le Laboratoire mobile de caractérisation physique, minéralogique et chimique des roches (LAMROC) de l'INRS a été mis en service en juin 2010 afin de valoriser les carottes de forage au diamant en exploration minière. Des efforts importants ont été faits pour optimiser l'acquisition et le traitement des données. Six campagnes d'acquisition de données ont été réalisées jusqu'à maintenant dans la Sous-province de l'Abitibi : deux ans à Matagami sur toute la région (Ross et al., 2011a, 2011b, 2012, 2013a; Fresia, 2013; Fresia et al., 2017), deux ans à Chibougamau (Ross et al., 2013b, 2014c, 2016a), et de nouveau deux ans à Matagami, dans le secteur Bracemac-McLeod (Ross et al., 2016b; cette étude).

Ce chapitre présente le Laboratoire, le choix des forages pour les campagnes 2014-2015 à Matagami, puis les données obtenues après traitement ainsi qu'un aperçu de leur utilisation possible pour discriminer les lithologies.

3.1 Le LAMROC

Cette première section décrit (1) le fonctionnement de chaque capteur ou appareil de mesures du Laboratoire et les corrections des données associées, (2) la procédure de préparation des carottes et le choix des points de mesure. Pour plus de détails méthodologiques, le lecteur est renvoyé à Ross et al. (2011a; 2012; 2013a; 2014a, 2014b; 2017), Fresia (2013) et Bourke et Ross (2016).

3.1.1 Acquisition et correction des données multiparamétriques

Le Laboratoire mobile de caractérisation physique, minéralogique et chimique des roches est composé d'une remorque adaptée, pour transporter notamment le « *Multi Sensor Core Logger* » (MSCL), servant à l'acquisition des données. Ainsi, le Laboratoire peut être déplacé directement sur un site d'entreposage de carottes de forage ou potentiellement sur un site d'exploration en cours de forage (Fig. 3.1a). Le Laboratoire est équipé d'une génératrice au cas où le courant ne serait pas disponible sur place. Il est également doté d'un système de climatisation permettant de contrôler la température ambiante du laboratoire (Ross et al., 2011a).

Le MSCL permet d'obtenir une image à haute résolution des carottes, de mesurer la densité, la spectrométrie visible et proche infrarouge (minéralogie d'altération et réflectance moyenne dans le spectre visible) et la susceptibilité magnétique. Le MSCL est complété par deux analyseurs à fluorescence des rayons X (FRX) portatifs.

Grâce au LAMROC il est possible de prendre plusieurs données assez rapidement et à intervalle régulier. Ces données complètent la description des carottes de forage faite par le géologue et contribuent à la discrimination spatiale des lithologies et des altérations liées à la mise en place des dépôts de sulfures massifs volcanogènes (SMV) ou autres.

Le MSCL comprend quatre éléments principaux (Fig. 3.1b) : (1) une série de capteurs et instruments de mesure, (2) un pousseur et un rail, (3) un ordinateur contrôlant l'équipement et enregistrant les paramètres, (4) une interface électronique connectant les instruments avec l'ordinateur (Geotek Ltd., 2010). Le pousseur, guidé par un moteur électrique, assure le positionnement précis de la section de carotte à chaque point de mesure, automatiquement. Une section de 1,5 m de carotte de forage est placée sur un « bateau à carotte » (*core boat*) de 1,55 m de long en fibre de verre non magnétique, à l'extrémité droite du MSCL. Le bateau est déplacé par le pousseur sur le rail et passe sous et dans les différents appareils de mesures, en commençant par l'acquisition d'une image avec la caméra à balayage linéaire, la densité par atténuation des rayons gamma, la minéralogie par spectrométrie visible et infrarouge, et la susceptibilité magnétique. La géochimie est mesurée en parallèle au MSCL grâce à deux analyseurs à FRX portatifs Olympus Innov-X Delta Premium, montés sur des supports de laboratoire, permettant ainsi d'optimiser le temps d'acquisition des données (Fig. 3.1b).

Le système permet de prendre des mesures sur des carottes entières ou demi-carottes de tous les calibres usuels. Dans le cas de Matagami, le calibre NQ (47,6 mm de diamètre) est le format le plus courant ; les calibres BQ (36,5 mm) et HQ (63,5 mm) sont utilisés plus rarement.



Figure 3.1 : a. Vue extérieure du LAMROC ; b. Vue intérieure du LAMROC. Détails du Multi Sensor Core Logger (MSCL), à gauche. La carotte de forage se déplace de droite à gauche sous et dans les différents capteurs, à l'aide du pousseur automatisé contrôlé par ordinateur. À droite, les deux analyseurs à FRX portatifs fonctionnent en parallèle au MSCL.

Pour les campagnes 2014-2015 à Matagami, la résolution spatiale moyenne (espacement entre les points) des mesures effectuées au MSCL est de 20 à 30 cm. Comme le temps de mesure est plus long pour les deux analyseurs à FRX portatifs (1-1,5 mins selon le mode d'analyse), seulement un point sur deux est mesuré. Ceci donne une résolution spatiale

moyenne de 40 à 60 cm pour la géochimie. L'imagerie n'a pas été réalisée pour les campagnes 2014-2015 afin d'augmenter le nombre de mètres de carotte analysé. En contrepartie, l'auteure de ce mémoire a réalisé une description visuelle détaillée des forages sélectionnés. Ceci a permis de visualiser les carottes et d'avoir une trace écrite qu'elle a pu utiliser pour l'interprétation des mesures physiques, minéralogiques et chimiques. Cette première visualisation fut également l'occasion de choisir l'emplacement des points de mesure le plus représentatif possible, tel qu'expliqué dans la section 3.1.2. Les paragraphes suivants présentent le fonctionnement de chaque capteur et appareil de mesure.

Densité

La densité varie en fonction de la composition de la roche. Par exemple, les roches mafiques ont une densité plus élevée que les roches felsiques. Connaître ce paramètre est donc une première approche pour discriminer les lithologies, en gardant en mémoire que la minéralisation, l'altération, la porosité, l'état d'oxydation d'une roche et les textures primaires ou secondaires telles que les amygdules et les phénocristaux font varier la densité (Killeen et al., 1997).

Traditionnellement, la densité se mesure par la pesée dans l'air et dans l'eau d'un échantillon (méthode d'immersion). L'utilisation de l'atténuation des rayons gamma avec le MSCL est une méthode beaucoup plus rapide. Pour prendre la mesure, la carotte s'arrête 10 s dans un flux de rayons gamma. Une source de ^{137}Cs (10 millicuries) émet un faisceau de rayons gamma (énergie de 0,662 MeV) qui traverse la carotte de forage. Une partie des photons incidents interagissent avec les électrons dans la roche et sont déviés, principalement par effet Compton; ils n'atteignent donc pas le détecteur. Les photons non déviés sont détectés de l'autre côté de la carotte. Sachant l'épaisseur de la carotte, mesurée au vernier pour chaque boîte, le nombre de coups par secondes (cps) du détecteur gamma est converti en densité grâce à une courbe de calibration basée sur la réponse d'un cylindre d'aluminium gradué (Vantadoost et al., 2008; Geotek Ltd., 2010). La source radioactive, le détecteur de rayon gamma et le logiciel de contrôle sont fournis par Geotek Ltd.

La précision de la mesure dépend du temps d'intégration, du flux primaire de rayons gamma et de la variation de température dans le détecteur. Un étalonnage est réalisé deux fois par jour afin de contrôler la dérive du détecteur de rayons gamma. Cependant cet étalonnage n'est pas parfaitement adapté au type de mesures effectuées (Ross et al., 2011a). Une correction empirique est donc appliquée aux mesures pour éliminer les erreurs systématiques. Elle repose sur la comparaison entre les densités gamma et les densités par immersion sur des échantillons

volcaniques et intrusifs de la Sous-province de l'Abitibi (Ross et al., 2013a; Ross et Bourke, 2017).

Minéralogie

Le spectromètre proche infrarouge et visible permet de détecter et semi quantifier une vaste gamme de minéraux, principalement ceux résultant de l'altération hydrothermale des roches. L'instrument utilisé est un LabSpec 2600 de ASD Inc. Dans le contexte de zones d'altération liées aux SMV de Matagami, les minéraux intéressants sont les micas blancs (muscovite, phengite), les chlorites, les carbonates, l'épidote, la serpentine et le talc. Cette méthode permet aussi d'identifier des minéraux métamorphiques comme la biotite, les amphiboles, la prehnite et les zéolites (Huntington et al., 1997). Le spectromètre donne également des indications sur la chimie minérale, tel que le contenu en fer par rapport au magnésium dans les chlorites ou la variation de la concentration en aluminium dans les micas blancs (Scott et Yang, 1997; Yang et al., 2011). En particulier, l'étude des variations spatiales de la composition des micas blancs est utilisée en exploration, particulièrement dans le cas des SMV (Yang et al., 2011).

La source lumineuse de 1 cm de diamètre du spectromètre se pose sur la carotte de forage pendant 10 à 20 secondes. Une partie de la lumière est réfléchie, et une autre absorbée par la roche. L'appareil mesure le ratio entre l'énergie réfléchie et l'énergie incidente, pour des longueurs d'onde entre 350 et 2500 nm. Le spectre obtenu dépend de la minéralogie de la roche et principalement des minéraux d'altération hydrothermale.

L'identification des minéraux se fait par l'examen de la forme générale des spectres obtenus et l'étude des pics d'absorption (position, profondeur, largeur) (Thompson et al., 1999). La méthode utilisée est la comparaison des spectres avec une librairie spectrale de référence. Cette comparaison est réalisée automatiquement avec la fonction *The Spectral Assistant* dans le logiciel *The Spectral Geologist* (TSG, version *Core*), développé par l'*Australian Commonwealth Scientific and Research Organization* (CSIRO) d'Australie.

Susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique d'une roche correspond à son degré de magnétisation en réponse à l'application d'un champ magnétique (Hunt et al., 1995). Ce paramètre est donc contrôlé par le contenu en minéraux ferromagnétiques, tels que la magnétite et la pyrrhotite. Il est principalement utilisé pour interpréter les levés géophysiques, mais peut également être utile lors de la discrimination lithologique et pour localiser les zones minéralisées (ex. : à Matagami, les gabbros ont généralement une susceptibilité plus élevée que les basaltes et les zones

minéralisées montrent une susceptibilité magnétique plus élevée que les autres lithologies). La susceptibilité magnétique est influencée par la lithologie primaire, l'altération hydrothermale (transformation de minéraux) et la minéralisation.

La susceptibilité magnétique est exprimée en format SI. Le MSCL utilise le capteur de susceptibilité magnétique MS2C Core Logging Sensor de Bartington Instruments Ltd. La prise de mesure se fait en 1 s. La carotte de forage est soumise à un champ magnétique de basse fréquence (0,565 kHz) et faible intensité (~80 A/m). La fréquence du champ magnétique modifiée par la présence de l'échantillon est utilisée pour calculer la susceptibilité magnétique (Bartington Instruments Ltd., non daté).

Géochimie

Les mesures géochimiques sont effectuées grâce à deux analyseurs portatifs à FRX Olympus Innov-X Delta Premium. L'un est dédié principalement aux éléments majeurs (mode *mining*) et l'autre principalement aux éléments traces (mode *soil*). Une vingtaine d'éléments chimiques est ainsi obtenue en 1-1,5 mins : Al₂O₃, CaO, Cr, Cu, Fe₂O₃, K₂O, MgO, MnO, Nb, Ni, P₂O₅, Rb, S, SiO₂, Sr, TiO₂, V, Y, Zn et Zr.

Des rayons X primaires sont émis depuis un tube miniature à rayons X, compris dans l'appareil. Le rayonnement X secondaire est mesuré par un détecteur qui convertit les rayons X en voltage proportionnel à l'énergie des rayons secondaires. Les appareils calculent directement les concentrations des différents éléments chimiques détectés, grâce à un logiciel interne et la calibration du fabricant. Les données brutes sont ensuite corrigées sur la base de la composition d'une série d'échantillons de la Sous-province de l'Abitibi, déterminée à la fois grâce aux appareils portatifs et à la géochimie de laboratoire traditionnelle (Ross et al., 2014a, 2014b; Bourke et Ross, 2016).

Afin d'assurer la constance de l'appareil, le matériel de référence NIST 2702 est mesuré toutes les 12 heures. Aucune dérive instrumentale importante n'a été constatée jusqu'à maintenant (Ross et al., 2016b).

3.1.2 Préparation de la carotte et choix des points de mesure

Au Québec, les carottes de forage sont généralement entreposées à l'extérieur dans des boîtes en bois spécifiques à cet usage. Chaque boîte comprend deux (pour les forages NQ les

plus récents et les calibres HQ) à trois rangées de 1,5 m de long. Sur chaque boîte, les forages sont identifiés avec leur nom, le numéro de la boîte et l'intervalle (en mètre) de carotte.

Avant l'analyse au LAMROC, les carottes sont nettoyées, replacées et décrites par un géologue (dans le cas présent, l'auteur de ce mémoire). (1) Lors de la description, il est nécessaire de mouiller la roche afin de faire ressortir certains minéraux, la texture, les veines, etc. Ceci permet aussi d'enlever le plus gros de la saleté (poussière, graisse, débris). Les carottes ont amplement le temps de sécher avant les mesures au LAMROC. (2) Le géologue replace les morceaux de carotte (qui se seraient déplacés lors du transport, ou remis à la mauvaise place par le foreur), c'est-à-dire qu'il les dispose de façon à ce qu'ils s'emboîtent les uns aux autres. Dans le cas où une partie de la carotte a été échantillonnée (généralement indiqué par un papier agrafé dans le fond de la boîte), une pièce de bois est placée afin de remplacer l'espace vide. (3) Le géologue décrit la carotte de forage de façon détaillée. Cette description est utile lors de l'interprétation des mesures physiques, minéralogiques et chimiques. Une fois cela fait, le géologue marque d'un point rouge (MSCL seulement) ou d'un trait rouge (MSCL et FRX) les points de mesure à effectuer avec le LAMROC, directement sur la carotte.

Plusieurs critères sont à prendre en compte lors du choix des points de mesures : (1) chaque point doit être espacé de 20 à 30 cm. Ce critère permet d'avoir une résolution approximativement constante le long des forages; (2) les points doivent être placés à plus de 2 cm d'une fracture ou veine, afin d'éviter les effets de fractures sur la densité globale du point mesuré; (3) le géologue doit veiller à choisir l'emplacement des points le plus représentatif possible de la zone, donc éviter les phénocristaux et les veines non représentatives (p. ex. : veines de quartz massives).

Suite à cela, l'assistant (généralement un étudiant) brosse la carotte afin de compléter le premier nettoyage réalisé à l'eau. Ce nettoyage rigoureux est important pour assurer la qualité des mesures effectuées. Les sections de 1,5 m de carottes de forage sont ensuite placées dans les bateaux de carottes. L'assistant veille à aligner chaque début de section sur l'extrémité gauche du bateau. Les profondeurs de chaque section sont inscrites directement sur la carotte de façon visible. Puis, à partir du début de chaque section, l'assistant entre la profondeur relative de chaque point de mesure dans le fichier Excel prévu à cet effet. Il suffit d'additionner ces positions relatives aux profondeurs absolues de chaque début de section afin d'obtenir les profondeurs absolues de chaque point de mesure (en mètres).

3.2 Choix des forages

Neuf forages ont été sélectionnés au niveau du gisement de McLeod, suivant deux sections perpendiculaires (Fig. 3.2) : MC-04-06, MC-04-11, MC-05-14, MC-05-15, MC-05-19/19A, MC-08-67, MC-09-76, MCL-12-09 et MCL-13-29. Les neuf forages ont été analysés au LAMROC et décrits géologiquement de façon détaillée. Les forages recoupent la séquence lithologique du secteur (Fig. 2.8 et 3.3) et sont répartis au niveau de la lentille de sulfures McLeod et jusqu'à 1,5 km vers l'ESE. Ce choix permet de voir la disposition de la minéralisation et les variations de l'altération hydrothermale en fonction de la distance au gisement.

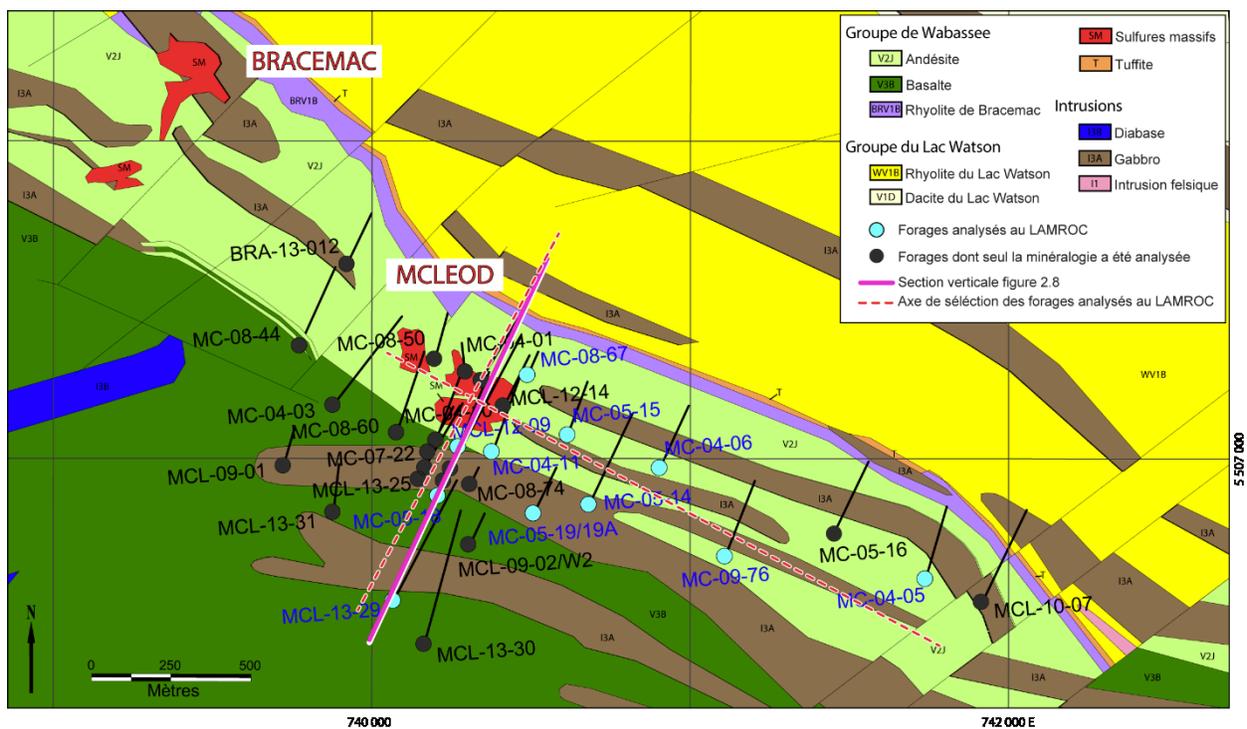


Figure 3.2 : Carte géologique du secteur de Bracemac-McLeod, montrant la position des forages étudiés au LAMROC (bleu), les forages dont seule la minéralogie a été analysée (en noir). La section verticale de la figure 2.8 et les axes utilisés pour sélectionner les forages à analyser au LAMROC. Géologie compilée par Glencore.

Ce mémoire de maîtrise se base essentiellement sur ces neuf forages, pour lesquels tous les paramètres sont disponibles à haute résolution spatiale. De plus, 22 forages ont été choisis pour une étude de l'altération hydrothermale, via une analyse de la spectrométrie infrarouge. Les mesures ont été prises aux 10 m. Les forages sont répartis autour du gisement McLeod dans un rayon de 500 m et jusque 1,7 km vers l'ESE (Fig. 3.2). Ces données n'ont pas été utilisées dans le cadre de ce mémoire.

3.3 Données du LAMROC

Une fois les données acquises et traitées (compilation, corrections), les résultats sont présentés sous forme de profils, correspondant à chaque paramètre mesuré en fonction de la profondeur du forage. Chaque forage est représenté par quatre figures (propriétés physiques et ratios géochimiques; éléments majeurs; éléments traces; minéralogie). Les paramètres étant spatialement corrélés, il est possible de raffiner les contacts, de discriminer les lithologies et de caractériser l'altération. Ces profils sont illustrés ici pour le forage MCL-12-09 (Figs. 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7). Les codes couleurs utilisés sont basés sur ceux de la compagnie Glencore et sont associés aux différents codes lithologiques décrits dans le tableau 3.1, utilisés par la compagnie et modifiés d'après les codes du MERN. L'ensemble des profils est disponible dans Ross et al. (2016b) et à l'Annexe 2.

Tableau 3.1 : Codes lithologiques utilisés par Glencore pour l'ensemble des 9 forages choisis pour le projet et couleurs associées.

Code	Signification
Ovb	Mort-terrain (« <i>Overburden</i> »)
I1	Intrusion felsique
I1P	Intrusion felsique porphyrique
I2	Intrusion intermédiaire
I2P	Intrusion intermédiaire porphyrique
I2-I3	Intrusion intermédiaire à mafique
I3	Intrusion mafique
I3A	Gabbro
T	Tuffite
BT	Tuffite de Bracemac (« <i>Bracemac Tuffite</i> »)
SSM	Sulfures semi-massifs
SM	Sulfures massifs
PIPE	Zone d'altération intense en chlorite (pas nécessairement discordante)
V1B	Rhyolite non différenciée
BRV1B	Rhyolite de Bracemac
WV1B	Rhyolite du Lac Watson
Hyalo	Hyaloclastite
V2J*	Roche volcanique intermédiaire (andésite*)
V2J* cou	Roche volcanique intermédiaire (andésite*) coussinée
V2J* mas	Roche volcanique intermédiaire (andésite*) massive
V3B*	Roche volcanique mafique (basalte*)
V3B* bre	Roche volcanique mafique (basalte*) à texture bréchique
V3B* cou	Roche volcanique mafique (basalte*) coussinée
V3B* mas	Roche volcanique mafique (basalte*) massive
V3B* shr	Roche volcanique mafique (basalte*) cisailée

* Dans les logs de forage, les termes « basalte » et « andésite » sont utilisés de façon informelle, sans vérification géochimique. Il n'est pas généralement possible de différencier un basalte à grains fins d'une andésite à grains fins à l'œil nu.

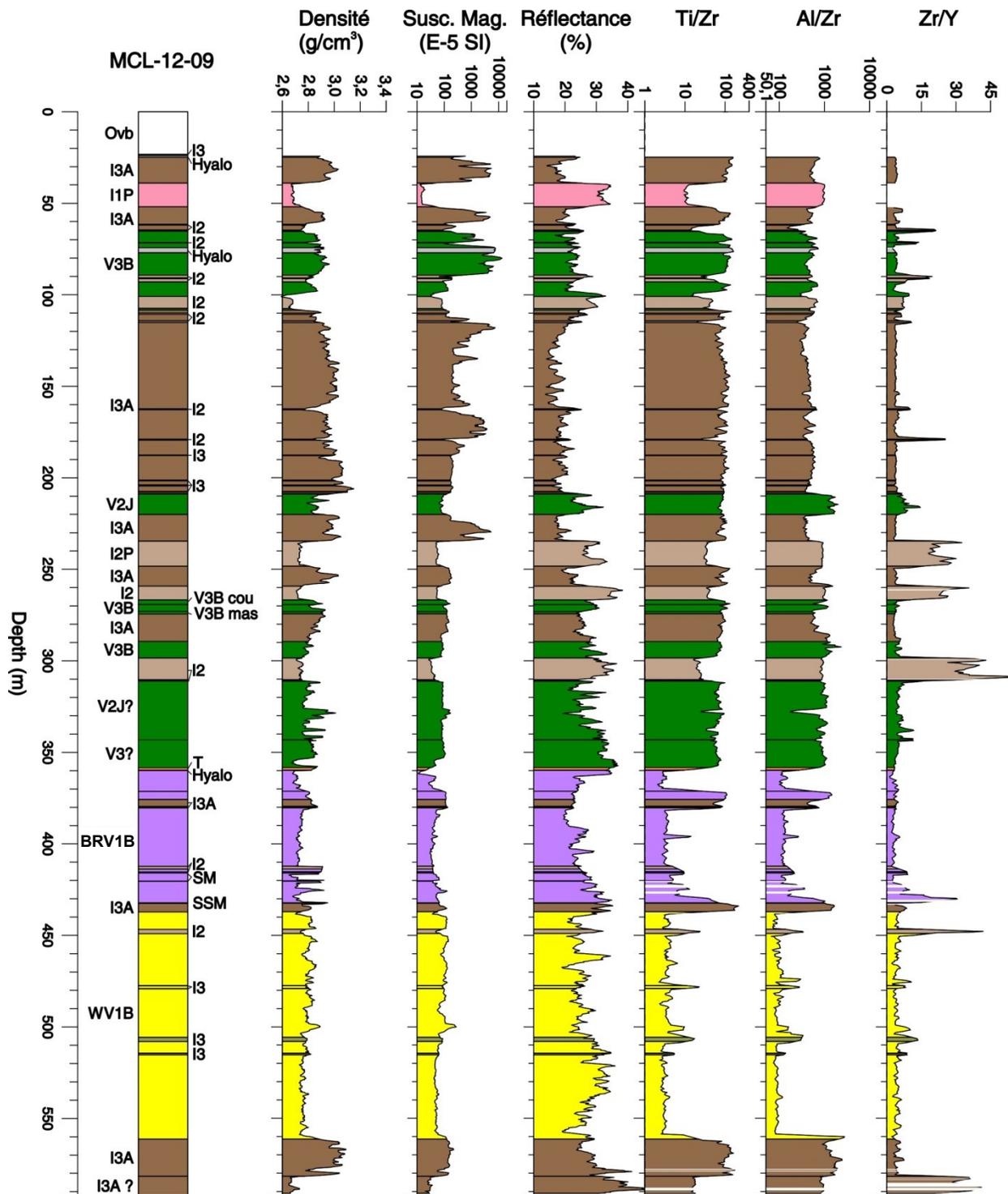


Figure 3.4 : De gauche à droite : description lithologique par le géologue (nouveau log effectué dans le cadre de cette étude), profils des propriétés physiques et ratios en fonction de la profondeur pour le forage MCL-12-09. Les zones blanches dans les profils indiquent que la concentration est inférieure à la limite de détection.

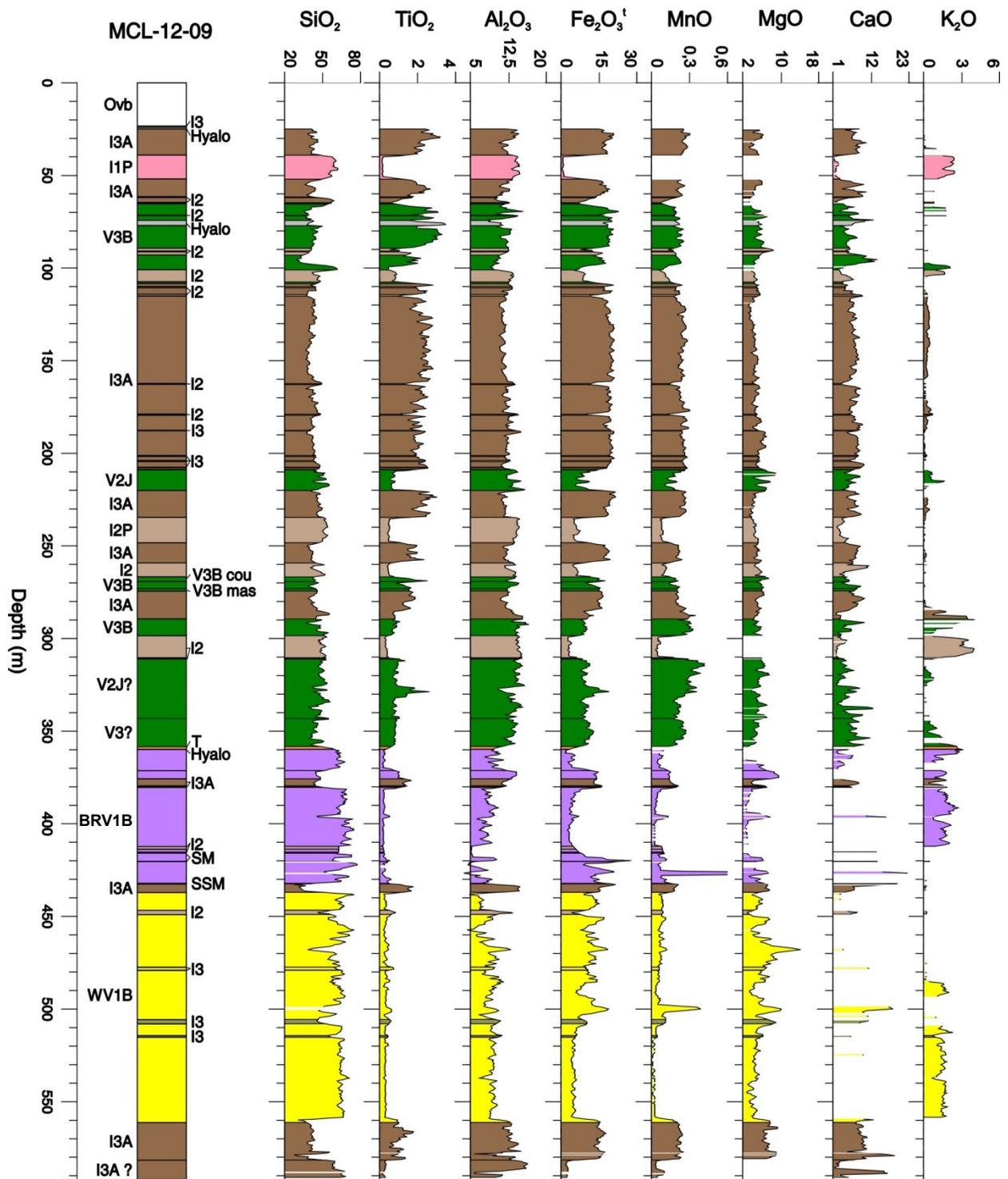


Figure 3.5 : De gauche à droite : description lithologique par le géologue (nouveau log effectué dans le cadre de cette étude), profils des oxydes majeurs corrigés (en %) en fonction de la profondeur pour le forage MCL-12-09. Les zones blanches dans les profils indiquent que la concentration est inférieure à la limite de détection.

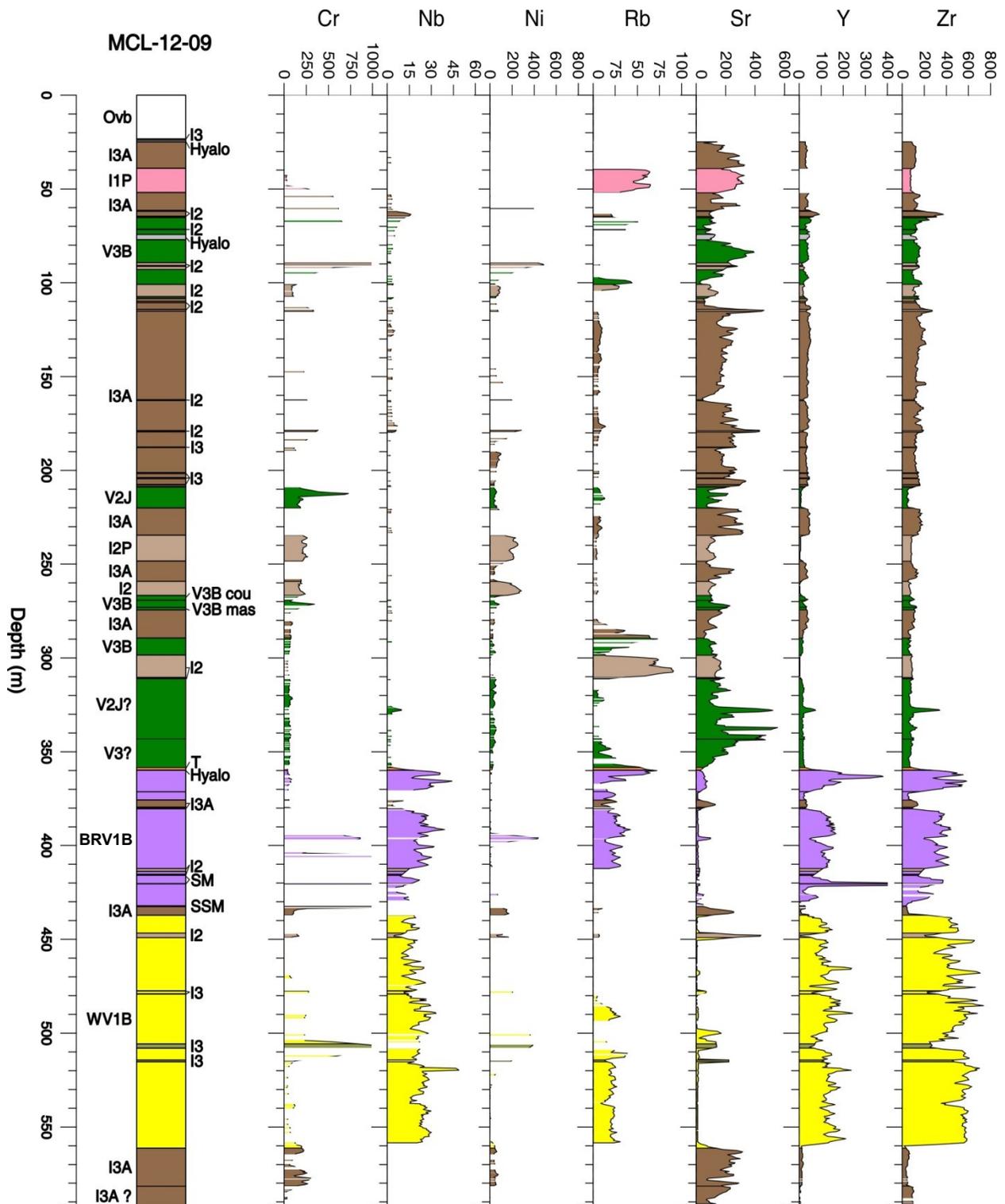
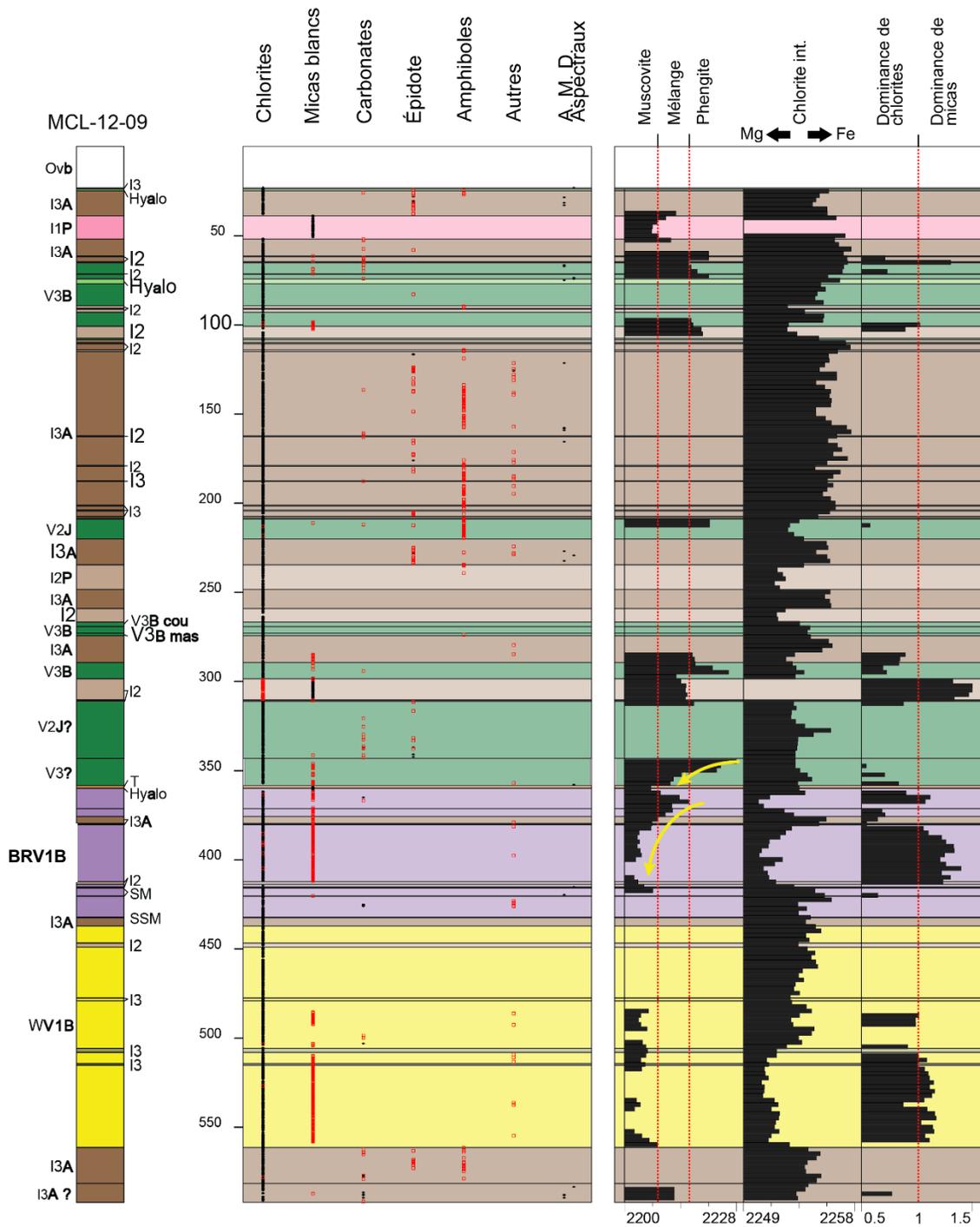


Figure 3.6 : De gauche à droite : description lithologique par le géologue (nouveau log effectué dans le cadre de cette étude), profils des éléments traces corrigés (en ppm) en fonction de la profondeur pour le forage MCL-12-09. Les zones blanches dans les profils indiquent que la concentration est inférieure à la limite de détection.



*Interprétation spectrale (logiciel TSG). Les losanges noirs représentent les minéraux principaux (plus abondants) ; et les carrés rouges les minéraux secondaires.

Figure 3.7 : De gauche à droite : description lithologique par le géologue (nouveau log effectué dans le cadre de cette étude), groupes minéralogiques détectés (« A.M.D. » = aucun minéral détecté), caractéristiques spectrales analysées, en fonction de la profondeur pour le forage MCL-12-09.

3.4 Traitement des données corrigées en préparation aux analyses statistiques

3.4.1 Prétraitement des données du LAMROC

Les données de chaque forage sont comprises dans trois fichiers Excel différents (propriétés physiques, minéralogiques et chimiques). À chaque forage correspond également un fichier Excel avec sa description lithologique. La première manipulation réalisée dans le cadre de cette étude consiste à lier la lithologie à chaque point mesuré. Étant donné qu'il faut associer des points à des intervalles, un code en langage C++ sur le support *CodeBlocks* a été créé.

La deuxième manipulation permet de lier, pour chaque forage, les fichiers des propriétés physiques, minéralogiques et chimiques, sans perdre de lignes de données. Pour cela on peut utiliser la fonction dans Excel « RechercheV », en utilisant la profondeur des points de mesure comme identifiant. On obtient ainsi des points ayant toutes les propriétés et d'autres n'ayant que les propriétés physiques et minéralogiques (puisque la géochimie n'est prise que toutes les deux mesures) (Annexe 3).

3.4.2 Présentation des données pour analyse statistique multivariée

Les points n'ayant que les propriétés physiques et minéralogiques sont enlevés, car ils donnent une information incomplète et donc inutile pour l'interprétation des données, dans le cadre de cette maîtrise. On obtient ainsi un fichier Excel unique pour tous les forages, avec pour chaque point de mesure la lithologie, les propriétés physiques, minéralogiques et chimiques.

Finalement, pour pouvoir utiliser les données pour l'apprentissage automatique (*Machine Learning*), il est nécessaire de transformer les données « textes » en données « catégoriques » (soit la lithologie et la minéralogie). Pour ce faire, une valeur numérique est attribuée à chaque donnée « texte » différente. Le code est détaillé dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Codes numériques appliqués aux données "texte" pour une application en statistique multivariée.

Lithologie		Minéralogie			
		Groupe		Minéral	
BRV1B	1	Amphiboles	1	Actinolite	1
I1	2	Carbonates	2	Hornblende	2
I1P	3	Chlorites	3	Siderite	3
I2	4	Epidotes	4	Calcite	4
I2P	5	Invalid	5	Ankerite	5
I3	6	NULL	6	Magnesite	6
I3A	7	Smectites	7	FeMgChlorite	7
V3B	8	Sulphates	8	MgChlorite	8
V3B Bre	9	White Micas	9	FeChlorite	9
V3B cou	10	Tourmalines	10	Epidote	10
V3B mas	11	Dark Micas	11	Aspectral	11
V3B Shr	12	Other MgOH	12	NULL	12
WV1B	13			Magnesium Clays	13
				Montmorillonite	14
				Jarosite	15
				Muscovite	16
				Phengite	17
				Paragonite	18
				Muscovitic Illite	19
				Phengitic Illite	20
				FeTourmaline	21
				Phlogopite	22
				Riebeckite	23
				Tremolite	24
				Zoisite	25
				Talc	26

3.4.3 Transformation en log-ratio centré

Dans le cas d'une analyse géochimique conventionnelle de laboratoire, la somme des éléments chimiques est égale à une constante (p. ex. : la somme des éléments majeurs associée à la perte au feu est égale à 100%). On parle de contrainte de somme constante (CSC) ou « effet de fermeture » (Chayes, 1971). Ce précepte ne permet pas de dissocier les données lors de leur interprétation afin d'éviter des biais sur les résultats et des pertes d'informations (Fresia, 2013).

La transformation en log-ratio centré (LRC) proposée par Aitchison (1984) permet de s'affranchir de l'effet de la CSC en sortant les données géochimiques de leur espace propre vers l'espace réel. Le principe est de centrer les données en utilisant la moyenne géométrique des composantes de chaque analyse comme diviseur commun :

$$S_+^d = \left\{ X = \left[\log\left(\frac{x_1}{g(x)}\right), \log\left(\frac{x_2}{g(x)}\right), \dots, \log\left(\frac{x_d}{g(x)}\right) \right] \in R^d \mid x_i > 0, i = 1, 2, \dots, d, \sum_{i=1}^d x_i = 0 \right\}$$

avec $g(x) = \exp\left(\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \log(x_i)\right)$. Cette transformation permet ainsi de conserver la structure des matrices de covariances et de corrélations, utiles pour les analyses statistiques multivariées (Aitchison, 1984, 1986; Kucera et Malmgren, 1998; Egozcue et al., 2003; Grunsky et Kjarsgaard, 2008). La transformation est illustrée à la Figure 3.8.

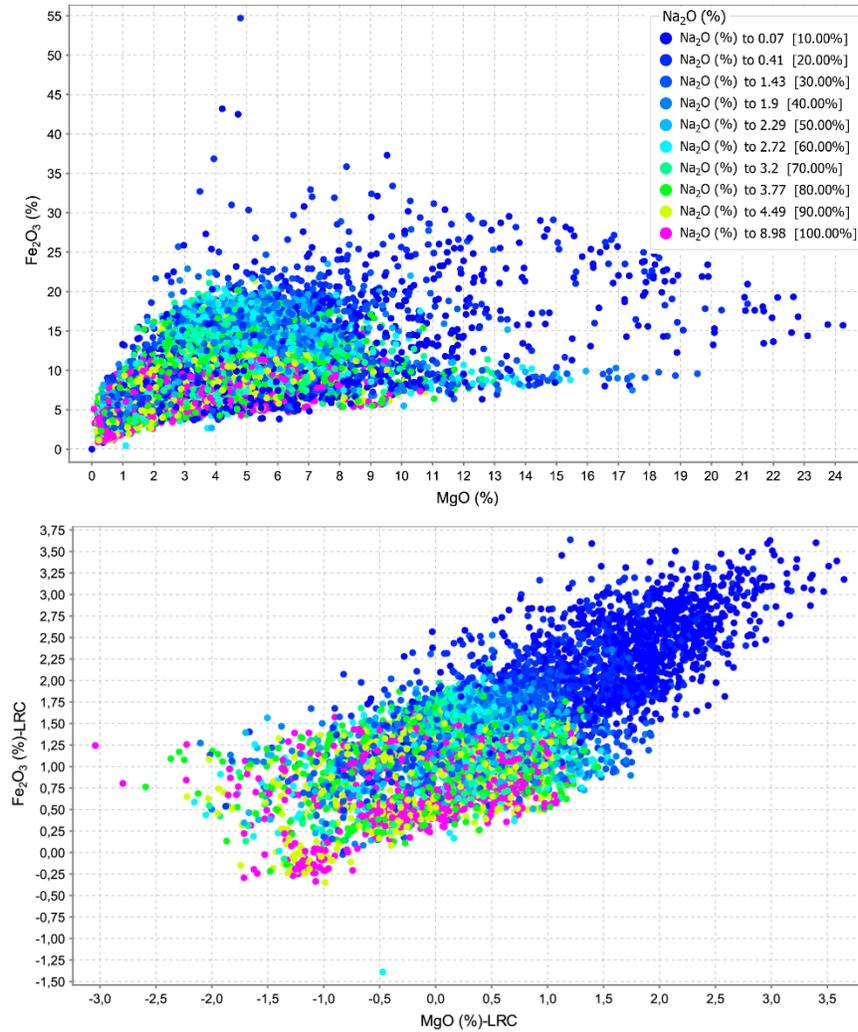


Figure 3.8 : Illustration de la transformation en log ratio centré avec le graphique Fe₂O₃ fonction de MgO et Na₂O (en couleur). Les données proviennent des bases de données de géochimie de Glencore (secteurs Bracemac et McLeod, années 2004 à 2014). La transformation en LRC met en évidence la corrélation entre Fe₂O₃ et MgO, qui n'est pas visible autrement.

Ainsi, les méthodes de statistiques multivariées peuvent être appliquées sur les données compositionnelles sans causer de biais dans les résultats (Aitchison, 1986; Bosch et al., 2002; Davis, 2002). Un autre avantage du LRC est que les données montrent une distribution normale

beaucoup plus adaptée aux études statistiques (Aitchison, 1986; Barceló et al., 1996; Weltje, 2002).

3.4.4 Traitement des limites de détection

Les limites de détection des données géochimiques acquises par le LAMROC ont été estimées arbitrairement en classant les données en ordre croissant, pour chaque élément et en gardant la plus petite valeur se répétant (Fresia, 2013). Pour certains éléments un pourcentage notable de mesures est inférieur à la limite de détection. Ces valeurs, si en trop grand nombre, peuvent fausser l'apprentissage statistique.

Les mesures géochimiques inférieures à la limite de détection définie pour le LAMROC ont été systématiquement remplacées par la moitié de la valeur de la limite de détection (plutôt que par la valeur zéro). Ce choix évite de modifier la structure des données et limite la perte d'information (Martín-Fernández et al., 2003).

CHAPITRE 4 : APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE APPLIQUÉ À L'EXPLORATION MINIÈRE

L'apprentissage statistique désigne un ensemble de méthodes et d'algorithmes permettant d'extraire l'information d'un grand ensemble de données ou d'apprendre un comportement à partir de l'observation d'un phénomène (Fischer, 2014). Aussi, lorsqu'il n'est pas possible de corréler un ou plusieurs éléments entre eux de façon simple, ou qu'il y a trop de paramètres à prendre en compte, il est nécessaire de faire appel à des méthodes multivariées non linéaires, par exemple en utilisant l'apprentissage automatique. Autrement dit, on veut chercher des liens statistiques significatifs dans un jeu d'observations pour créer un modèle prédictif.

Ce chapitre décrit succinctement les deux principaux types de méthodes existantes (méthodes non supervisées et supervisées), puis présente trois méthodes supervisées. Cette description est bien entendu non-exhaustive, mais présente les algorithmes les plus utilisés. La comparaison des trois méthodes supervisées décrites permet d'appuyer le choix de celle utilisée pour interpréter les données du LAMROC : les forêts aléatoires (*Random Forest*).

4.1 Méthodes non supervisées

L'apprentissage non supervisé regroupe les méthodes d'apprentissage automatique qui ne considèrent que les co-variables et non la variable d'intérêt (Fischer, 2014). Cette méthode se distingue de l'apprentissage supervisé par le fait qu'il ne requiert pas de données colocalisées du paramètre que l'on cherche à retrouver pour permettre à l'algorithme de calibrer ses paramètres. L'analyse se fait donc uniquement à partir des données indirectes ou d'exemples. Ainsi l'algorithme qu'on aura choisi classe les données en fonction de leur structure ou attributs, en sous-groupes homogènes. Il sera ensuite possible visuellement de déduire un motif, une caractéristique pour chaque groupe formé (Mitchell, 1997). Parmi ces méthodes, on retrouve le K-means, l'analyse en composantes principales (p. ex. Fresia, 2013), les arbres décisionnels et le maximum d'entropie.

Dans la situation où il n'est pas possible de mesurer la variable d'intérêt ou que les co-variables sont clairement liées à la variable d'intérêt, l'apprentissage non supervisé sera une approche à privilégier.

4.2 Méthodes supervisées

L'apprentissage supervisé regroupe les techniques d'apprentissage automatique permettant de produire automatiquement des règles à partir d'une base de données d'apprentissage contenant des « exemples ». Une fois la règle générée et testée, on l'applique sur un ensemble d'entrées (p. ex. les données récoltées par le LAMROC) pour prédire les sorties (p. ex. une estimation de la concentration en sodium) (Mohamadally et Fomani, 2006; Fischer, 2014).

Parmi les méthodes supervisées, les plus utilisées sont les réseaux de neurones, les machines à vecteurs de support (*Support Vector Machine* ou SVM) et plusieurs méthodes basées sur les arbres de décision (*Decision tree*), dont la forêt aléatoire (*Random Forest*).

4.2.1 Réseaux de neurones

Le réseau de neurones est une méthode utilisée par plusieurs algorithmes (Adaline, la machine de Cauchy, ...) et inspirée du fonctionnement des neurones biologiques. Les réseaux de neurones permettent de créer des classifications rapides. Un neurone est une unité de calcul, qui comporte une ou plusieurs entrées et une seule sortie calculée. Un réseau de neurones est composé d'une succession de couches, où chacune prend son entrée sur les sorties des précédentes (Fig. 4.1). Lors de l'apprentissage, les entrées doivent être d'autant plus nombreuses que le problème posé est complexe. Malgré cela, une base de données trop volumineuse peut entraîner un biais, d'autant plus s'il y a des valeurs redondantes. En cas de biais ou d'erreurs, les réseaux de neurones seuls ne suffisent pas, il faut faire appel à d'autres algorithmes pour supprimer des connexions, des entrées ou des neurones du réseau, ce qui, dans ce cas, peut entraîner un biais humain.

Un autre inconvénient des réseaux de neurones est l'absence de contrôle sur ce qui se passe entre l'entrée et la sortie fournie (« boîte noire »). Les méthodes basées sur les réseaux de neurones sont des méthodes dites adaptatives, autrement dit, on procède par ajustement de coefficients, il n'y a pas de règle exploitable et facile à interpréter (Gilleron et Tommasi, 2000). Les réseaux de neurones seront très bons pour des demandes basiques, comme faire de la reconnaissance (motifs, caractères), faire de l'approximation, mais seront moins bons lors de problèmes complexes ou de relations floues, comme dans le cas d'une estimation d'une variable, ce qui est l'objectif de cette étude.

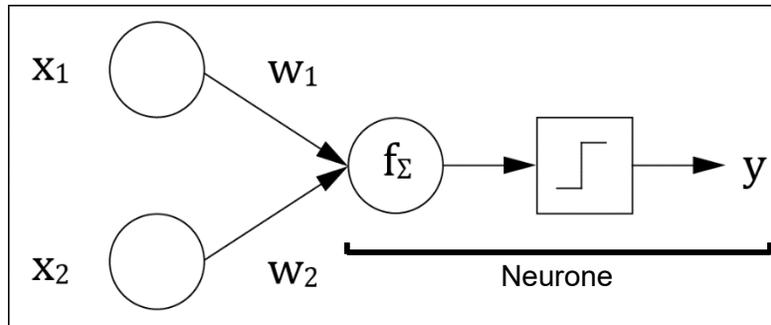


Figure 4.1 : Représentation du résultat du calcul d'un neurone. Chaque entrée (noté x) a un poids (noté w). Le résultat du calcul (y) du neurone est la somme des produits de toutes les entrées en fonction de leur poids (f_{Σ}) et passant par une fonction de transfert, également appelée fonction de seuil ou Heaviside (\square).

4.2.2 Machine à vecteurs de support

Les machines à vecteurs de support (ou *Support Vector Machine* - SVM) est une méthode de classification binaire reposant sur la séparation de groupes (*clusters*) de points par hyperplans² en maximisant la distance entre l'hyperplan et les échantillons, dans un espace défini. Les points les plus proches de l'hyperplan sont appelés vecteurs de support (Mohamadally et Fomani, 2006). Cette méthode est robuste et fonctionne très bien dans le cas linéaire (Mohamadally et Fomani, 2006). Dans les cas non-linéaires, il est recommandé d'utiliser une fonction noyau. Son principe est de transformer les variables adéquates pour rendre un problème linéairement séparable tandis qu'il ne l'est pas dans l'espace initial. Autrement dit, les échantillons sont projetés dans un espace de plus grande dimension dans lequel il existe probablement des hyperplans optimaux linéaires (Cristianini et Shawe-Taylor, 2000). Sans cette transformation, la résolution du problème dans un formalisme mathématique strict est très coûteuse en temps de calcul. L'astuce des noyaux a donc été adoptée, d'autant plus qu'elle ne nécessite pas d'expliquer la transformation d'espace.

Le SVM est une méthode de classification efficace dans de nombreux domaines d'application, mais a des difficultés à traiter les grandes bases de données ayant un nombre d'observations élevé, car le temps de calcul est dépendant du nombre d'entrées à classer et du nombre de données d'apprentissage (Mohamadally et Fomani, 2006). Un autre inconvénient réside dans l'identification des meilleurs paramètres des fonctions noyaux, qui est un processus long (Mohamadally et Fomani, 2006). En ce qui concerne les variables, la méthode ne permet

² L'hyperplan d'un espace vectoriel est un plan vectoriel linéaire séparant les données en deux classes.

pas d'identifier leur pertinence, ce qui pourtant peut être une information importante en recherche, en particulier dans le cas de cette maîtrise.

4.2.3 Méthode d'ensemble, la forêt aléatoire ou *Random Forest*

L'algorithme des forêts aléatoires (*Random Forest* ou RF) développé par Breiman en 1984 fonctionne sur le principe d'apprentissage automatique (*machine learning*). Cet algorithme fait partie des méthodes supervisées de type arbre de décision³ et basé sur le concept de choix « aléatoire » (« randomisation ») de nombreux petits arbres (Heutte et al., 2008). Il permet d'élaborer un modèle prédictif de données, à partir de l'analyse par arbres décisionnels de nombreuses variables (Breiman, 2001).

La procédure aléatoire est importante pour l'efficacité du RF. Elle se traduit par la fonction de « *bootstrapping* ». C'est-à-dire que chaque arbre de décision traite un sous-ensemble choisi au hasard dans l'ensemble d'entraînement (en pratique, environ deux tiers) et utilise les données restantes (un tiers) pour évaluer la précision de la prévision (Breiman, 1996). À cette fonction est associé la technique de « l'agrégation » (ou « *aggregating* »). Cette technique produit plusieurs *bootstraps*, donnant ainsi un ensemble de valeurs prédites qui vont être agrégées en calculant leur moyenne. Autrement dit, la combinaison de ces deux fonctions correspondant au « *bagging* » ou « *bootstrap aggregating* » forme un algorithme intégré qui découpe l'ensemble d'entraînement en sous-ensembles aléatoires de petite taille. Un arbre décisionnel est créé et les données sont remises dans l'ensemble initial. L'opération est répétée un grand nombre de fois, et à la dernière étape, les arbres sont combinés afin de déterminer l'arbre optimum. Bien que souvent associé aux arbres décisionnels, le « *bagging* » peut être utilisé dans d'autres types de classificateurs. Son utilisation permet de diminuer la variance des données, améliorant ainsi la prévisibilité de la variable (Hastie et al., 2001).

Le RF est de plus en plus utilisé dans de nombreux domaines, notamment en exploration minière, afin de traiter de grands ensembles de données (Carranza et Laborte, 2015). Le RF n'exige pas de grosses ressources informatiques, ni de données ayant des attributs spécifiques. Les résultats obtenus sont souvent meilleurs que d'autres techniques d'apprentissages automatiques tels que les réseaux de neurones ou les SVM (Rodriguez-Galiano et al., 2015). La

³ Un arbre de décision est un outil graphique en forme d'arbre. Sa lecture simple facilite la prise de décision sur un ensemble de choix. Les différentes décisions possibles sont situées aux extrémités des branches (les « feuilles » de l'arbre), et sont atteintes en fonction du choix réalisé à chaque étape.

popularité de la méthode repose en grande partie sur sa simplicité d'utilisation (Rakotomalala, 2005).

Cette méthode d'ensemble offre une grande flexibilité dans le nombre de variables (paramètres mesurés – ici, les paramètres physiques, minéralogiques et chimiques), leur nature et le nombre d'occurrences (échantillons – ici, les points de mesures pris avec le LAMROC). Le RF peut être utilisé pour de la classification (prévoir une variable catégorielle) ou de la régression (prévoir une variable continue – ici, estimer la concentration en sodium). L'algorithme fonctionne sur le principe de forêt, constituée d'un ensemble d'arbres simples de prévision, chacun étant capable de produire une réponse lorsqu'on lui présente un sous-ensemble de variables explicatives ou prédictives. Dans le cas d'une régression, un arbre est une estimation de la variable dépendante (ici, la concentration en sodium) en fonction des prédicteurs (soit un ensemble de valeurs indépendantes – ici, les propriétés physiques, minéralogiques et chimiques). Les réponses de chaque arbre sont agrégées afin d'obtenir une estimation de la variable dépendante (variable régressée) (Fig. 4.2). En utilisant des ensembles d'arbres, il est possible d'améliorer significativement la prévision, donc avoir une meilleure capacité prédictive.

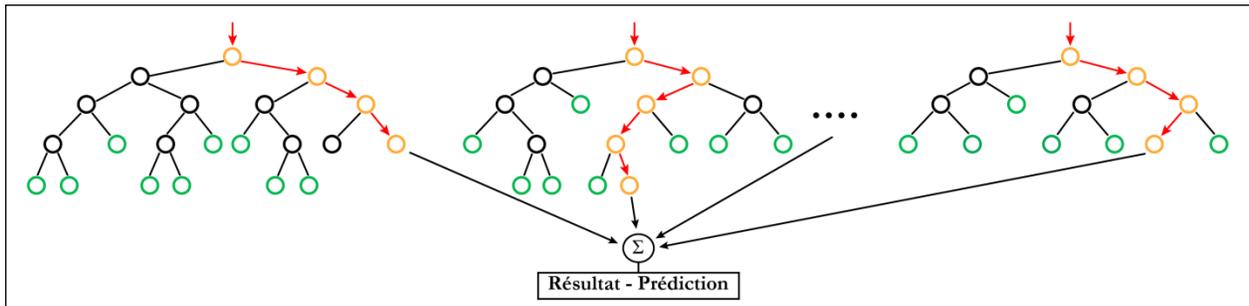


Figure 4.2 : Schéma représentant le fonctionnement du RF, basé sur le « *bagging* ».

Le nombre d'arbres de décision qu'il faut utiliser pour construire une forêt n'est pas défini, ni documenté. Breiman (2001), puis Latine et al. (2001) et Bernard et al. (2007) démontrent qu'au-delà d'un certain nombre d'arbres, en ajouter d'autres ne permet pas systématiquement d'améliorer les performances de l'ensemble. De même, le nombre d'arbres ne doit pas nécessairement être le plus grand possible pour produire une prédiction ou un classificateur performant (Fig. 4.3).

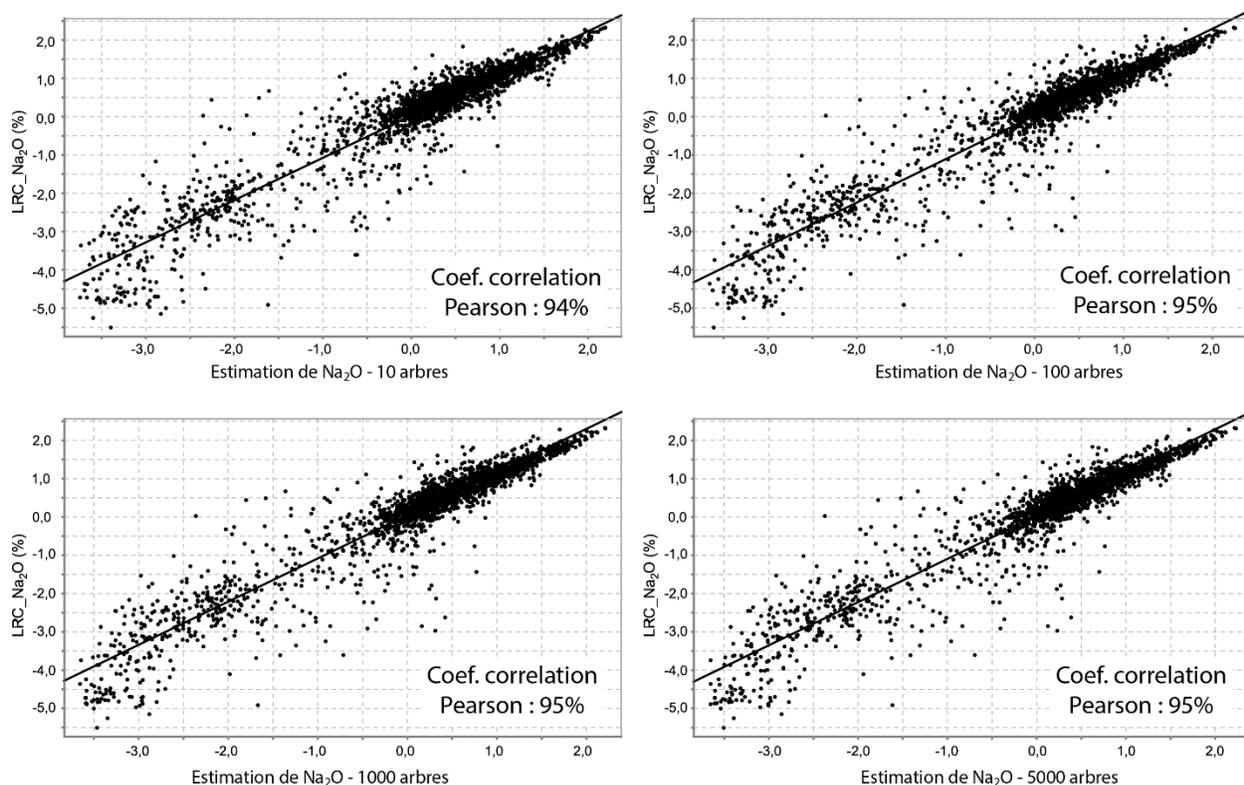


Figure 4.3 : Comparaison de l'estimation du sodium avec la méthode RF (Na₂O en LRC), avec un nombre d'arbres différent (10, 100, 1000 et 5000), en fonction du sodium réellement mesuré (axe vertical). Données géochimiques de Glencore (secteurs Bracemac et McLeod, années 2004 à 2014, n_{test} = 2292). Le coefficient de corrélation calculé est celui de Pearson.

Pour ce projet de maîtrise, la variable à prédire (concentration en sodium) est calculée par un algorithme RF de régression (Code *Python* RandomForestRegressor, de Pedregosa et al., 2011), et dans ce cas, à partir de deux ensembles de données : (1) l'ensemble d'entraînement et (2) l'ensemble de prédiction. Le premier est un sous-ensemble du jeu de données total, où l'ensemble des variables (mesurées et à prédire) est connu et utilisé par l'algorithme pour définir la corrélation entre la variable à prédire et les variables d'entrée. Le second ensemble comprend les données sur lesquelles la prédiction est faite.

CHAPITRE 5 : RÉSULTATS

Ce chapitre expose les résultats obtenus avec la méthode d'apprentissage automatique des *Random Forest*, décrite dans le chapitre précédent. L'objectif est d'estimer la concentration en sodium dans les forages à partir des données du LAMROC. La première partie du chapitre propose une estimation du sodium avec les données de géochimie de Glencore sur l'ensemble du secteur (5.1.1) à des fins de validation de la méthode, puis répète la manipulation en utilisant les données de Glencore (5.1.2) et du LAMROC (5.1.3) sur seulement les neuf forages sélectionnés pour cette maîtrise. La seconde partie présente l'utilisation de ces résultats pour l'élaboration de vecteurs vers la minéralisation (5.2), puis le calcul d'indices d'altération utilisés en contexte de SMV (5.3).

5.1 Estimation de la concentration en sodium

Afin d'estimer la concentration en sodium, plusieurs étapes de test et validation ont été nécessaires. Les trois premières impliquent l'utilisation des données géochimiques de Glencore. La 4^{ème} permet de valider l'utilisation des variables provenant des mesures multiparamétriques du LAMROC. Finalement, la 5^{ème} et dernière étape est la prédiction du sodium à partir des mesures du LAMROC (Tableau 5.1).

5.1.1 Étape 1 : test de l'apprentissage automatique pour l'estimation du sodium avec les données géochimiques de Glencore de 314 forages

Afin de valider la méthode choisie pour estimer la concentration en sodium, un test préalable a été effectué sur des données connues, c'est-à-dire les données de géochimie d'analyse de roche totale (géochimie conventionnelle) de Glencore⁴. Les forages ont été choisis à proximité des gisements Bracemac et McLeod, pour un total de 314 forages, soit 8287 analyses géochimiques, couvrant toutes les lithologies du secteur (Fig. 5.1).

⁴ L'auteur a choisi de considérer les données géochimiques de Glencore comme étant suffisamment fiables et n'a pas effectué de contrôle qualité formel. Le sodium est un élément majeur qui s'analyse bien en laboratoire par WD-XRF ou ICP-AES, avec une limite de détection faible, les données étant alors de qualité suffisante pour la compagnie et donc pour l'étude de cette maîtrise. Certainement le Na des analyses conventionnelles de Glencore est beaucoup plus fiable que le Na mesuré par certains analyseurs XRF portatifs, ou estimé dans le cadre de la présente étude.

Tableau 5.1 : Tableau de synthèse des étapes de test et validation effectués pour estimer le sodium.

Provenance des données	Étape	Objectif	Nombre de forages	Nombre de données	Nombre de variables	Type de données (non transformé ou Log ratio centré)	Résultat/corrélation de Pearson	Variabiles les plus influentes	Incertitude (95% de confiance)
Données Glencore	Étape 1	Test de l'algorithme	314	8287	18	LRC	0.95	MgO (57%) ; Fe2O3 (10%)	NA*
			314	8287	18	Données non transformées	0.93		±0.9%
	Étape 2	Test de l'algorithme avec moins de données	9	260	18	LRC	0.84	LOI (31%) ; Sr (25%)	NA*
			9	260	20		0.83	LOI (30%) ; Sr (24%)	NA*
LAMROC	Étape 3	Test de l'algorithme en variant les ensembles (A, B et C) d'entraînement de test	9	260	20	Données non transformées	0.82-0.88	Sr (30%) ; SiO2 (10%) (A) Sr (30%) ; Fe2O3 (10%) (B et C)	NA*
						LRC	0.82-0.89	LOI (25-35%) ; Sr (20%) (A et B) Sr (35%) ; LOI (20%) (C)	NA*
	Étape 4	Variation des variables et ensembles (A, B et C) d'entraînement et test	9	260	20	Données non transformées	0.66-0.75	Sr (30%) ; Densité (12-18%) (A, B et C)	NA*
						LRC	0.66-0.74	Sr (30-35%) ; Densité (15-18%) (A, B et C)	NA*
Étape 5	Prédiction Estimation du sodium	9	9675	20	Données non transformées	-	Sr (40%) ; Densité (10%) (A et C) Sr (40%) ; Al2O3 (15%) (B)	±1.1%	

* NA : Non calculé

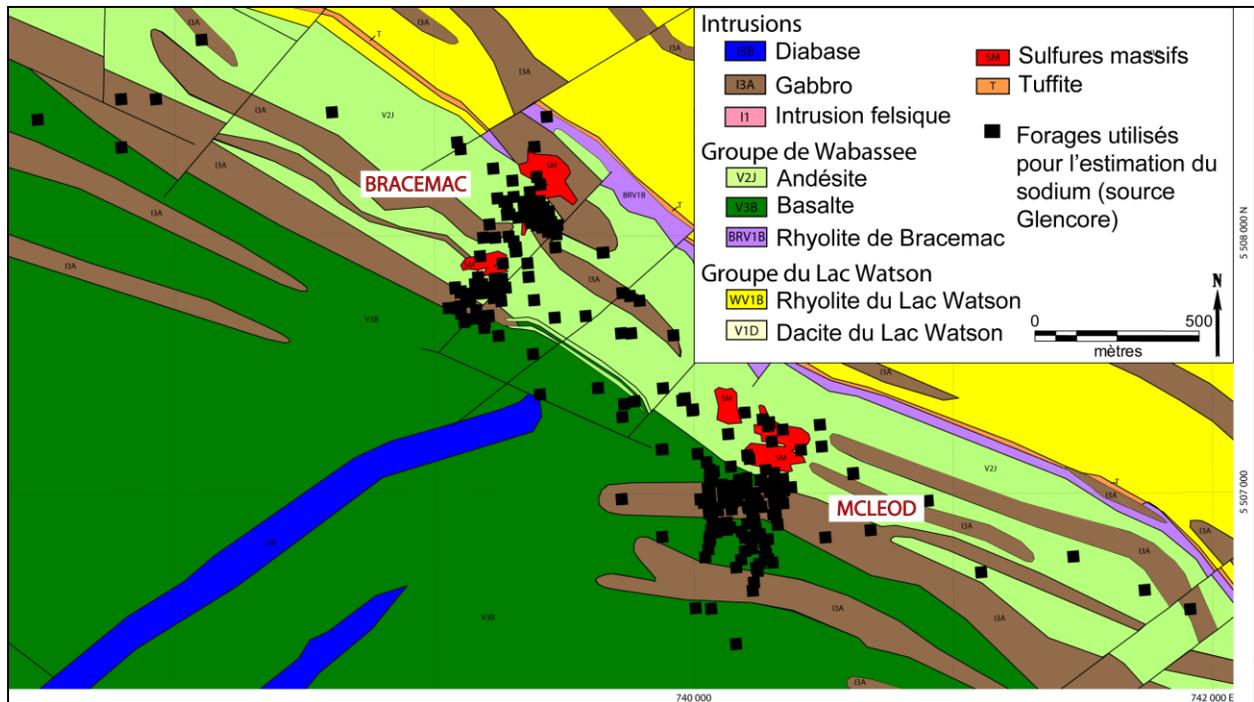


Figure 5.1 : Carte géologique du secteur de Bracemac-McLeod, montrant la répartition des collets des forages de surface réalisés par Glencore (2004-2014) et dont la géochimie est utilisée pour analyse statistique. Géologie compilée par Glencore.

Seuls les éléments chimiques qui ont systématiquement été analysés dans tous les forages ont été retenus comme variables. Ceci représente 18 éléments et oxydes : Al_2O_3 , Ba, CaO, Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , LOI, MgO, MnO, Na_2O , Nb, P_2O_5 , Rb, SiO_2 , Sr, TiO_2 , Y et Zr. Les mesures sous la limite de détection ont été remplacées par la moitié de la valeur de la limite de détection, pour chaque élément, afin d'éviter les zéros. L'algorithme a été appliqué avec les variables géochimiques non transformé puis avec les éléments majeurs préalablement transformés en log-ratio centré, pour les raisons expliquées au paragraphe 3.4.3. Les éléments en traces sont laissés en ppm puisque le problème de « fermeture » les affecte moins que les éléments majeurs.

L'ensemble d'entraînement correspond à 2/3 des mesures, pris aléatoirement, soit 5524 données. L'algorithme a ensuite été appliqué à un sous-ensemble test (le 1/3 de données restantes, soit $n=2763$) pour lequel les données de sodium avaient été mises de côté à des fins de validation. Les résultats de la calibration et du test montrent une corrélation de Pearson de 0,95 dans le cas où les éléments majeurs sont transformés en log ratio centré et de 0,93 dans le cas où les données ne sont pas transformées (Fig. 5.2 A et B). C'est donc dire que la méthode

des RF permet une excellente estimation du Na avec la géochimie traditionnelle : le Na estimé par l'algorithme corrèle très bien avec le sodium réellement mesuré.

Outre une légère différence dans la corrélation, l'analyse de l'importance des variables utilisées pour cette première étape révèle également une différence. Dans le cas où les éléments majeurs sont transformés en LRC le magnésium est clairement la variable ayant le plus d'influence (57%) suivie de loin par le fer (10%) (Fig. 5.3 A). On peut donc interpréter que la chloritisation des rhyolites amène à la fois un gain en Mg et un lessivage du Na (Chapitre 2), même s'il n'y a pas de relation linéaire simple entre Mg et Na. Dans le cas où les variables ne sont pas transformées, le strontium est l'élément le plus influent (35%) puis le fer (13%), tandis que le MgO est seulement le 10^{ème} élément le plus important (Fig. 5.3 B). Le Sr est un élément contenu notamment dans les plagioclases, susceptibles d'être détruits lors de l'altération. Tandis que le fer, comme le Mg, est apporté par la chloritisation des rhyolites.

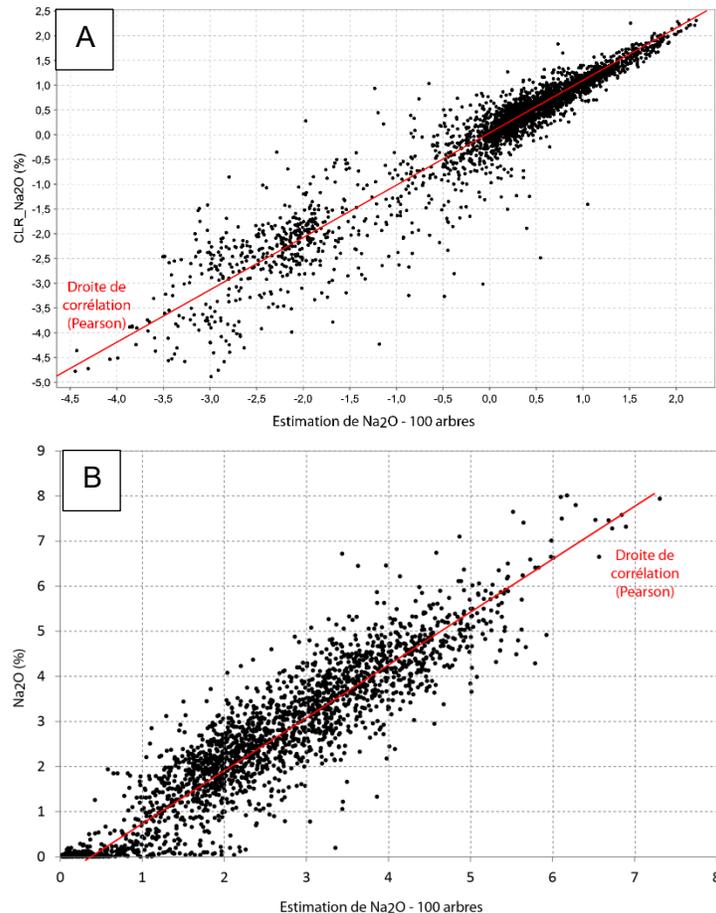


Figure 5.2 : Étape 1. Comparaison de l'estimation du sodium avec la méthode RF (axe horizontal), en fonction du sodium réellement mesuré (axe vertical). Résultat du sous-ensemble test (n=2763), $n_{\text{variable}}=18$. Données géochimiques de Glencore (secteurs Bracemac et McLeod, années 2004 à 2014). Le coefficient de corrélation calculé est celui de Pearson. A : Données transformées en log ratio centré (LRC). B : Données non transformées.

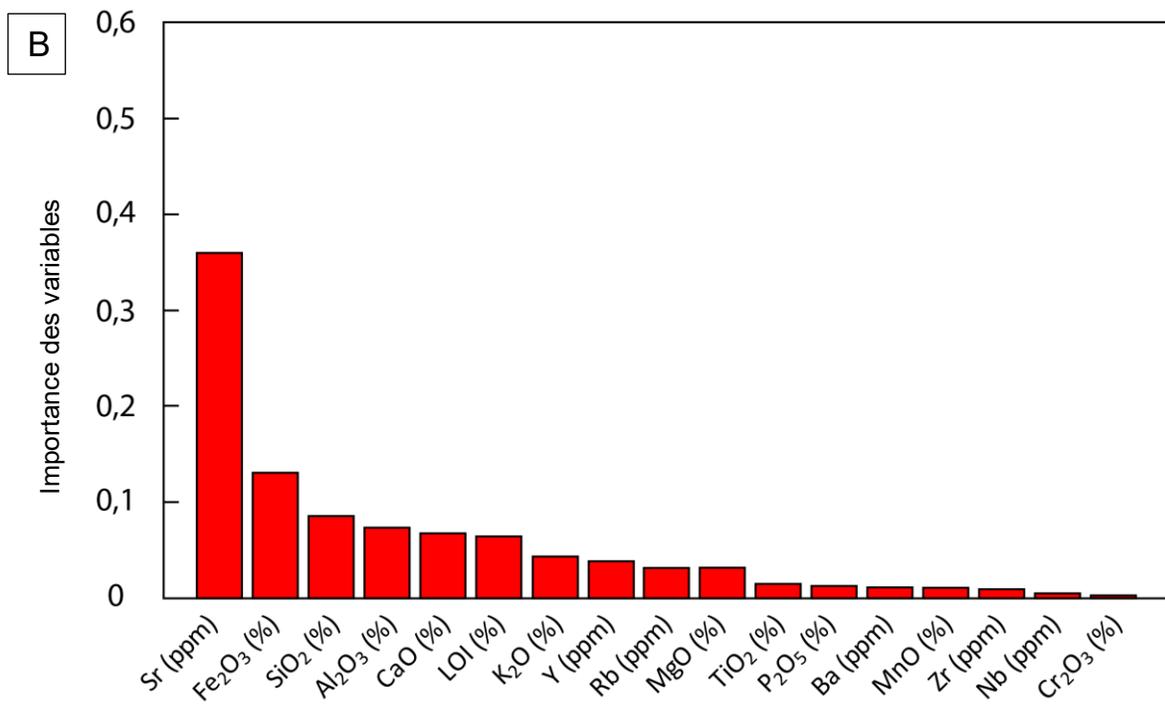
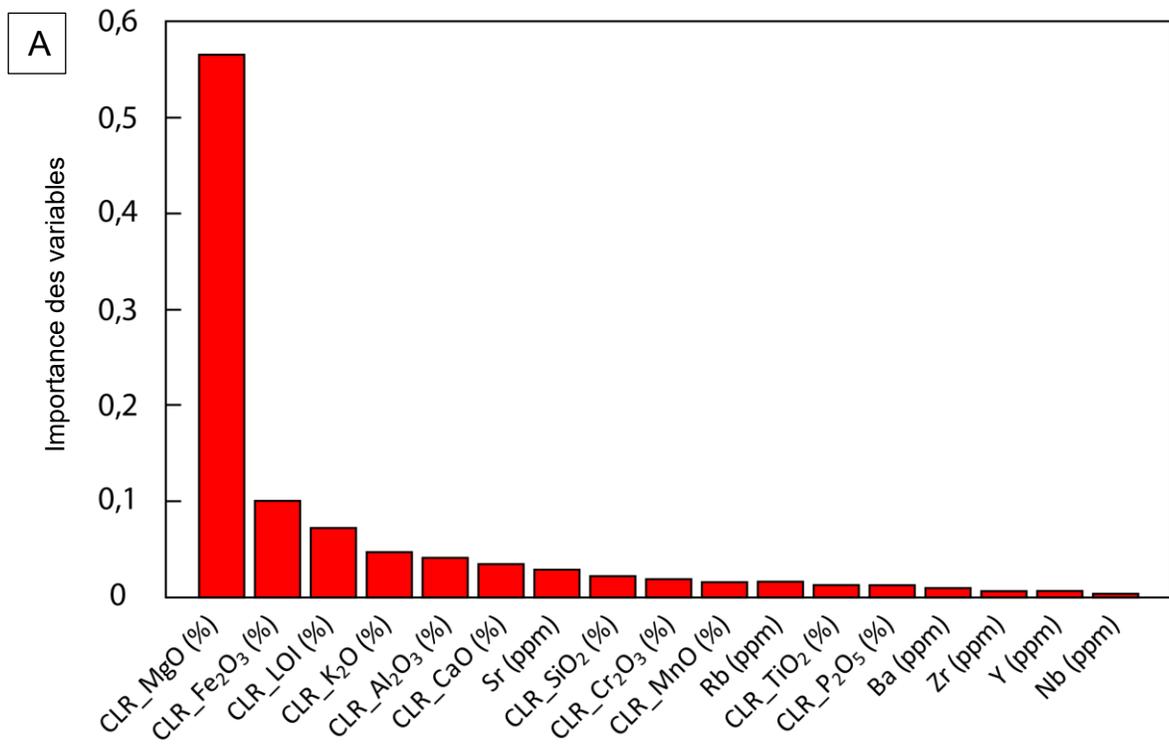


Figure 5.3 : Étape 1. Importance des variables pour l'estimation du sodium avec les données géochimiques de Glencore, dans le cas des 314 forages. $n_{\text{variable}}=18$. A : Données transformées en log ratio centré (LRC). B : Données non transformées.

5.1.2 Test de l'apprentissage automatique pour l'estimation du sodium avec les données géochimiques de Glencore puis du LAMROC, de neufs forages choisis

Le même processus d'estimation est réalisé sur les données géochimiques de Glencore prises uniquement sur les neuf forages sélectionnés pour l'étude. Puis, afin de vérifier l'apport d'un nombre de variables diversifiées et de données plus important sur les résultats de l'algorithme, le même exercice est effectué avec les données du LAMROC.

Étape 2 A : données géochimiques de Glencore – 260 mesures, 18 variables (A)

Les données acquises par Glencore sur les neuf forages représentent 260 mesures de géochimie. Dans un premier temps, les variables utilisées regroupent les mêmes éléments que ceux utilisés précédemment pour comparaison, soit $n_{\text{variable}}=18$. Les données sont divisées aléatoirement pour former l'ensemble d'entraînement ($n_{\text{entraînement}}=173$) et l'ensemble test ($n_{\text{test}}=87$).

Les résultats montrent une corrélation de 0,84 (Fig. 5.4). Contrairement à l'estimation du sodium dans le cas des 314 forages du secteur Bracemac-McLeod, dans le cas des neuf forages, la « perte au feu » (*Loss on Ignition*, LOI), qui correspond à la perte de masse résultant de l'échauffement d'un matériau, et le strontium, sont les variables les plus influentes (31% et 25% respectivement) pour l'algorithme (Fig. 5.5). Dans le cas de la perte au feu, elle corrèle généralement avec l'altération hydrothermale dans les roches au faciès schiste vert, une roche fraîche ayant typiquement une perte au feu plus faible qu'une roche altérée. On peut donc penser qu'une perte au feu plus élevée correspond à un lessivage du Na, la variable recherchée.

Une autre différence observée est l'importance plus homogène des variables par l'algorithme dans le cas des neuf forages. En effet, la variable la plus influente l'est seulement à 31%, tandis que dans le cas des 314 forages, elle est de 57%, loin devant la suivante à 10%.

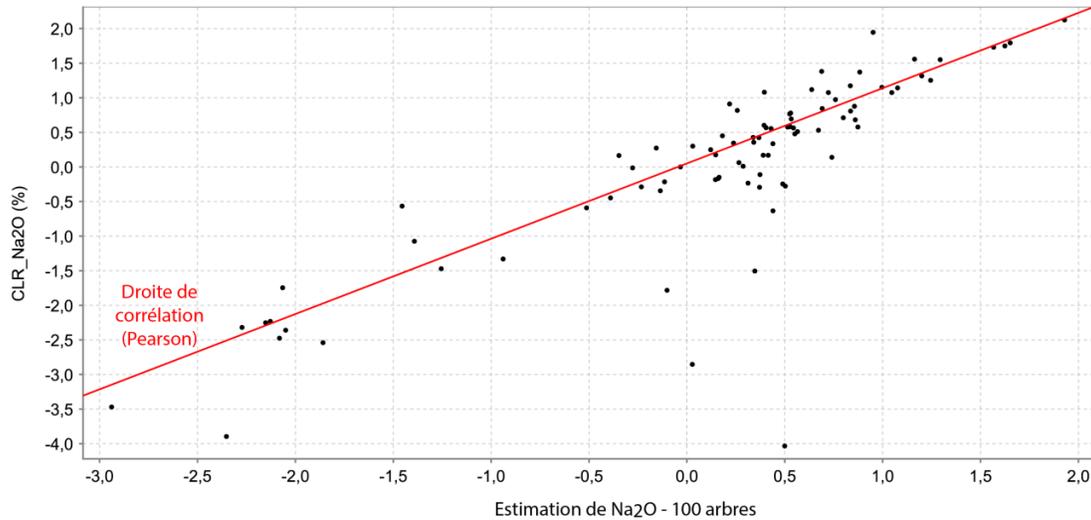


Figure 5.4 : Étape 2 A. Comparaison de l'estimation du sodium avec la méthode RF (axe horizontal), en fonction du sodium réellement mesuré (axe vertical). Pour les deux axes, le Na est transformé en LRC. Résultat du sous-ensemble test (n=87), $n_{\text{variable}}=18$. Données géochimiques de Glencore pour les neuf forages sélectionnés (secteurs McLeod). Le coefficient de corrélation calculé est celui de Pearson.

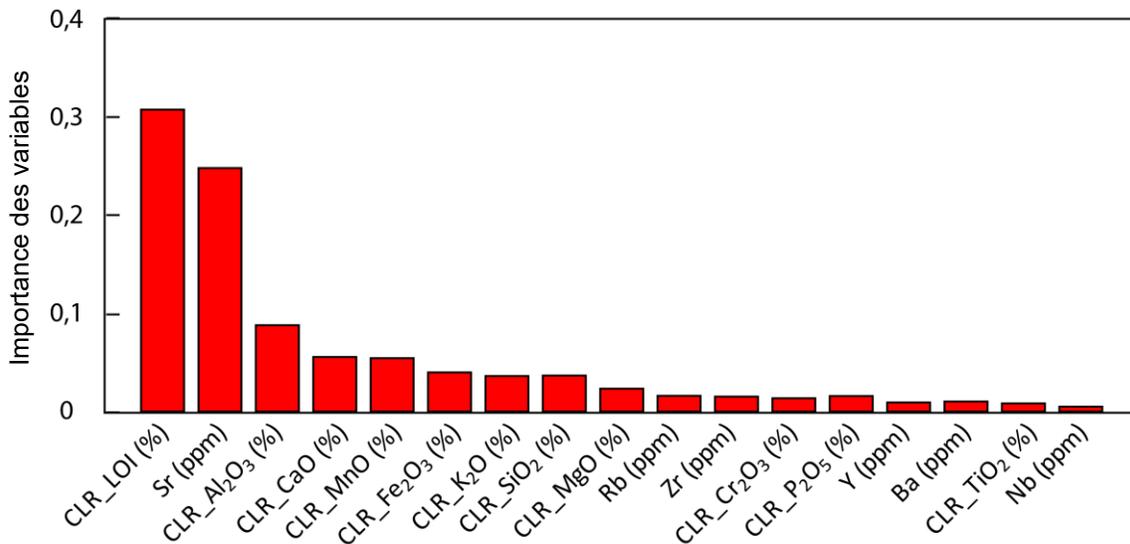


Figure 5.5 : Étape 2 A. Importance des variables pour l'estimation du sodium avec les données géochimiques de Glencore, pour les neuf forages sélectionnés. $n_{\text{variable}}=18$.

Étape 2 B : données géochimiques de Glencore – 260 mesures, 20 variables (B)

Pour les mêmes ensembles de données d'entraînement et de test, deux variables sont ajoutées pour estimer le sodium, soit le cuivre et le zinc, car ces deux éléments ont été analysés pour chaque échantillon des neuf forages ($n_{\text{variable}}=20$).

Les résultats montrent une corrélation de 0,83 (Fig. 5.6). L'histogramme de la figure 5.7 montre une répartition de l'influence des variables légèrement différentes puisque les éléments

Cu et Zn entrent en jeu. Cependant le LOI et le Sr restent les variables les plus influentes (30% et 24% respectivement).

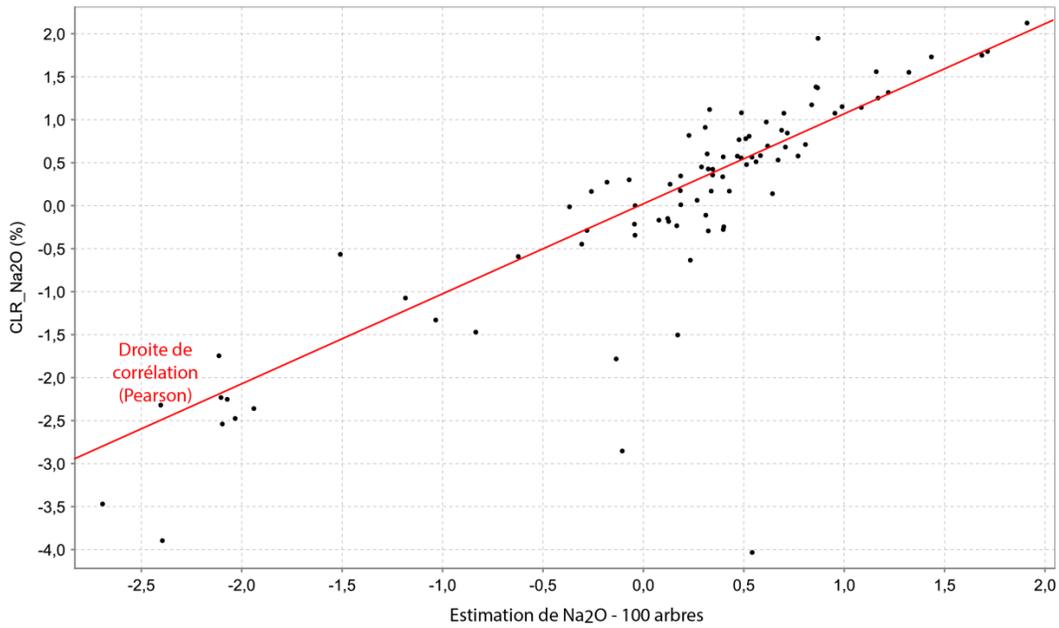


Figure 5.6 : Étape 2 B. Comparaison de l'estimation du sodium avec la méthode RF (axe horizontal), en fonction du sodium réellement mesuré (axe vertical). Pour les deux axes, le Na est transformé en LRC. Résultat du sous-ensemble test (n=87), $n_{\text{variable}}=20$. Données géochimiques de Glencore pour les neuf forages sélectionnés (secteurs McLeod). Le coefficient de corrélation calculé est celui de Pearson.

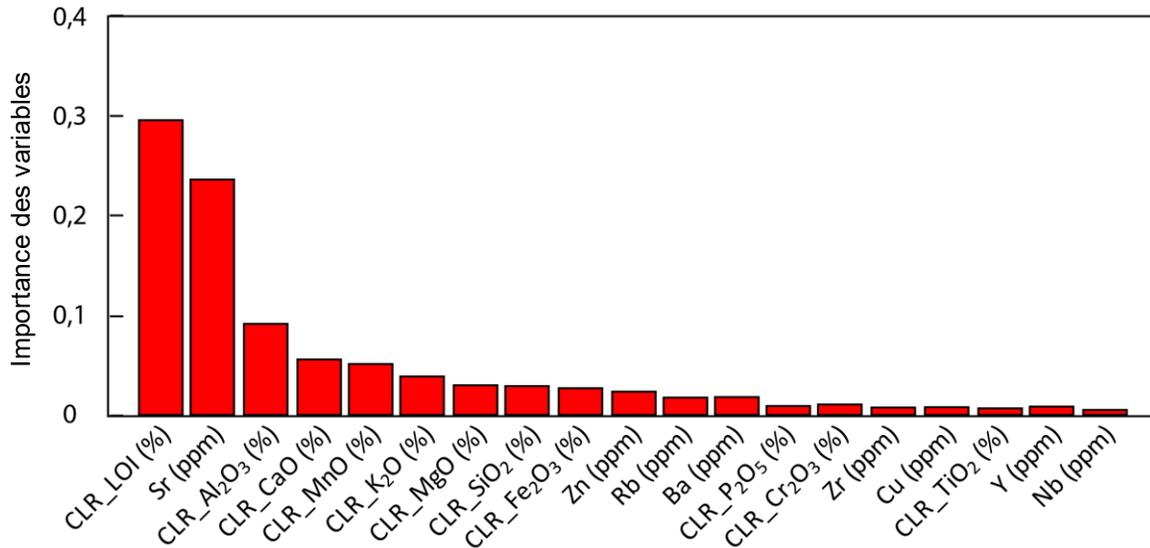


Figure 5.7 : Étape 2 B. Importance des variables pour l'estimation du sodium avec les données géochimiques de Glencore, pour les neuf forages sélectionnés. $n_{\text{variable}}=20$.

Étape 3 : données géochimiques de Glencore – variation des ensembles d’entraînement et test

En gardant les mêmes variables que précédemment ($n_{\text{variable}}=20$) et en faisant varier les ensembles d’entraînement et test, trois ensembles aléatoires sont créés, A, B et C. Les résultats de corrélation et d’importance des variables varient. Ce constat est le même en utilisant la transformation en LRC ou non (Figs. 5.8 et 5.9). On remarque également que pour chaque même ensemble d’entraînement et donc respectivement pour chaque même ensemble test, une meilleure corrélation n’est pas systématique en utilisant les LRC (cf. ensembles aléatoires C).

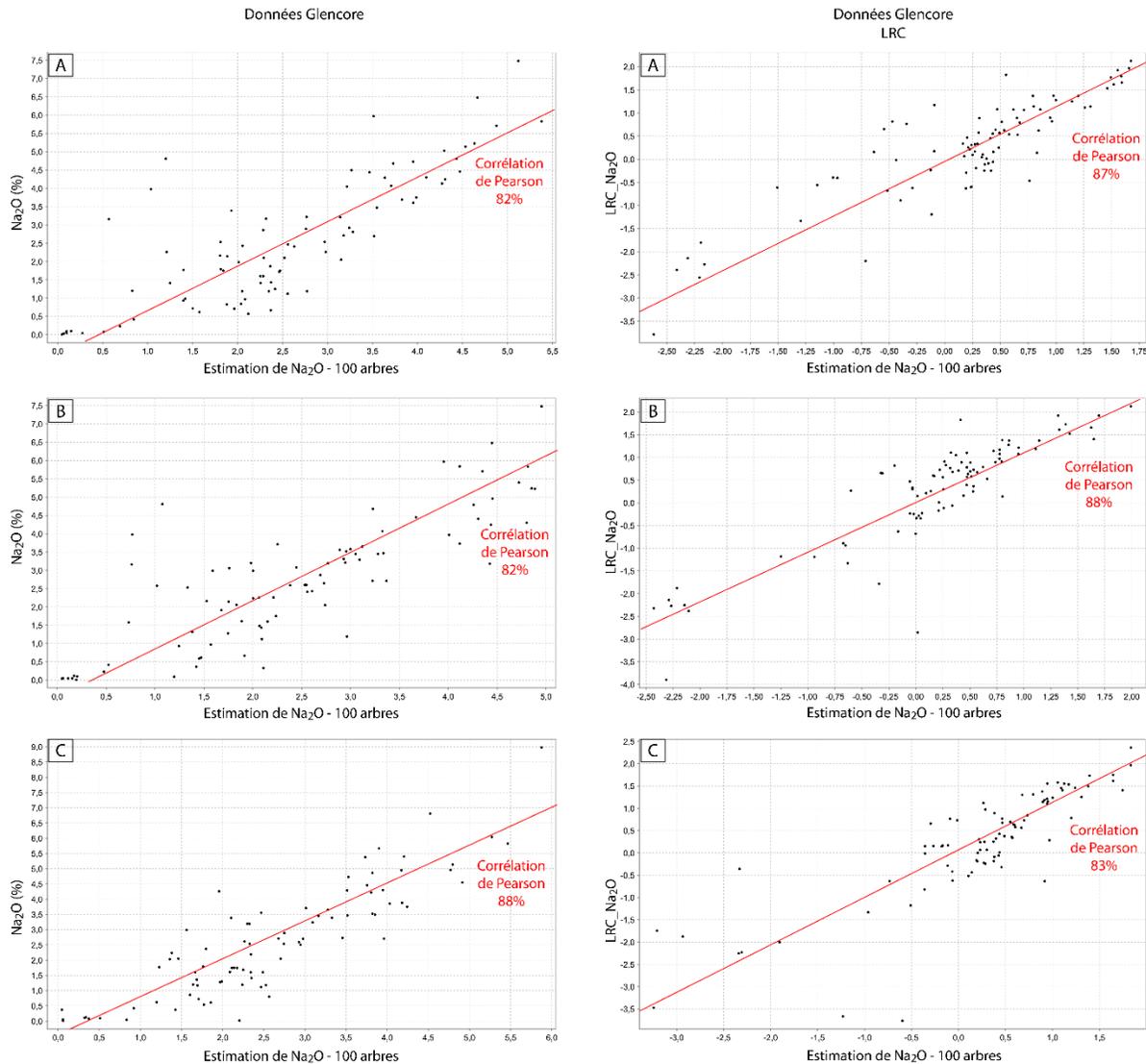


Figure 5.8 : Étape 3. Comparaison de l’estimation du sodium avec la méthode RF (axe horizontal), en fonction du sodium réellement mesuré (axe vertical), pour 3 ensembles aléatoires différents (A, B et C). À gauche, données brutes, à droite, éléments majeurs en LRC. Résultat du sous-ensemble test ($n=87$), $n_{\text{variable}}=20$. Données géochimiques de Glencore pour les neuf forages sélectionnés (secteurs McLeod). Le coefficient de corrélation calculé est celui de Pearson.

Dans le cas de l'utilisation des données brutes de Glencore, le strontium est la variable la plus influente (30%), c'est également le cas dans avec l'ensemble C lors de l'utilisation des données en LRC (colonne de droite). L'importance des variables suivantes varie d'un ensemble aléatoire à l'autre. Lors de l'utilisation des données géochimiques brutes (colonne de gauche), les résultats de corrélation des ensembles B et C sont respectivement 0,82 et 0,88, pourtant les six premiers éléments en importance sont les mêmes (Fig. 5.9).

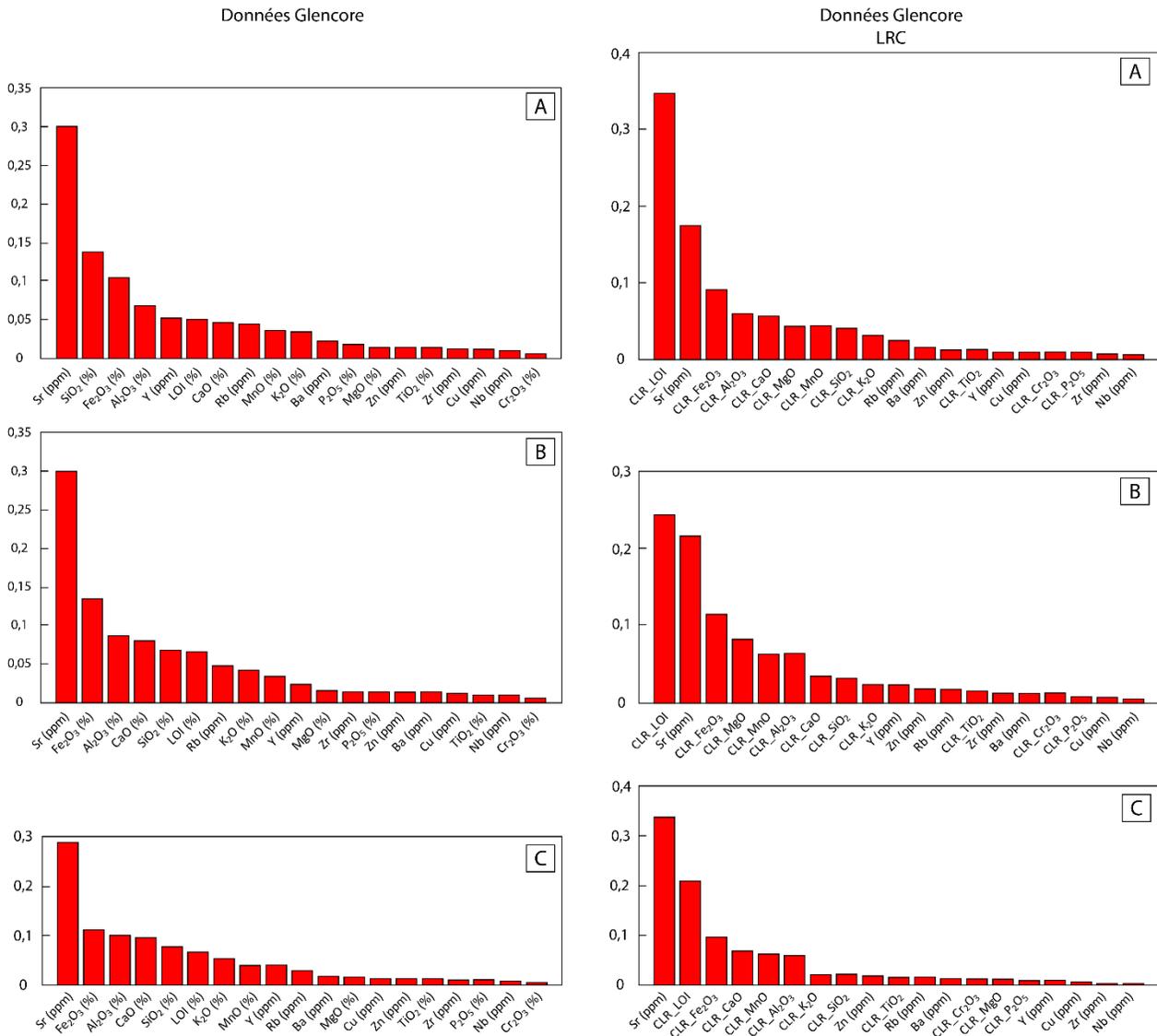


Figure 5.9 : Étape 3. Importance des variables pour l'estimation du sodium avec les données géochimiques de Glencore, pour les neuf forages sélectionnés. $n_{\text{variable}}=20$, pour trois ensembles aléatoires différents (A, B et C). À gauche, données brutes, à droite, éléments majeurs en LRC. Axe vertical : importance des variables.

Étape 4 : test de l'apprentissage automatique pour l'estimation du sodium avec les données multiparamétriques du LAMROC – variation des variables et des ensembles d'entraînement et test

Dans les cas des données du LAMROC, pour réaliser l'ensemble d'entraînement, il est nécessaire de connaître la concentration en sodium en certains points. Pour cela, l'auteure a lié les points de mesures pris avec le LAMROC (n'ayant pas la mesure du sodium) avec les points de mesures géochimiques de Glencore les plus proches (ayant la mesure du sodium)⁵. C'est-à-dire qu'on travaille avec les données du LAMROC, mais on y greffe le Na des données de géochimie traditionnelle, afin de pouvoir entraîner l'algorithme. Ceci donne donc un total de 260 mesures, pour les neuf forages étudiés.

Afin de vérifier la précision de l'estimation du sodium, les données sont divisées aléatoirement en deux sous-ensembles : un ensemble d'entraînement correspondant à 2/3 des mesures, prises aléatoirement ($n_{\text{entraînement}}=173$) et permettant l'apprentissage de l'algorithme, et un ensemble test pour lequel les données de Na ont été mises de côté à des fins de validation. Cet ensemble regroupe les 1/3 de données restantes ($n_{\text{test}}=87$).

Les trois mêmes ensembles d'entraînement et de test que précédemment ont été utilisés (soit A, B et C). Pour chaque ensemble, l'algorithme est d'abord incrémenté avec toutes les variables mesurées par le LAMROC ($n_{\text{variable}}=20$), incluant la géochimie (Al_2O_3 ; CaO; Cr; Fe_2O_3 ; K_2O ; MgO; MnO; Nb; Ni; SiO_2 ; TiO_2), la réflectance moyenne (lumière visible), les propriétés physiques (densité, susceptibilité magnétique) et la minéralogie proche infrarouge. Pour la minéralogie, les variables « groupe 1 » et « groupe 2 » se référant aux groupes de minéraux principaux et secondaires ont été utilisées, car elles n'ont pas besoin de traitement préalable. Puis l'algorithme est utilisé avec toutes les variables, mais en transformant les éléments majeurs (dont le sodium) en LRC ($n_{\text{variable}}=20$) et enfin en enlevant les éléments chimiques ayant plus de 10% du nombre de données inférieur à la limite de détection de l'élément ($n_{\text{variable}}=13$). Les résultats de corrélation et les histogrammes d'importance des variables sont synthétisés dans les deux figures suivantes (Figs. 5.10 et 5.11).

Dans tous les cas, la variation des ensembles aléatoires d'entraînement et de test donne des résultats de corrélation différents, mais du même ordre de grandeur (variation de 0,66 à 0,75). La transformation en LRC des éléments majeurs et la suppression des éléments ayant plus de 10% de données sous la limite de détection n'augmentent pas systématiquement la corrélation.

⁵ Il n'était pas possible d'avoir le Na de la géochimie traditionnelle exactement au même endroit que l'analyse du LAMROC, puisque la géochimie traditionnelle, faite dans ce cas avant l'analyse XRF portable, détruit l'échantillon.

La variable la plus influente est le strontium (30-40%), suivi de la densité (10-18%), excepté dans le cas de l'utilisation des LRC des éléments majeurs, pour l'ensemble aléatoire B, où l'aluminium est le deuxième élément le plus important (15%). Il est intéressant de noter que les deux propriétés physiques, densité et susceptibilité magnétique, sont typiquement parmi les dix variables les plus importantes, et parfois parmi les cinq plus importantes, pour estimer le Na (

Figure 5.11). L'ajout de ces variables non géochimiques aide donc à l'estimation d'une variable géochimique. Par contre, la minéralogie infrarouge telle qu'utilisée présentement semble peu utile, puisque le poids des variables minéralogiques est très faible dans le calcul du Na estimé. On verra toutefois plus loin dans le chapitre qu'il existe un lien entre la géochimie et la minéralogie infrarouge.

D'un point de vue général, avec les points de données quasi similaires ($n_{\text{total}}=260$, sur les mêmes neuf forages), l'utilisation des données du LAMROC montre une moins bonne corrélation que l'utilisation des données géochimiques de Glencore (cf. Figure 5.8 et Figure 5.10). Les raisons sont discutées au chapitre suivant.

Répétition de l'algorithme pour un même ensemble d'entraînement et de test

L'algorithme a été répété 30 fois sur un même ensemble d'entraînement et de test. Dans le cas des données de Glencore transformées en LRC sur les 314 forages du secteur Bracemac-McLeod (8287 mesures), la répétition a systématiquement donné 95% de corrélation. Dans le cas des données de Glencore sur les neuf forages (260 mesures), l'exercice a été effectué sur l'ensemble B avec les données transformées en LRC. Les résultats donnent une corrélation de 0,86 à 0,89 avec une moyenne de 0,88. Finalement, avec les données du LAMROC, également sur l'ensemble B avec les données transformées en LRC, les résultats varient entre 0,72 et 0,75 avec une moyenne de 0,74. Soit dans les deux derniers cas, une variation de 0,4.

Pour un même ensemble d'entraînement et donc test, si on répète plusieurs fois l'algorithme (ici 30 fois), plus on a de données, moins le coefficient de corrélation varie.

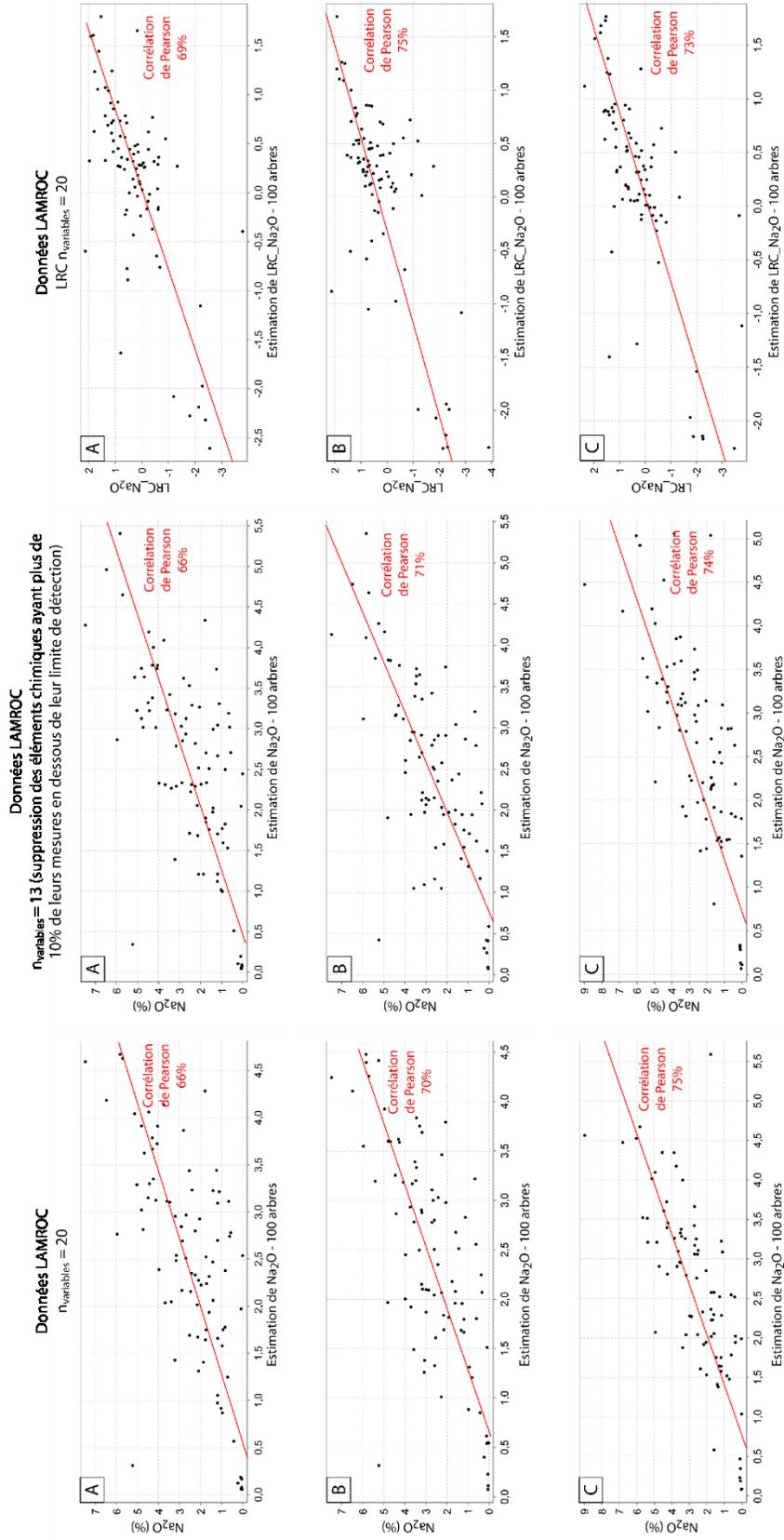


Figure 5.10 : Étape 4. Comparaison de l'estimation du sodium avec la méthode RF (axe horizontal), en fonction du sodium réellement mesuré (axe vertical), pour 3 ensembles aléatoires différents (A, B et C). À gauche, données brutes ($n_{\text{variable}}=20$); au milieu, $n_{\text{variable}}=13$ (suppression des éléments chimiques ayant plus de 10% de leurs mesures en dessous de leur limite de détection); à droite, éléments majeurs en LRC $n_{\text{variable}}=20$. Résultat du sous-ensemble test ($n=87$). Le coefficient de corrélation calculé est celui de Pearson.

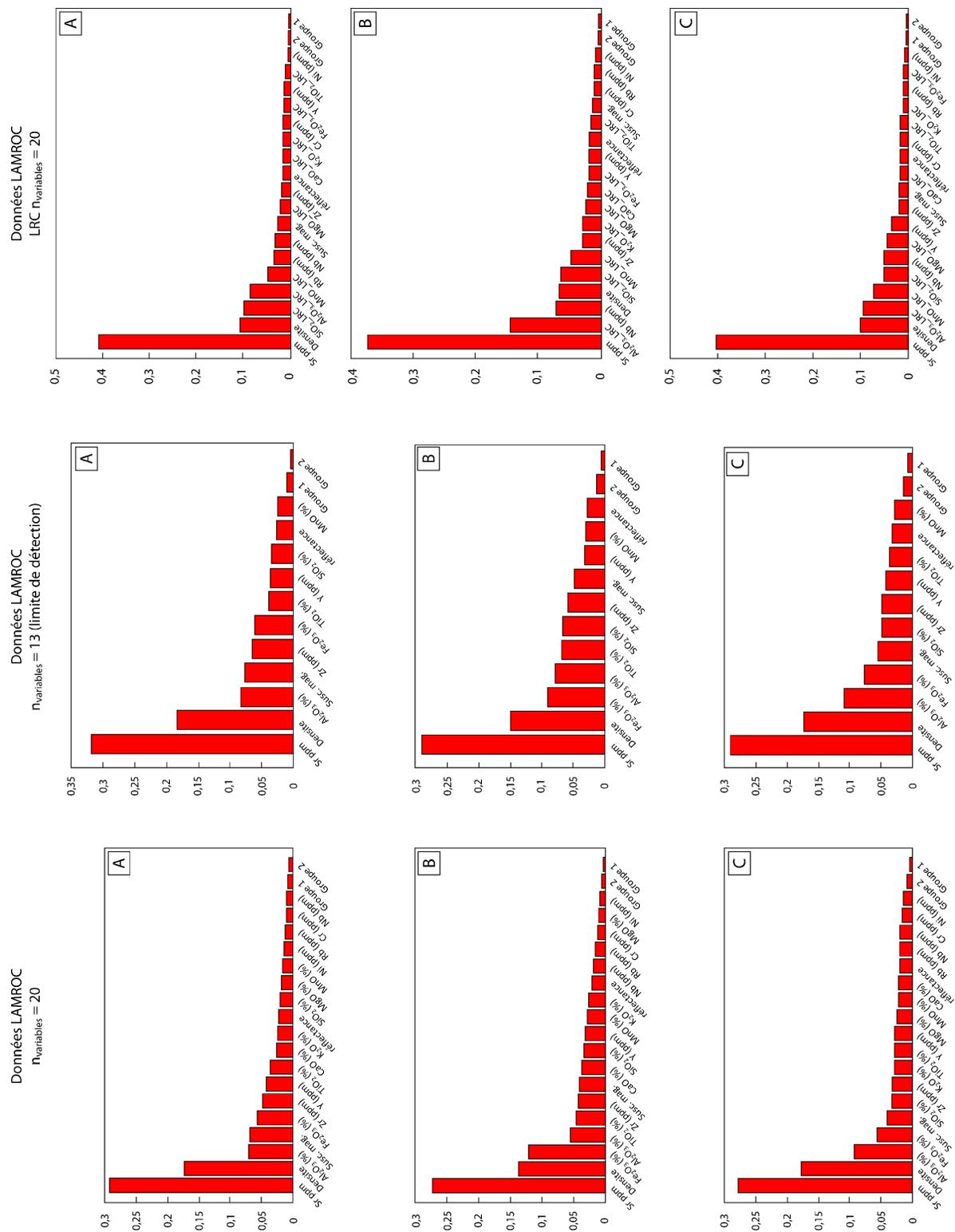


Figure 5.11 : Étape 4. Importance des variables pour l'estimation du sodium avec les données géochimiques du LAMROC, pour les neuf forages sélectionnés, pour trois ensembles aléatoires différents (A, B et C). Colonne 1, données brutes ($n_{\text{variable}}=20$); colonne 2, $n_{\text{variable}}=13$ (suppression des éléments chimiques ayant plus de 10% de leurs mesures en dessous de leur limite de détection); colonne 3, éléments majeurs en LRC $n_{\text{variable}}=20$. Axe vertical : importance des variables.

5.1.3 Étape 5 : résultats de l'apprentissage automatique pour l'estimation du sodium avec les données du LAMROC

La méthode des RF pour l'estimation du sodium est validée avec les données de géochimie traditionnelle (Section 5.1.1). Un test concluant a également été réalisé sur les points de mesures du LAMROC à proximité des données de géochimie traditionnelle, sur les neuf forages sélectionnés (Section 5.1.2). Il est donc possible d'étendre l'analyse par la méthode des RF à tous les points de mesures récoltées avec le LAMROC.

N'ayant pas vu de grosse différence entre l'utilisation ou non de toutes les variables, ou entre la transformation ou non en LRC, l'algorithme a été utilisé avec l'ensemble des variables mesurées par le LAMROC et sur les données brutes, afin de simplifier par la suite les calculs d'indice d'altération ($n_{\text{variable}}=20$). L'ensemble d'entraînement est composé des 260 points de mesure du LAMROC avec le Na connu (où le Na est de nouveau « emprunté » aux mesures de géochimie traditionnelle adjacentes). L'algorithme a ensuite été appliqué à l'ensemble de prédiction correspondant à toutes les mesures effectuées par le LAMROC, c'est-à-dire les mesures ne contenant que les données du LAMROC en plus des 260 données de l'ensemble d'entraînement, soit 9675 mesures.

Les résultats d'estimation de la concentration du sodium sont présentés sous forme de graphique pour chacun des neuf forages, en fonction de leur profondeur (Figs. 5.12, 5.13 et 5.14). Les données d'analyse géochimique de Glencore ont été mises en rouge et l'estimation de la concentration en Na avec les données du LAMROC en bleu. Les données d'estimation ont été lissées en faisant une moyenne mobile sur trois données. Se référer au tableau 3.1 pour les références de couleur et codes lithologiques.

Les graphiques montrent une bonne correspondance générale entre le sodium mesuré par géochimie traditionnelle et son estimation à partir des données du LAMROC. L'avantage de la quantité importante de données fournie par le LAMROC est de pouvoir observer les tendances là où il n'y a pas d'information de géochimie traditionnelle, c'est-à-dire sur plus de 99% de la longueur de la carotte, en assumant un échantillon d'une longueur moyenne de 20 cm sur un intervalle d'échantillonnage de 30 m pour la géochimie traditionnelle.

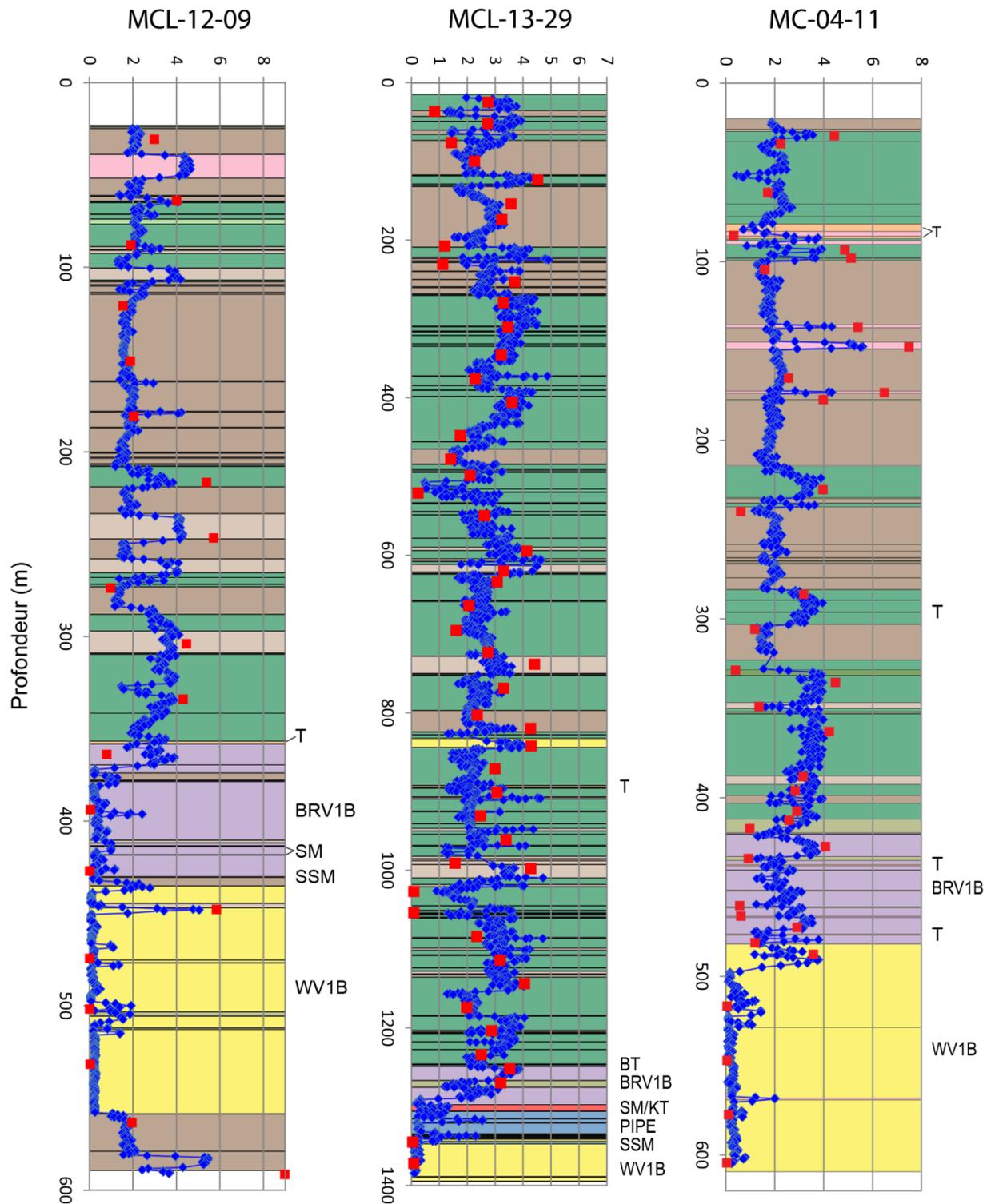


Figure 5.12 : En bleu, estimation du sodium (Na_2O , %) avec les données du LAMROC, en rouge données géochimiques de Glencore, en fonction de la profondeur des forages MCL-12-09, MCL-13-29 et MC-04-11.

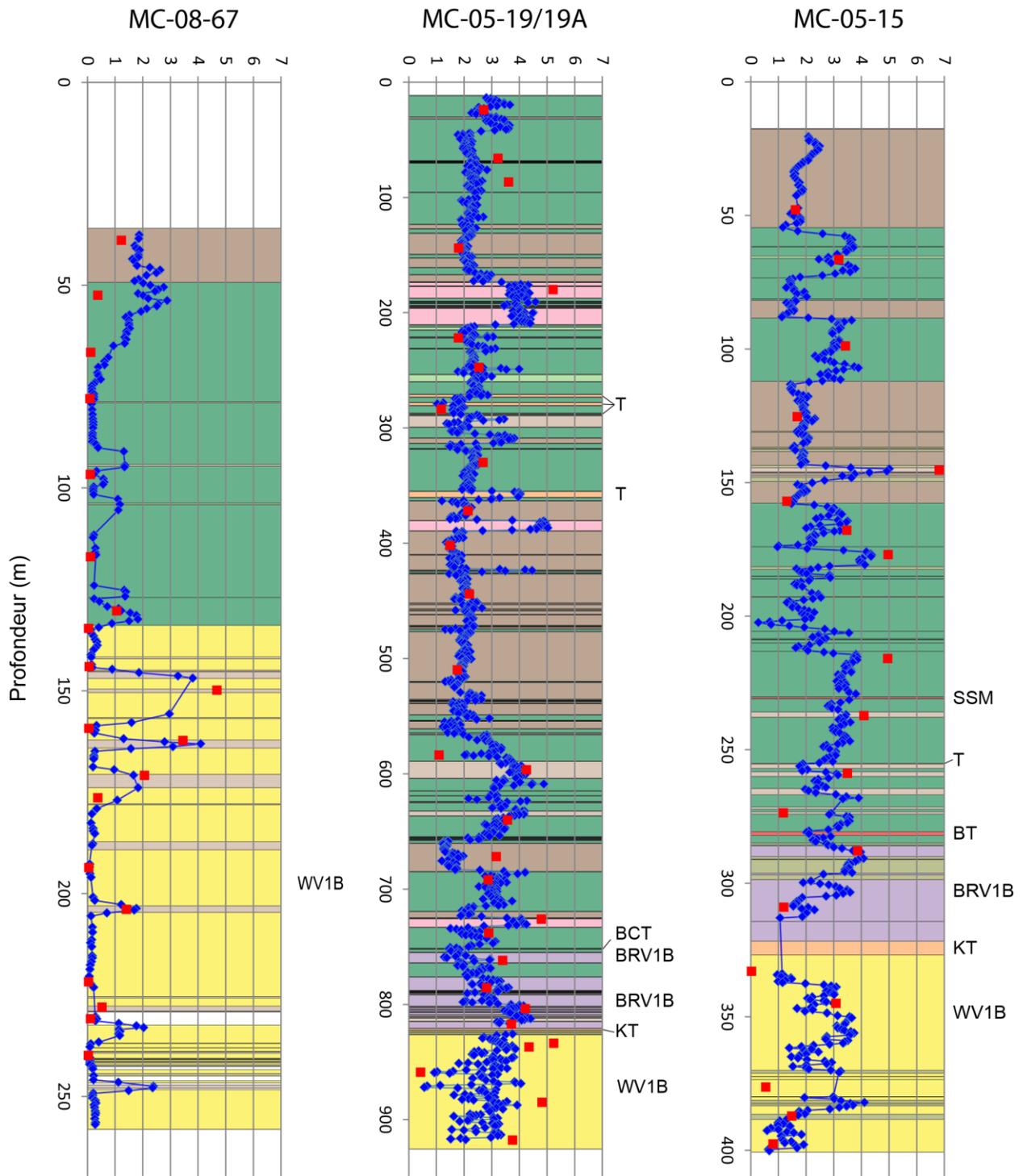


Figure 5.13 : En bleu, estimation du sodium (Na₂O, %) avec les données du LAMROC, en rouge données géochimiques de Glencore, en fonction de la profondeur des forages MC-08-67, MC-05-19/19A et MC-05-15.

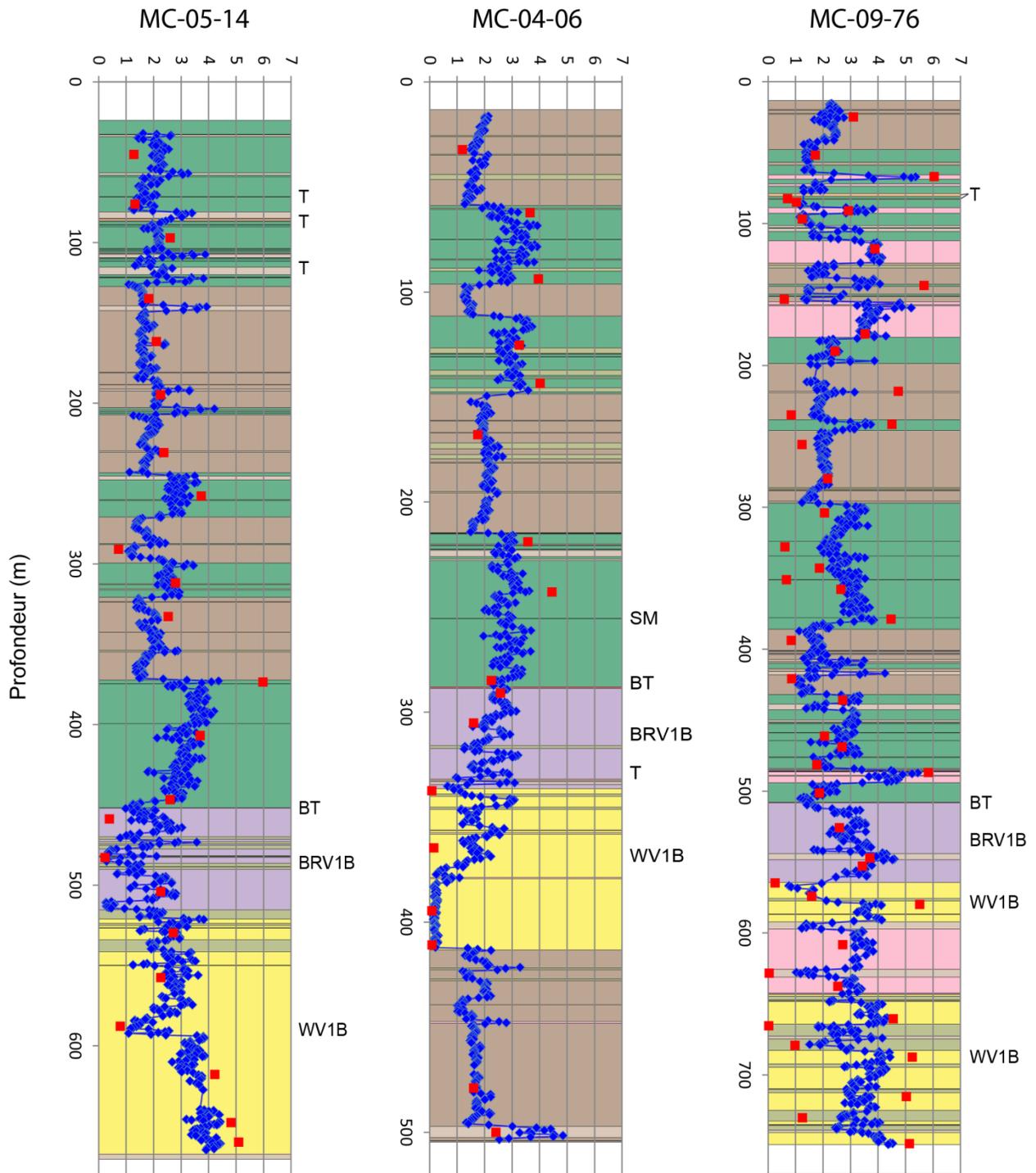
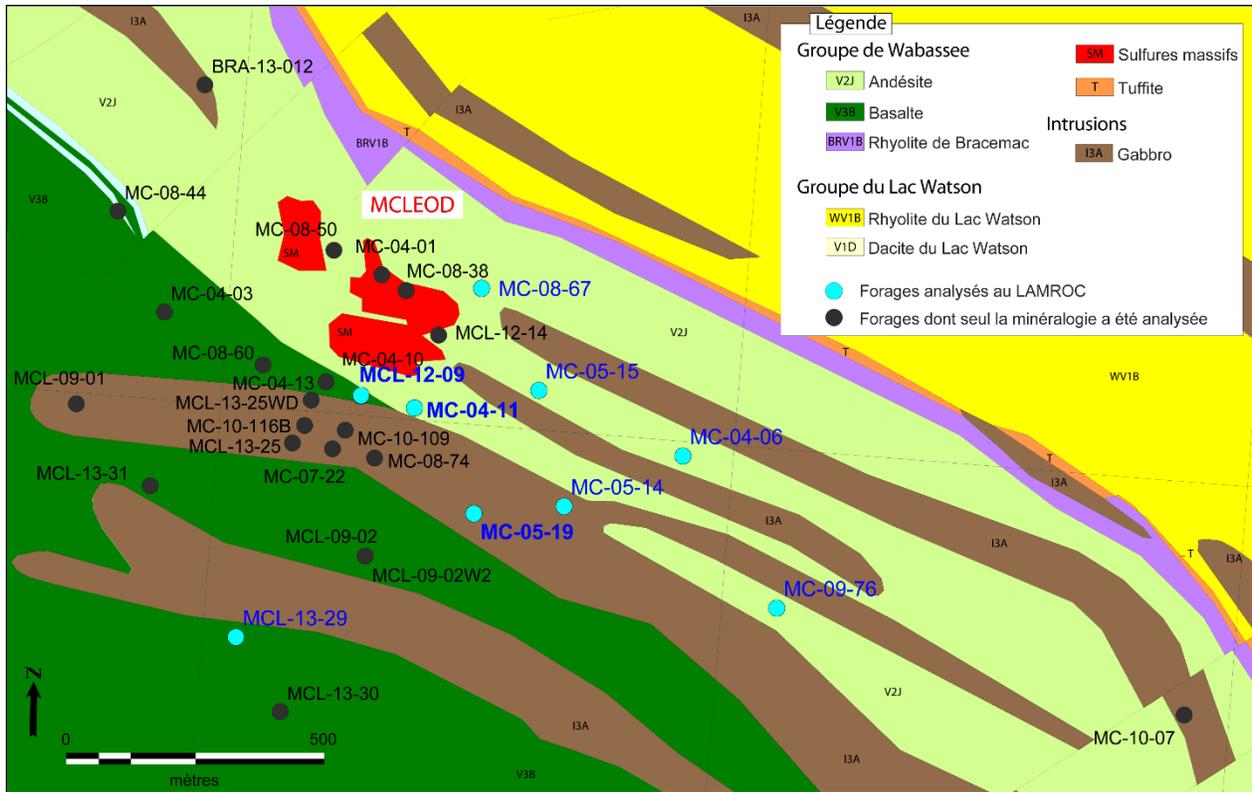


Figure 5.14 : En bleu, estimation du sodium (Na₂O, %) avec les données du LAMROC, en rouge données géochimiques de Glencore, en fonction de la profondeur des forages MC-05-14, MC-04-06 et MC-09-76.

5.2 Vecteur d'exploration - Interprétation des variations de la concentration estimée en sodium

L'apport important de données et en particulier la concentration en sodium permet de voir des variations le long des forages et latéralement en fonction de la distance à la minéralisation. Afin de pouvoir modéliser ces variations, les neuf forages choisis sont répartis autour du gisement McLeod (Fig. 5.15).



5.2.1 Variation de la concentration en sodium en forage

Les rhyolites qui nous intéressent (violet pour le Rhyolite de Bracemac et jaune pour la Rhyolite du Lac Watson sur les figures 5.12, 5.13 et 5.14) sont fortement chloritisées, en particulier lorsque la minéralisation en sulfures est présente. Cette altération entraîne la destruction des plagioclases et donc la perte de Na. La séricitisation, plus distale, s'accompagne aussi d'une destruction des plagioclases (Large et al., 2001). On s'attend donc à voir un large halo de faibles valeurs de Na dans les rhyolites autour du gisement (ex. Gifkins et al., 2005).

Pour les forages traversant la lentille McLeod (MCL-12-09 et MCL-13-29), la concentration en Na diminue progressivement vers le bas dans la Rhyolite de Bracemac, au-dessus de la minéralisation, jusqu'à être proche de zéro dans la Rhyolite du Lac Watson et la Rhyolite de Bracemac (MCL-12-09 entre 340 et 550 m de profondeur et MCL-13-29, à environ 1300 m).

Les forages MC-04-11 et MC-08-67 passent près de la minéralisation (Figs. 5.15 et 5.16) et la concentration en sodium est alors proche de zéro, principalement dans la Rhyolite du Lac Watson, soit entre 500 et 600 m de profondeur pour MC-04-11 et à partir de 180 m de profondeur dans le forage MC-08-67.

Les valeurs de Na localement plus élevées dans la Rhyolite du Lac Watson, pour ces quatre premiers forages, s'expliquent entre autres par la présence de dykes mafiques ou intermédiaires (en brun et vert, dans les rhyolites, sur les figures 5.12 et 5.13), dont certains pourraient s'être mis en place après la phase d'altération hydrothermale et de minéralisation.

Dans les cinq autres forages, situés loin de la lentille McLeod (200-600 m), on ne remarque pas de valeurs de Na estimé proches de zéro, sauf dans MC-04-06 vers 450 m. Ceci montre que les roches plus distales à la lentille McLeod sont généralement moins altérées. La raison de l'anomalie en Na dans MC-04-06 n'est pas connue.

En mettant en lien les variations de la concentration en sodium et la minéralogie, on peut observer une corrélation entre la perte en sodium et les variations de micas blancs et chlorites (pourcentage du minéral et composition du minéral). Le forage MCL-12-09 est le plus significatif (Fig. 5.17) avec la diminution du sodium entre 340 et 440 m qui correspond au passage du pôle phengitique à muscovitique de 340 à 360 m, soulignant la Tuffite de Bracemac, et de 360 à 410 m au-dessus de la minéralisation. La zone à faible Na, correspondant dans ce forage à presque toute la Rhyolite de Bracemac et toute la Rhyolite du Lac Watson, est associée à un mica blanc muscovitique⁶, lorsque détecté. De part et d'autre de la minéralisation, le mica blanc n'est pas détecté et la chlorite, qui domine alors l'assemblage d'altération, semble plus ferrifère⁷.

Dans les forages situés loin de la minéralisation, la zone anomalique en Na n'est pas visible (cette étude), et le mica blanc est moins muscovitique, c.-à-d. que la longueur d'onde du pic Al-OH est plus élevée en moyenne (Ross et Bourke, en prép.). Ceci est montré à l'annexe 2. Dans le forage MC-04-11, en plus de la perte en sodium observée à 500 m et soulignée par la

⁶ Le lien entre la composition chimique des micas blancs et la longueur d'onde du pic Al-OH a été validé pour Matagami grâce à des mesures à la microsonde (P.-S. Ross et A. Bourke, article en préparation).

⁷ Les variations apparentes de la composition des chlorites, interprétées de façon préliminaire à partir de certains pics du spectre infrarouge, n'ont pas encore été validées par des mesures à la microsonde.

variation des micas blancs du pôle phengitique à muscovitique, la minéralogie met en évidence la même variation de micas blancs observée au-dessus de la Tuffite de Bracemac et des sulfures massifs que dans le forage MCL-12-09, de 410 à 450 m (Annexe 2).

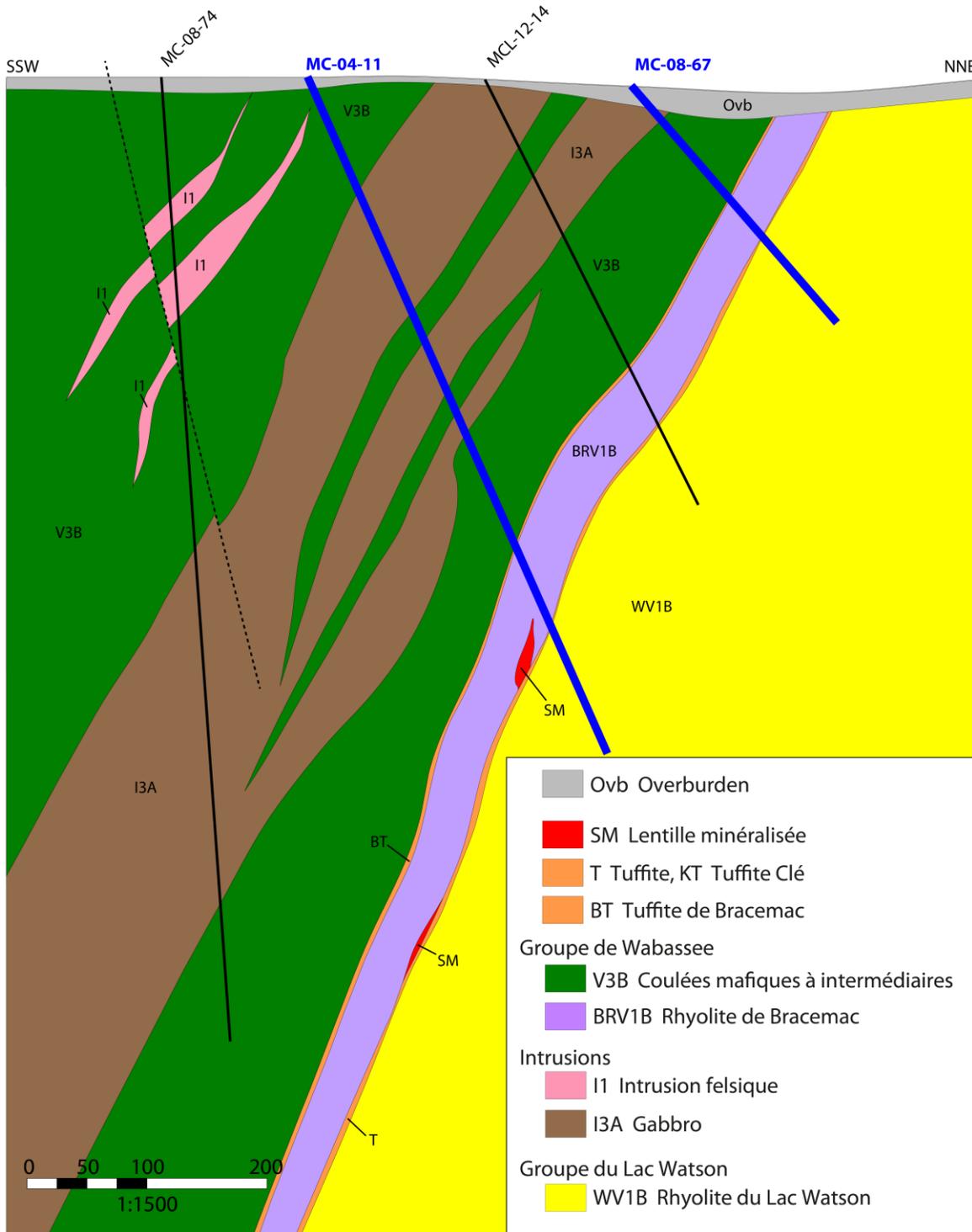


Figure 5.16 : Section verticale passant par en bordure de la lentille McLeod, montrant la séquence géologique du secteur, et en bleu les forages MC-04-11 et MC-08-67, étudiés au LAMROC.

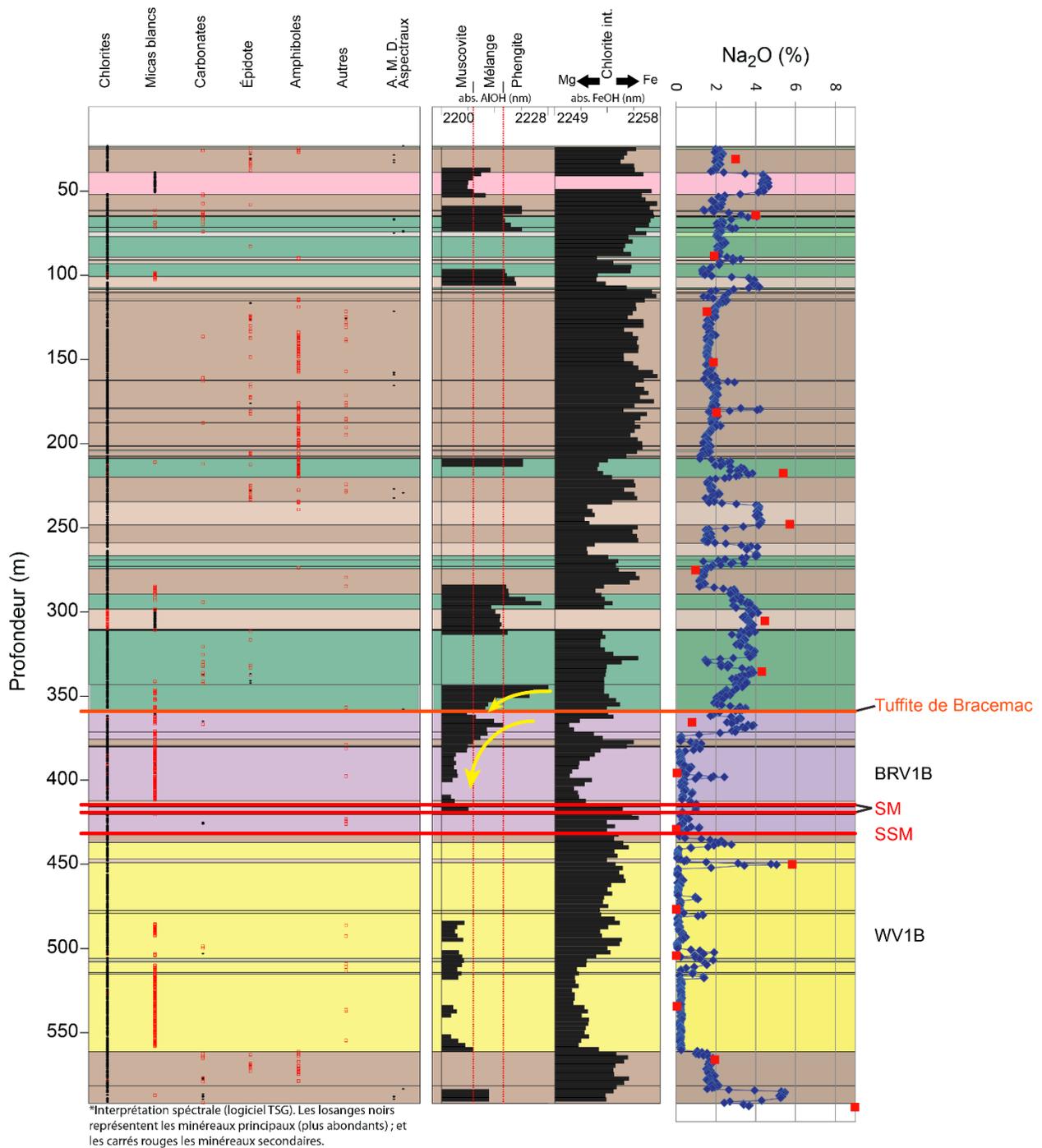


Figure 5.17 : Mise en relation des variations de sodium (à droite) avec la minéralogie (à gauche et au centre) obtenue avec le LAMROC pour le forage MCL-12-09. Courbe bleue : Na estimé à partir des données du LAMROC; carrés rouges : Na mesuré par géochimie traditionnelle (Glencore). BRVB : Rhyolite de Bracemac; WV1B : Rhyolite du Lac Watson; SM : Sulfures massifs; SSM : Sulfures semi-massifs.

5.2.2 Variation de la concentration en sodium latéralement

Les forages analysés au LAMROC recoupent la séquence lithologique du secteur et sont répartis au niveau de la lentille de sulfures McLeod et jusqu'à 1,5 km vers l'ESE (Fig. 5.15). Ce choix permet de voir les variations de l'altération hydrothermale, par exemple via les variations de la concentration en sodium, en fonction de la distance au gisement. Nous avons vu ci-dessus que les forages les plus proximaux contenaient de très faibles valeurs en Na dans les rhyolites. Jusqu'où cet effet est-il visible ? Pour le vérifier, une longitudinale a été réalisée afin de localiser la lentille de McLeod en fonction des forages. Cette section passe par le plan minéralisé, la Tuffite Clé, proche du contact entre les deux rhyolites, qui correspond aux zones fortement altérées (Fig. 5.18).

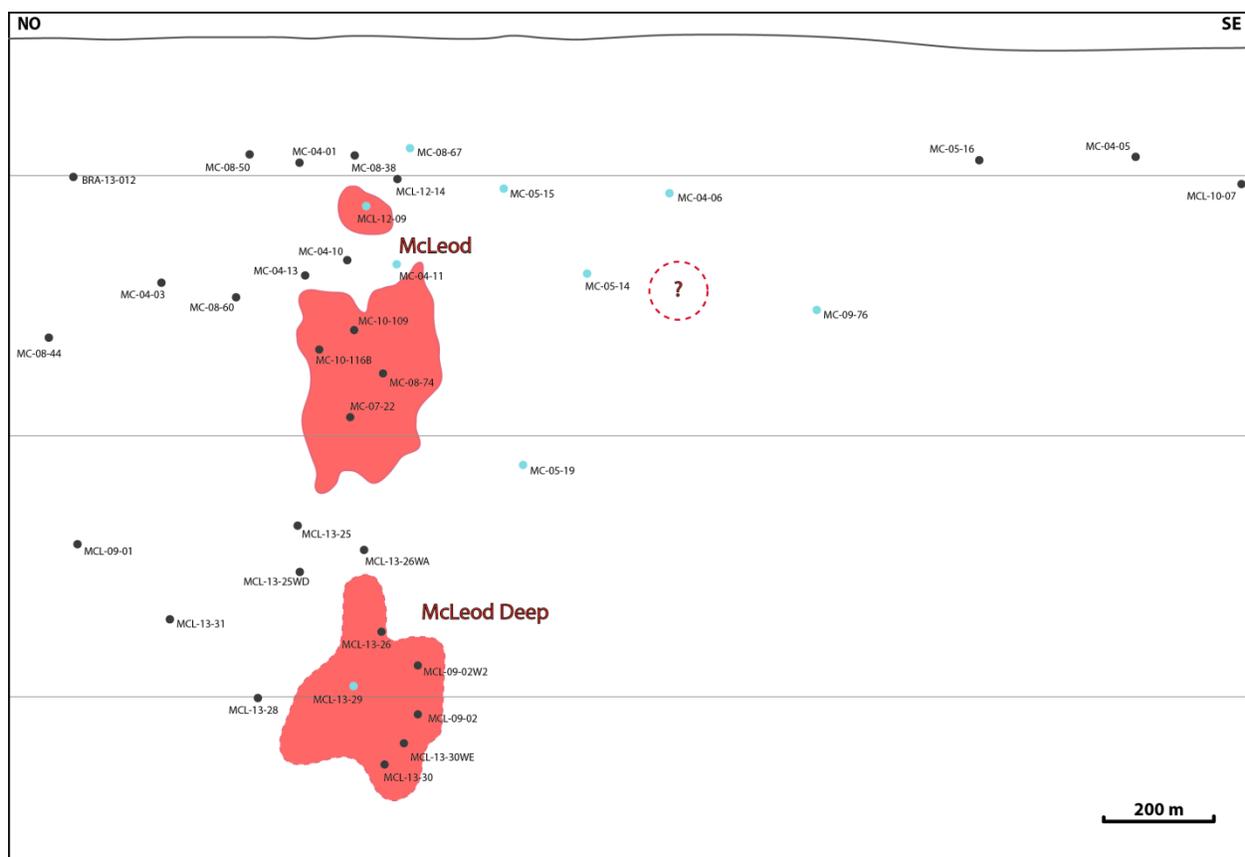


Figure 5.18 : Longitudinale du secteur McLeod, localisant les forages analysés au LAMROC (en bleu) et ceux sélectionnés pour analyse minéralogique (en noir) par rapport à la lentille McLeod et son extension McLeod Deep. Modifiée d'après les figures du communiqué de presse de Sphinx, 31 juillet 2013. Source : <https://sphinxresources.ca/explorationupdate31july2013>.

Les forages MCL-12-09 et MCL-13-29 interceptent la lentille McLeod et McLeod Deep, le forage MC-04-11 est à environ 50 m au-dessus de la bordure de la lentille et les forages MC-05-15 et MC-05-19/19A sont à environ 200 m de la minéralisation.

En comparant les profils des forages MCL-12-09, MC-04-11 et MC-05-19/19A (Fig. 5.19), au niveau des Rhyolites de Bracemac et du Lac Watson, la concentration en sodium varie en fonction de la distance à la minéralisation. La concentration en sodium est proche de zéro dans le forage MCL-12-09 (sauf dans les dykes). Quelque 50 m plus loin, dans le forage MC-04-11, la perte en sodium est plus faible et surtout localisée dans la Rhyolite du Lac Watson. Finalement, le sodium varie peu dans le forage MC-05-19/19A, à 200 m de la lentille de sulfures. Les mêmes observations peuvent être faites avec les variations des micas blancs. Plus on est proche de la zone minéralisée, plus le changement phengite à muscovite est marqué (MCL-12-09), plus on s'éloigne plus on aura un mélange de micas blancs (MC-04-11) ou on restera au niveau du pôle phengitique (MC-05-19/19A).

L'effet de la variation du sodium au niveau des rhyolites est donc visible à 50 m de la minéralisation, mais il ne l'est pas au-delà de 200 m de distance. N'ayant pas d'information entre ces deux forages il n'est pas possible de préciser jusqu'à quelle distance l'effet est visible.

Le forage MC-04-06, pourtant situé loin de la lentille McLeod (distance de 450 m) présente une diminution du Na estimé dans les rhyolites, tandis que le forage MC-09-76 (à environ 600 m de distance) ne montre aucune variation. Si on considère l'affirmation de départ (utilisation de la diminution de la concentration en sodium en deçà de 200 m de distance à la minéralisation) vraie, les variations de la concentration en sodium du forage MC-04-06 ne seraient pas influencées par la lentille McLeod, et indiqueraient qu'il y aurait une potentielle zone anormale ou minéralisée à moins de 200 m du forage, au sud-est de la lentille McLeod, mais à plus de 200 m du forage MC-09-76, celui-ci ne montrant pas de diminution du Na (Fig. 5.18). Malheureusement il n'y a pas assez de données de forage pour vérifier l'hypothèse d'une zone anormale ou minéralisée dans ce secteur.

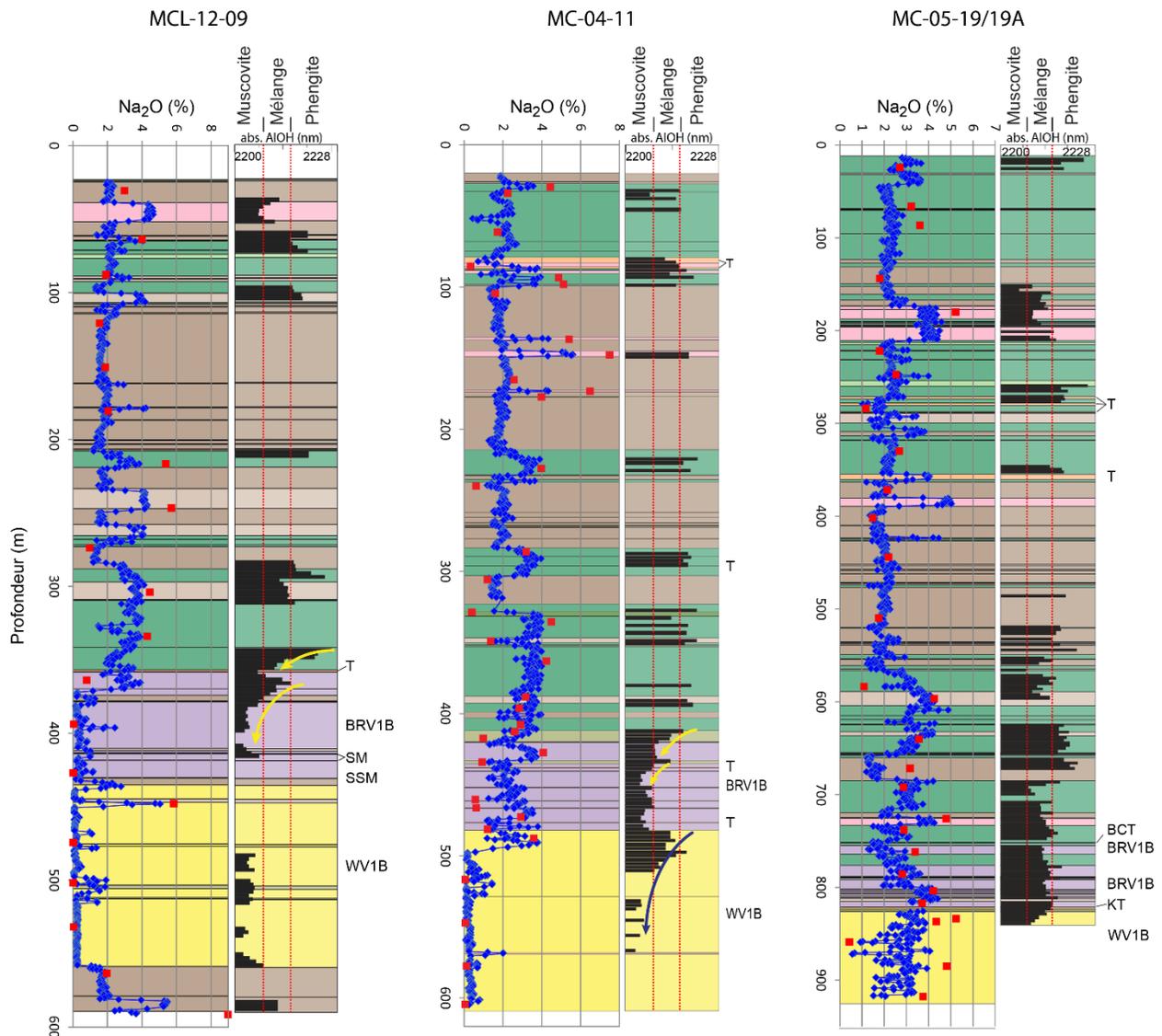


Figure 5.19 : Comparaison latérale des variations des micas blancs et de la concentration en Na pour les forages MCL-12-09, MC-04-11 et MC-05-19/19A, dont les collets sont présentés à la figure 5.15.

5.3 Calculs d'indices d'altération

L'estimation du sodium avec les données du LAMROC permet de calculer les indices d'altération d'Ishikawa (AI) et chlorite-carbonate-pyrite (CCPI). En utilisant le diagramme CCPI vs AI, les échantillons pris à proximité de la zone minéralisée sont bien dans le champ de la chloritisation intense (Figs. 5.20 et 5.21, entouré en rouge). L'utilisation des données du LAMROC permet d'avoir une meilleure résolution spatiale que pour les données de géochimie traditionnelle de la compagnie.

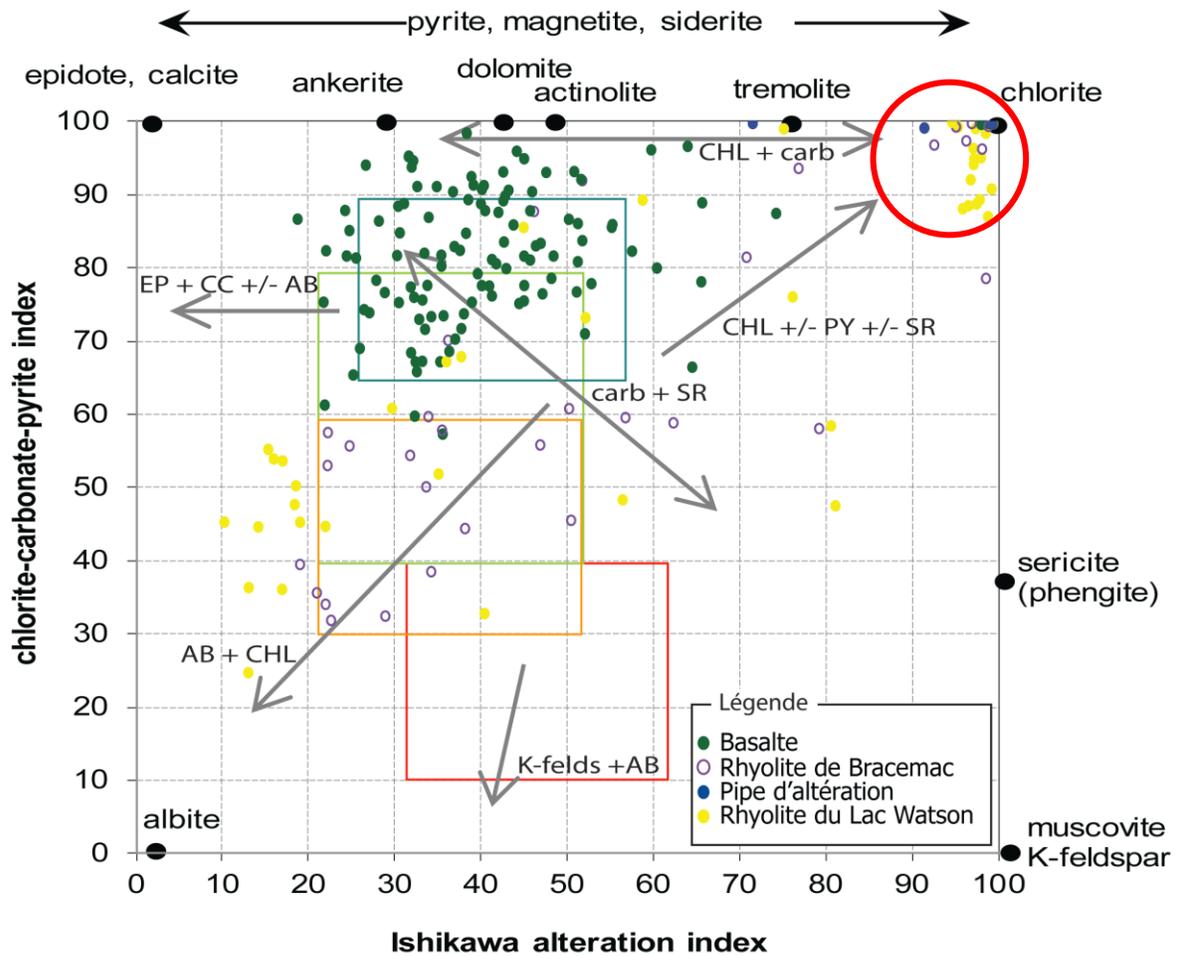


Figure 5.20 : Diagramme CCPI en fonction de AI avec les données géochimiques de Glencore pour les neuf forages sélectionnés. *Alteration Box Plot* : Large (1992). Les boîtes rouge (rhyolite), orange (dacite), vert pâle (andésite) et vert foncé (basalte) représentent les roches fraîches selon Gifkins et al. (2005). AB = albite, carb = carbonate, CC = calcite, CHL = chlorite, EP = épidote, PY = pyrite, SR = séricite. Les points marqués "pipe d'altération" représentent des roches chloritisées appelées informellement "pipe" dans les descriptions de forage, même si l'altération à Bracemac-McLeod n'est pas fortement discordante.

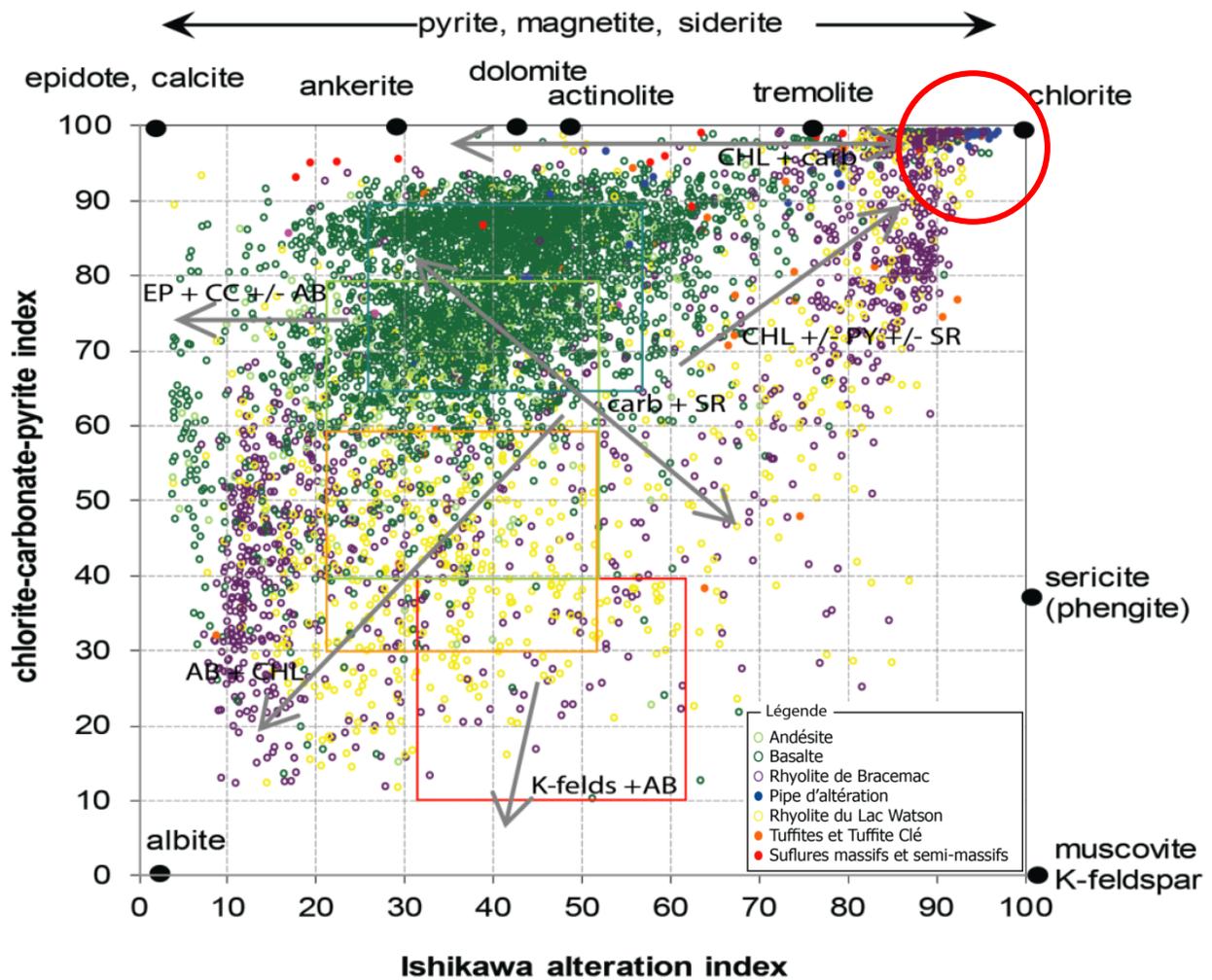


Figure 5.21 : Diagramme CCPI en fonction de AI avec les données du LAMROC pour les neuf forages sélectionnés. *Alteration Box Plot*: Large (1992). Les boîtes rouge (rhyolite), orange (dacite), vert pâle (andésite) et vert foncé (basalte) représentent les roches fraîches selon Gifkins et al. (2005). AB = albite, carb = carbonate, CC = calcite, CHL = chlorite, EP = épidote, PY = pyrite, SR = séricite. Les points marqués "pipe d'altération" représentent des roches chloritisées appelées informellement "pipe" dans les descriptions de forage, même si l'altération à Bracemac-McLeod n'est pas fortement discordante.

CHAPITRE 6 : DISCUSSION

Ce chapitre présente une discussion sur les résultats exposés dans le chapitre précédent. Dans un premier temps, les données brutes obtenues avec le LAMROC sont brièvement discutées, suivies par le choix de l'algorithme d'estimation du Na et le choix des variables. Dans un second temps, ce chapitre traite des résultats et méthodes d'estimation de la concentration en sodium et l'utilisation de cet élément dans l'interprétation des variations de l'altération hydrothermale et l'élaboration de vecteurs d'exploration. Enfin, une réflexion plus générale sur l'utilisation potentielle de l'apprentissage automatique en exploration minière est présentée.

6.1 Données du LAMROC

Le LAMROC a ses avantages par rapport aux méthodes traditionnelles, puisqu'il permet de réaliser un nombre important d'analyses (résolution spatiale élevée) et de mesurer un nombre important de propriétés physiques, géochimiques et minéralogiques sur des carottes de forage de façon non destructive. Cependant, cette efficacité peut impliquer une perte de précision ou des corrections à réaliser sur certains paramètres.

Dans le cas de la géochimie, les analyseurs à FRX ne permettent pas d'avoir la même précision ni le même nombre d'éléments chimiques détectés qu'une analyse géochimique traditionnelle. La méthode d'atténuation des rayons gamma pour la mesure de la densité est rapide (10 s), mais les données brutes doivent être corrigées (Fresia, 2013), car systématiquement sous-estimées par rapport à la méthode traditionnelle (section 3.1.1).

L'ensemble des résultats obtenus avec le LAMROC est influencé par l'hétérogénéité de la roche. Afin de diminuer cet effet, une moyenne mobile sur trois données a été réalisée sur les données d'estimation du sodium. Bien que cette méthode lisse les variations aux contacts lithologiques ou certains phénomènes locaux, le nombre élevé de mesures permet d'avoir tout de même une bonne résolution spatiale (ex. Ross et al., 2013). Une moyenne mobile aurait pu être appliquée directement aux données brutes, ce qui pourrait potentiellement augmenter la précision dans l'estimation du sodium.

6.2 Choix de l'algorithme

Dans cette étude, le sodium a été estimé grâce à une méthode d'apprentissage automatique. Le sodium n'est pas inclus dans les données du LAMROC car cet élément léger est difficile à mesurer par les méthodes de fluorescence X portatives. Il est intéressant d'estimer le Na car cet élément, seul ou en combinaison avec d'autres, peut servir de vecteur pour l'exploration des sulfures massifs volcanogènes ou d'autres types de gîtes minéraux.

De nombreuses méthodes d'apprentissage automatique existent, mais dans cette étude, le choix a porté sur les *Random Forest*. De plus en plus utilisée dans de nombreux domaines, notamment en exploration minière, afin de traiter de grands ensembles de données, la méthode des RF est facile d'utilisation, n'exige pas de grosses ressources informatiques, ni de données ayant des attributs spécifiques. En regardant plusieurs cas similaires à ce projet de maîtrise dans la littérature, les résultats obtenus avec le RF sont souvent meilleurs que d'autres techniques d'apprentissages automatiques tels que les réseaux de neurones ou les SVM (Rodriguez-Galiano et al., 2015).

6.3 Choix des variables

Le choix des variables utilisées pour réaliser l'estimation du Na n'a pas fait l'objet d'une recherche approfondie, le but étant d'utiliser le plus d'information possible à notre disposition : propriétés physiques, chimiques et une partie des variables minéralogiques. Mentionnons aussi que l'algorithme choisi, le *Random Forest*, fait lui-même un tri sur l'importance des variables en fonction de l'élément à estimer.

Deux variables ont été cependant systématiquement supprimées. La première est la lithologie, critère pouvant pourtant être intéressant, mais dans le cas présent la lithologie est subjective, puisque définie visuellement par le géologue, ou parfois difficilement reconnaissable, en raison de l'altération hydrothermale trop importante. La profondeur a également été supprimée, car elle a seulement une signification à l'intérieur d'un seul trou de forage, or la base de données combinait plusieurs forages. Il aurait été intéressant de calculer pour chaque point de mesures la distance en 3D par rapport à la minéralisation. Ceci aurait permis de calculer directement des vecteurs vers la minéralisation.

6.4 Estimation de la concentration en sodium

Dans un premier temps, le *Random Forest* a été testé avec les données de géochimie de Glencore. L'ensemble d'entraînement consistait en plusieurs forages de Matagami (secteur Bracemac-McLeod) ayant la géochimie traditionnelle complète, dont le sodium (Na). L'algorithme a ensuite été appliqué à un sous-ensemble test pour lequel les données de Na avaient été mises de côté à des fins de validation. Les résultats de la calibration et du test ont montré des corrélations de 0,95 (pour les données transformées en LRC). Après répétition avec les mêmes ensembles d'entraînement et de test, le coefficient de corrélation est constant.

Au vu des résultats de l'algorithme avec les données géochimiques de Glencore dans l'ensemble du secteur Bracemac-McLeod, le même exercice a été réalisé sur les neuf forages choisis pour ce projet et plus précisément les mesures ayant une géochimie de Glencore adjacente ainsi que les paramètres mesurés avec le LAMROC (soit 260 données). Deux manipulations ont été effectuées, la première avec les données géochimiques de Glencore, la seconde avec les mesures du LAMROC. Dans chaque cas, l'algorithme a été répété sur un même ensemble d'entraînement et test, révélant une variation du coefficient de corrélation de 0,04. Ensuite, trois ensembles d'entraînement et test ont été produits, permettant ainsi de comparer plusieurs cas de figure, soit la transformation des éléments majeurs en LRC ou non et la variation du nombre de variables. Les résultats montrent que la variation du nombre ou type de variable ne fait pas grandement varier le coefficient de corrélation. En particulier, la suppression des éléments chimiques ayant plus de 10% de leurs mesures en dessous de la limite de détection de chaque élément (MgO, CaO, K₂O, Cr, Nb, Ni et Rb) n'a pas d'influence, car l'algorithme, de lui-même, donne peu d'importance à ces éléments pour estimer le sodium.

À contrario, l'utilisation de l'algorithme sur différents ensembles d'entraînement et test a montré des corrélations variables, bien que toujours du même ordre de grandeur (0,82-0,88 avec les données de Glencore et 0,66-0,75 avec les données du LAMROC). Cette variabilité peut être due aux données dites aberrantes qui se trouvent soit dans l'ensemble d'entraînement soit dans l'ensemble test.

Bien qu'apportant de nouvelles variables et une résolution spatiale beaucoup plus élevée, l'utilisation des données du LAMROC produit une moins bonne corrélation que la simple utilisation de la géochimie traditionnelle. En utilisant seulement la géochimie traditionnelle, lorsqu'il y a beaucoup de données (tout le secteur Bracemac-McLeod), le MgO est la variable ayant le plus de poids pour estimer le sodium, suivi de loin par le Fe₂O₃, la LOI, le K₂O et l'Al₂O₃.

En diminuant le nombre de données (neuf forages), le LOI ou le Sr deviennent les éléments les plus influents, voire le Fe_2O_3 dans certains cas, dépendamment des ensembles d'entraînements et test. La variabilité dans l'importance des variables peut-être due aux données aberrantes qui se trouvent soit dans l'ensemble d'entraînement soit dans l'ensemble test.

Finalement, dans le cas des variables du LAMROC, le Sr est la variable la plus utilisée. Ceci concorde avec les observations précédentes. La deuxième variable importante est la densité (dans la majorité des cas observés), ce qui indique que l'ajout des propriétés physiques est facilitant.

En ce qui concerne la minéralogie par méthode infrarouge, la variable « groupe de minéral » est systématiquement peu influente dans l'estimation du Na. Pour les prochaines études, les variables minéralogiques mises de côté mériteraient d'être transformées et utilisées. En effet, en l'état, le groupe de minéral, le minéral et le poids de celui-ci sont trois variables différentes. Il aurait fallu les combiner pour créer une variable pour chaque minéral et indiquer la présence ou non pour chaque point, ou le pourcentage. Il serait alors intéressant de vérifier si l'inclusion de la minéralogie dans les variables est toujours peu influente dans l'estimation du Na.

6.5 Vecteurs d'altération

L'utilisation de la variation de la concentration en sodium est une première approche significative pour l'élaboration de vecteur d'exploration. Une autre est l'utilisation des micas blancs.

6.5.1 Variation de la concentration en sodium

Les fluides circulant dans la roche laissent des traces sous forme d'altération hydrothermale. La zone d'altération peut être de plus grand volume que la minéralisation et discordante. Il existe des zonations géochimiques et minéralogiques dans les roches altérées. On peut donc utiliser la zone d'altération pour savoir si on est proche ou non d'une zone minéralisée connue ou potentielle. Dans les systèmes de SMV, cette altération se traduit notamment par la destruction des plagioclases et donc la perte de sodium.

Les profils du Na en fonction de la profondeur présentés au chapitre 5 appuient la correspondance entre le sodium mesuré à quelques endroits discrets par géochimie traditionnelle (espacement moyen de plusieurs dizaines de mètres), versus son estimation

presque continue avec les données du LAMROC. Bien que le sodium estimé soit approximatif, la quantité importante de données fournie par le LAMROC permet d'observer les tendances là où il n'y a pas d'information de géochimie traditionnelle, soit sur environ 99% du forage.

Le long des forages étudiés qui passent par les lentilles de sulfures, la concentration en Na diminue progressivement jusqu'à être proche de zéro, environ 60 m au-dessus de la minéralisation. Latéralement, il est possible de retrouver cette diminution de concentration en sodium à 50 m de distance, mais pas à 200 m. Pour savoir la limite exacte de l'anomalie en Na, il serait nécessaire d'avoir plus d'information entre 50 et 200 m autour de la lentille minéralisée.

En supposant l'utilisation des variations de la concentration en Na comme étant un vecteur fiable vers la minéralisation, la diminution locale de la concentration en Na retrouvée dans un forage situé à 450 m de la lentille McLeod ne serait pas dépendante de celle-ci, mais indiquerait potentiellement la présence d'une zone anomalique ou minéralisée à moins de 200 m de ce forage.

6.5.2 Corrélation entre chimie et minéralogie infrarouge

Les variations de la concentration en sodium peuvent être corrélées avec les variations d'abondance et de composition des micas blancs et des chlorites. Le plus significatif dans notre cas est la variation de composition des micas blancs, qui passent du pôle phengitique à muscovitique en se rapprochant de la minéralisation. Cette observation est visible autant le long des forages que latéralement. En s'éloignant de la lentille minéralisée, la longueur d'onde Al-OH moyenne des micas blancs dans les rhyolites (Bracemac et Lac Watson) augmente (Ross et Bourke, en prép.). La présente étude n'a pas insisté sur la minéralogie infrarouge puisqu'une étude parallèle était en cours.

6.6 Indices d'altération

Le diagramme CCPI vs Al appuie également la pertinence de l'utilisation des données du LAMROC, par rapport à la grande quantité de données apportée. Cependant, dans le cas des données du LAMROC, il reste une incertitude, due au fait que le calcul des indices d'altération fait intervenir certains éléments tels que Mg, dont plus de 10% des données sont en dessous de la limite de détection, ainsi que le Na qui est lui-même une estimation. L'utilisation des indices

d'altération est donc moins performante dans notre cas, que l'utilisation seule de la concentration en sodium.

Une autre possibilité serait d'estimer directement les indices d'altération avec les *Random Forest*. Ceci minimiserait l'impact du problème de limite de détection du Mg, en utilisant les autres variables disponibles.

6.7 L'apprentissage automatique en exploration minière

Au-delà du sodium, qui demeure un élément chimique parmi d'autres, notre démarche illustre comment une vaste base de données multiparamétrique (ici 9675 points de mesures, 20 paramètres) peut être valorisée grâce aux méthodes d'apprentissage automatique, notamment pour estimer des paramètres qui ne sont pas directement mesurés, mais qui peuvent être importants pour l'exploration minière.

D'autres utilisations potentielles de telles bases de données multiparamétriques et de l'intelligence artificielle en exploration incluent :

- prévision de la lithologie (pseudo-logs) le long des forages;
- prédiction de la concentration et répartition en métaux comme l'or le long des forages et spatialement;
- génération de cartes prédictives de potentiel en métaux;
- estimation de ressources;
- classification d'échantillons.

CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS

Les analyses lithogéochimiques, typiquement espacées de plusieurs dizaines de mètres le long des forages au diamant, sont parmi les données les plus utilisées de l'exploration à l'exploitation minière. Elles permettent de vérifier les assignations lithologiques, de mesurer l'altération hydrothermale et de chercher une possible corrélation entre un ou plusieurs éléments chimiques et la minéralisation. Le LAMROC est un laboratoire mobile qui permet de mesurer quasi simultanément la densité, la susceptibilité magnétique, la géochimie et la minéralogie d'altération, en plus de pouvoir prendre une photographie de la carotte, et ceci de façon non destructive. La grande quantité de données colocalisées et la haute résolution spatiale (20-30 cm, au lieu de 30-50 m pour la géochimie traditionnelle) ouvrent la voie à l'intégration quantitative, une meilleure compréhension de la géologie autour d'un gisement ou le gisement lui-même, et l'élaboration de vecteurs d'exploration.

Le grand volume de données et la diversité des paramètres acquis par le LAMROC demandent de nouvelles approches, comme l'apprentissage automatique, pour faciliter les processus d'interprétation des mesures multiparamétriques de façon simultanée et non subjective. L'objectif principal de ce projet de maîtrise était d'investiguer de nouvelles méthodes pour l'estimation de certains paramètres qui sont intéressants dans le contexte de SMV, mais manquants dans le jeu de données multiparamétriques recueillies par le LAMROC, comme ici le sodium, utile pour l'étude de l'altération hydrothermale. Cette étude a été faite sur un gisement connu, pour valider les méthodes choisies et pouvoir ensuite les utiliser en exploration à Matagami ou dans d'autres contextes.

Dans le cas de l'estimation de la concentration en sodium, une première étape était de tester la méthode d'apprentissage automatique choisie sur les données de lithogéochimie traditionnelle de Glencore. Les résultats fortement positifs ont incité à utiliser la même méthode sur les données multiparamétriques fournies par le LAMROC. Dans ce cas, l'utilisation du *Random Forest* est un très bon outil lors de l'utilisation de grandes quantités de données et de variables, qu'elles soient pertinentes, ou moins. Il est cependant important d'avoir un nombre de variables pertinentes suffisantes, dans l'absolu et relativement au nombre total de variables.

L'expertise du géologue reste indispensable dans le choix des variables. Un avantage de cette méthode est l'utilisation de l'ensemble des variables pertinentes, mais en mettant automatiquement en priorité les plus représentatives, en fonction de la prédiction demandée, ainsi que la visualisation du poids que chaque variable représente.

Travaux futurs

De manière générale, ce projet de recherche ouvre des portes quant à l'utilisation du principe d'apprentissage automatique en exploration minière. Les *Random Forest* sont efficaces et simples d'utilisation, mais une recherche plus approfondie autour de cette méthode serait intéressante, voire tester d'autres algorithmes potentiellement mieux adaptés encore (fonction du nombre de données, de leur type, du nombre variables, etc...).

L'altération hydrothermale est parfois trop intense pour reconnaître visuellement les protolites. Pourtant la reconnaissance des protolites est essentielle pour la modélisation géologique en 3D et l'exploration. Il serait intéressant d'essayer l'algorithme de classification utilisant les RF pour la discrimination lithologique et ainsi de s'affranchir de la subjectivité de l'interprétation visuelle et de prendre en compte la multidimensionnalité des données. Voir utiliser un autre algorithme tel que les SVM qui pourrait se révéler plus efficace dans la catégorisation.

Au lieu d'estimer le sodium, on pourrait estimer directement des indices d'altération (AI, CCPI), puisque cela enlèverait l'erreur de l'estimation du sodium et également le Mg dont on a plus de 10 % des données qui sont en dessous de la limite de détection.

Les méthodes présentées dans ce mémoire pourraient être appliquées à d'autres contextes géologiques. Ceci permettrait de valider leur efficacité et d'avoir un système (d'apprentissage automatique combiné au LAMROC) performant et pluricontextuel.

RÉFÉRENCES

A

- Adair, R., 2009. Technical Report on the Resource Calculation for the Bracemac-McLeod Discoveries, Matagami Project, Québec: National Instrument 43-101 Report Prepared on behalf of Donner Metals Ltd. (Vancouver, British Columbia): February, v. 24, no. 2009, 132 p.
- Aitchison, J., 1984. The statistical analysis of geochemical compositions: *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, v. 16, no. 6, p. 531-564.
- Aitchison, J., 1986. *The statistical analysis of compositional data*. Chapman & Hall. 416 p.
- Ayer, J., Amelin, Y., Corfu, F., Kamo, S., Ketchum, J., Kwok, K. & Trowell, N., 2002. Evolution of the southern Abitibi greenstone belt based on U–Pb geochronology: autochthonous volcanic construction followed by plutonism, regional deformation and sedimentation: *Precambrian Research*, v. 115, no. 1, p. 63-95.

B

- Barceló, C., Pawlowsky, V. & Grunsky, E., 1996. Some aspects of transformations of compositional data and the identification of outliers: *Mathematical Geology*, v. 28, no. 4, p. 501-518.
- Barrett, T. & MacLean, W., 1994. Mass changes in hydrothermal alteration zones associated with VMS deposits of the Noranda area: *Exploration and Mining Geology*, v. 3, no. 2, p. 131-160.
- Barrie, C. & Hannington, M., 1999. Classification of volcanic-associated massive sulfide deposits based on host-rock composition: *Reviews in Economic Geology*, v. 8, p. 1-11.
- Bartington Instruments Ltd., non daté. Operation manual for MS2 magnetic susceptibility system, version OM0408, 71 pp. (téléchargé de www.bartington.com le 26 Decembre 2010).
- Beaudry, C. & Gaucher, E., 1986. Cartographie géologique dans la région de Matagami. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, rapport MB-86-32, p. 147.

- Bernard, S., Adam, S. & Heutte, L., 2007. Using random forests for handwritten digit recognition, *in* Proceedings Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007), Volume 2, IEEE, p. 1043-1047.
- Bosch, M., Zamora, M. & Utama, W., 2002. Lithology discrimination from physical rock properties: *Geophysics*, v. 67, no. 2, p. 573-581.
- Bourke, A. & Ross, P.-S., 2016. Portable X-ray fluorescence measurements on exploration drill-cores: comparing performance on unprepared cores and powders for 'whole-rock' analysis: *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v. 16, no. 2, p. 147-157.
- Breiman, L., 1996. Bagging predictors: *Machine Learning*, v. 24, no. 2, p. 123-140.
- Breiman, L., 2001. Random forests: *Machine Learning*, v. 45, no. 1, p. 5-32.

C

- Card, K., 1990. A review of the Superior Province of the Canadian Shield, a product of Archean accretion: *Precambrian Research*, v. 48, no. 1-2, p. 99-156.
- Carignan, G., 2010. Les amas sulfurés à zinc-cuivre archéens du Lac Scott, Chibougamau, Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, 104 p.
- Carr, P. M., Cathles Iii, L. M. & Barrie, C. T., 2008. On the size and spacing of volcanogenic massive sulfide deposits within a district with application to the Matagami district, Quebec: *Economic Geology*, v. 103, no. 7, p. 1395-1409.
- Carranza, E. J. M. & Laborte, A. G., 2015. Random forest predictive modeling of mineral prospectivity with small number of prospects and data with missing values in Abra (Philippines): *Computers & Geosciences*, v. 74, p. 60-70.
- Chayes, F., 1971. *Ratio correlation: a manual for students of petrology and geochemistry*, University of Chicago Press, 99 p.
- Clark, J. R., 1983. The geology and trace element distributions of the sulfide bodies at Orchan mine, Matagami, Quebec. Thèse de doctorat, Colorado School of Mines, 446 p.
- Cristianini, N. & Shawe-Taylor, J., 2000. *An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods*, Cambridge University Press, Cambridge, 202 p.

D

- Davidson, A., 1977. Petrography and chemistry of the Key Tuffite at Bell Allard, Matagami, Quebec: Mémoire de maîtrise, Université McGill, Montréal, 153 p.
- Davis, J. C., 2002. Statistics and data analysis in geology, John Wiley & Sons, New York, 656 p.
- Debreil, J. A., 2014. Évolution volcanologique et chimico-stratigraphique du district minier de Matagami, sous-province de l'Abitibi, Thèse de doctorat, Institut national de la recherche scientifique, Québec, 302 p.
- Dimroth, E., Imreh, L., Rocheleau, M. & Goulet, N., 1982. Evolution of the south-central part of the Archean Abitibi Belt, Quebec. Part I: Stratigraphy and paleogeographic model: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 19, no. 9, p. 1729-1758.
- Doucet, P., Mueller, W. & Chartrand, F., 1994. Archean, deep-marine, volcanic eruptive products associated with the Coniagas massive sulfide deposit, Quebec, Canada: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 31, no. 10, p. 1569-1584.
- Doyle, M. G. & Allen, R. L., 2003. Subsea-floor replacement in volcanic-hosted massive sulfide deposits: Ore Geology Reviews, v. 23, no. 3, p. 183-222.

E

- Egozcue, J. J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G. & Barcelo-Vidal, C., 2003. Isometric logratio transformations for compositional data analysis: Mathematical Geology, v. 35, no. 3, p. 279-300.

F

- Faure, S., Jebrak, M. & Angelier, J., 1996. Structural evolution of Les Mines Selbaie, northern Abitibi Belt, Quebec, Canada: Exploration and Mining Geology, v. 3, no. 5, p. 215-230.
- Fischer, A., 2014. Deux méthodes d'apprentissage non supervisé: synthèse sur la méthode des centres mobiles et présentation des courbes principales: Journal de la Société Française de Statistique, v. 155, no. 2, p. 2-35.
- Franklin, J., Gibson, H., Jonasson, I. & Galley, A., 2005. Volcanogenic massive sulfide deposits: Economic Geology 100th anniversary volume, v. 98, p. 523-560.

Fresia, B., 2013. analyses multivariées de données de forage de la région de Matagami, mémoire de maîtrise, Institut national de la recherche scientifique, Québec, 152 p.

Fresia, B., Ross, P.-S., Gloaguen, E. & Bourke, A., 2017. Lithological discrimination based on statistical analysis of multi-sensor drill core logging data in the Matagami VMS district, Quebec, Canada: *Ore Geology Reviews*, v. 80, p. 552-563.

G

Galley, A. G., 1993. Characteristics of Semi-Conformable Alteration Zones Associated with Volcanogenic Massive Sulfide Districts: *Journal of Geochemical Exploration*, v. 48, no. 2, p. 175-200.

Galley, A. G., Hannington, M. & Jonasson, I., 2007. Volcanogenic massive sulphide deposits: Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, v. 5, p. 141-161.

Genna, D., Gaboury, D. & Roy, G., 2014. Evolution of a volcanogenic hydrothermal system recorded by the behavior of LREE and Eu: Case study of the Key Tuffite at Bracemac-McLeod deposits, Matagami, Canada: *Ore Geology Reviews*, v. 63, p. 160-177.

Geotek Ltd., 2010. Multi-Sensor Core Logger (MSCL) Manual, version 05-10, pages 1-176 (téléchargé de www.geotek.co.uk le 26 décembre 2010).

Gibson, H. L. & Watkinson, D., 1990. Volcanogenic massive sulphide deposits of the Noranda cauldron and shield volcano, Quebec: Canadian Institute of Mining and Metallurgy, p. 119-132.

Gibson, H. L. & Galley, A. G., 2007. Volcanogenic massive sulphide deposits of the Archean, Noranda District, Quebec. *In* Mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5:533-552.

Gibson, H. L., Morton, R. L. & Hudak, G. J., 1999. Submarine volcanic processes, deposits, and environments favorable for the location of volcanic-associated massive sulfide deposits. *In*: Barrie CT, Hannington MD (eds) Volcanic-associated massive sulfide deposits:

- processes and examples in modern and ancient settings: Society of Economic Geologists, p. 13-51.
- Gifkins, C., Herrmann, W. & Large, R. R., 2005. Altered volcanic rocks: A guide to description and interpretation, Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania, 275 p.
- Gilleron, R. & Tommasi, M., 2000. Découverte de connaissances à partir de données: Technical report, Grappa - Université de Lille 3.
- Goodwin, A., 1982. Archean volcanoes in southwestern Abitibi belt, Ontario and Quebec: form, composition, and development: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 19, no. 6, p. 1140-1155.
- Goutier, J. & Mélançon, M., 2007. Compilation géologique de la Sous-province de l'Abitibi (version préliminaire), Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, Québec.
- Grunsky, E. & Kjarsgaard, B., 2008. Classification of distinct eruptive phases of the diamondiferous Star Kimberlite, Saskatchewan, Canada based on statistical treatment of whole rock geochemical analyses: Applied Geochemistry, v. 23, no. 12, p. 3321-3336.

H

- Hannington, M. D., Galley, A. G., Herzig, P. M. & Petersen, S., 1998. Comparison of the TAG mound and stockwork complex with Cyprus-type massive sulfide deposits, *in* Proceedings Proc Ocean Drill Program Sci Results1998, v. 158, p. 389-415.
- Hastie, T., Tibshirani, R. & Friedman, J., 2001. The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference, and Prediction. Second Edition, 745 p.
- Heather, K. & Shore, G., 1999. Geology, Swayze greenstone belt, Ontario, Geological Survey of Canada, open file 3384a.
- Heutte, L., Bernard, S., Adam, S. & Oliveira, É., 2008. De la sélection d'arbres de décision dans les forêts aléatoires, *in* Proceedings Colloque International Francophone sur l'Écrit et le Document2008, Groupe de Recherche en Communication Ecrite, p. 163-168.
- Hunt, C. P., Moskowitz, B. M. & Banerjee, S. K., 1995. Magnetic properties of rocks and minerals: Rock physics & phase relations: a handbook of physical constants, p. 189-204.

Huntington, J., Mason, P. & Berman, M., 1997. Geological evaluation of The Spectral Assistant (TSA) for mineralogical identification: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia, Exploration and Mining Report, v. 417, 74 p.

Huston, D. L., Relvas, J. M., Gemmell, J. B. & Driberg, S., 2011. The role of granites in volcanic-hosted massive sulphide ore-forming systems: an assessment of magmatic–hydrothermal contributions: *Mineralium Deposita*, v. 46, no. 5-6, p. 473-507.

I

Ishikawa, Y., Sawaguchi, T., Iwaya, S. & Horiuchi, M., 1976. Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration halos: *Mining Geology*, v. 26, p. 105-117.

J

Jenney, C., 1961. Geology and ore deposits of the Mattagami area, Quebec: *Economic Geology*, v. 56, no. 4, p. 740-757.

K

Killeen, P., Elliott, B. & Mwenifumbo, C., 1997. Towards Prediction Of Geological Drill Core Logs Using Geophysical Logs In Volcanic Stratigraphy, *in* Proceedings 10th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1997.

Kucera, M. & Malmgren, B. A., 1998. Logratio transformation of compositional data: a resolution of the constant sum constraint: *Marine Micropaleontology*, v. 34, no. 1, p. 117-120.

L

Lafleche, M., Dupuy, C. & Bougault, H., 1992. Geochemistry and petrogenesis of Archean mafic volcanic rocks of the southern Abitibi Belt, Quebec: *Precambrian Research*, v. 57, no. 3, p. 207-241.

- Lafrance, B., Brisson, T., McNichols, D. & Lambert, G., 2006. Rapport sur le programme de forage 2005, Projet Lemoine: Woodruff Capital Management Inc., Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec, rapport GM-62564, 334 p.
- Lafrance, B., Mueller, W. U., Daigneault, R., & Dupras, N., 2000. Evolution of a submerged composite arc volcano: volcanology and geochemistry of the Normétal volcanic complex, Abitibi greenstone belt, Québec, Canada: *Precambrian Research*, v. 101, no. 2, p. 277-311.
- Large, R. R., 1992. Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits; features, styles, and genetic models: *Economic Geology*, v. 87, no. 3, p. 471-510.
- Large, R. R., Gemmell, J. B., Paulick, H. & Huston, D. L., 2001. The alteration box plot: A simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and lithogeochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits: *Economic geology*, v. 96, no. 5, p. 957-971.
- Latinne, P., Debeir, O. & Decaestecker, C., 2001. Limiting the number of trees in random forests, *in* *Proceedings International Workshop on Multiple Classifier Systems2001*, Springer, p. 178-187.
- Lavallière, G., 1995. Processus de formation et implications pour l'exploration des cheminées atypiques des gisements volcanogènes de Matagami, Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, 490 p.
- Lavallière, G., Guha, J. & Daigneault, R., 1994. Cheminées de sulfures massifs atypiques du gisement d'Isle-Dieu, Matagami, Québec : implications pour l'exploration. *Exploration and Mining Geology*, v. 3, no. 2, p. 109-129.
- Leclerc, F., Harris, L. B., Bédard, J. H., van Breemen, O. & Goulet, N., 2012. Structural and Stratigraphic Controls on Magmatic, Volcanogenic, and Shear Zone-Hosted Mineralization in the Chapais-Chibougamau Mining Camp, Northeastern Abitibi, Canada: *Economic Geology*, v. 107, no. 5, p. 963-989.
- Legault, M., Gauthier, M., Jébrak, M., Davis, D. W. & Baillargeon, F., 2002. Evolution of the subaqueous to near-emergent Joutel volcanic complex, Northern volcanic zone, Abitibi Subprovince, Quebec, Canada: *Precambrian Research*, v. 115, no. 1, p. 187-221.
- Liaghat, S. & MacLean, W., 1992. The Key Tuffite, Matagami mining district; origin of the tuff components and mass changes: *Exploration and Mining Geology*, v. 1, no. 2, p. 197-207.

M

- MacGeehan, P., MacLean, W. & Bonenfant, A., 1981. Exploration significance of the emplacement and genesis of massive sulphides in the Main Zone at the Norita Mine, Matagami, Quebec: CIM Bull, v. 74, no. 828, p. 59-75.
- MacLean, W., 1984. Geology and ore deposits of the Matagami District: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, v. 34, p. 483-495.
- Maier, W., Barnes, S.-J. & Pellet, T., 1996. The economic significance of the Bell River Complex, Abitibi subprovince, Quebec: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 33, no. 7, p. 967-980.
- Martín-Fernández, J. A., Barceló-Vidal, C. & Pawlowsky-Glahn, V., 2003. Dealing with zeros and missing values in compositional data sets using nonparametric imputation: Mathematical Geology, v. 35, no. 3, p. 253-278.
- Masson, M., 2000. Option Caber, rapport de sondages 1998-1999 : Noranda Inc, Travaux statutaires, GM 58074, 36 p.
- Mercier-Langevin, P., Dubé, B., Hannington, M., Davis, D., Lafrance, B. & Gosselin, G., 2007a. The LaRonde Penna Au-rich volcanogenic massive sulfide deposit, Abitibi Greenstone Belt, Quebec: part I. geology and geochronology. Economic Geology, v. 102, no. 4, p. 585-609.
- Mercier-Langevin, P., Dubé, B., Hannington, M., Richer-Laflièche, M. & Gosselin, G., 2007b. The LaRonde Penna Au-rich volcanogenic massive sulfide deposit, Abitibi Greenstone Belt, Quebec: part II. Litho geochemistry and paleotectonic setting. Economic Geology, v. 102, no. 4, p. 611-631.
- Mercier-Langevin, P., Dubé, B., Lafrance, B., Hannington, M., Galley, A., Moorehead, J. & Gosselin, P., 2007c. Metallogeny of the Doyon-Bousquet-LaRonde mining camp. Abitibi Greenstone belt, Quebec. *In* Mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposits types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication no. 5, p. 673-701.
- Mercier-Langevin, P., Gibson, H. L., Hannington, M. D., Goutier, J., Monecke, T., Dubé, B. & Houlé, M. G., 2014a. A special issue on Archean magmatism, volcanism, and ore

deposits: part 2. Volcanogenic massive sulfide deposits preface. *Economic Geology*, v. 109, no. 1, p. 1-9.

Mercier-Langevin, P., Lafrance, B., Bécu, V., Dubé, B., Kjarsgaard, I. & Guha, J., 2014b. The Lemoine auriferous volcanogenic massive sulfide deposit, Chibougamau camp, Abitibi Greenstone Belt, Quebec, Canada: geology and genesis: *Econ. Geol.* V. 109, p. 231-269.

Mitchell, T. M., 1997. Artificial neural networks. *Machine learning*, v. 45, p. 81-127.

Mohamadally, H. & Fomani, B., 2006 SVM : Machines à vecteurs de support ou séparateurs à vastes marges : Rapport technique, Versailles St Quentin, France, 64 p.

Mortensen, J., 1993. U-Pb geochronology of the eastern Abitibi subprovince. Part 1: Chibougamau-Matagami-Joutel région: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 30, no. 1, p. 11-28.

O

O'Neil, J., Carlson, R. W., Francis, D. & Stevenson, R. K., 2008. Neodymium-142 evidence for Hadean mafic crust: *Science*, v. 321, no. 5897, p. 1828-1831.

P

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R. & Dubourg, V., 2011. Scikit-learn: Machine learning in Python: *Journal of Machine Learning Research*, v. 12, no. Oct, p. 2825-2830.

Percival, J., 2007. Geology and metallogeny of the Superior Province, Canada: Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods, Special Publication, v. 5, p. 903-928.

Percival, J., Mortensen, J., Stern, R., Card, K. & Bégin, N., 1992. Giant granulite terranes of northeastern Superior Province: the Ashuanipi complex and Minto block: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 29, no. 10, p. 2287-2308.

Piché, M., 1991 Synthèse géologique et métallogénique du camp minier de Matagami, Québec, Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, 249 p.

- Piché, M. & Jébrak, M., 2006. Determination of alteration facies using the normative mineral alteration index: Selbaie Cu-Zn deposit, northern Abitibi greenstone belt, Canada: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 43, no. 12, p. 1877-1885.
- Piché, M., Guha, J. & Daigneault, R., 1993. Stratigraphic and structural aspects of the volcanic rocks of the Matagami mining camp, Quebec; implications for the Norita ore deposit: Economic Geology, v. 88, no. 6, p. 1542-1558.
- Pierre, S., Jébrak, M., Faure, S. & Roy, G., 2016. Depositional Setting and Structural Evolution of the Archean Perseverance Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Matagami Mining District, Quebec, Canada: Economic Geology, v. 111, no. 7, p. 1575-1594.
- Pilote, P., 1998. Géologie et métallogénie du district minier de Chapais-Chibougamau : nouvelle vision du potentiel de découverte: Livret-guide d'excursion, Ministère des Ressources naturelles du Québec, DV 98-03. 189 p. ISBN 2-551-19026-6.
- Pilote, P., Beaudoin, G., Chabot, F., Crevier, M., Desrochers, J. P., Giovenazzo, D., Lavoie, S., Moorhead, J., Mueller, W., Pelz, P., Robert, F., Scott, C., Tremblay, A. & Vorobiev, L., 2000. Géologie de la région de Val d'Or, Sous-province de l'Abitibi - Volcanogénie et évolution métallogénique: Ministère des Ressources Naturelles MB 2000-09, p. 1-20.
- Pilote, P., Debreil, J., Williamson, K., Rabeau, O. & Lacoste, P., 2011. Révision géologique de la région de Matagami. Conférence Québec Exploration, Québec.

R

- Rakotomalala, R., 2005. Arbres de décision: Revue Modulad, v. 33, p. 163-187.
- Roberts, R., 1966. The geology of Mattagami Lake mine, Galinee Township, Quebec. Thèse de doctorat, McGill University, Montreal, 224 p.
- Roberts, R. G., 1975. The geological setting of the Mattagami Lake Mine, Quebec; a volcanogenic massive sulfide deposit: Economic Geology, v. 70, no. 1, p. 115-129.
- Rodriguez-Galiano, V., Sanchez-Castillo, M., Chica-Olmo, M. & Chica-Rivas, M., 2015. Machine learning predictive models for mineral prospectivity: An evaluation of neural networks, random forest, regression trees and support vector machines: Ore Geology Reviews, v. 71, p. 804-818.
- Ross, P.-S. & Mercier-Langevin, P., 2014. The volcanic setting of VMS and SMS deposits: A review: Geoscience Canada, v. 41, no. 3, p. 365-377.

- Ross, P.-S. & Bourke, A., 2017. High-resolution gamma ray attenuation density measurements on mining exploration drill cores, including cut cores: *Journal of Applied Geophysics*, v. 136, p. 262-268.
- Ross, P., Bourke, A. & Fresia, B., 2011a. Analyse multiparamétrique à haute résolution de carottes de forage dans la région de Matagami—Partie 1, Méthodologie et performance: Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (Québec), MB 2011-02, 72 p.
- Ross, P., Bourke, A., Fresia, B. & Debreil, J. A., 2011b. Analyse multiparamétrique à haute résolution de carottes de forage dans la région de Matagami—Partie 2, résultats préliminaires: Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (Québec), MB 2011-03, 32 p.
- Ross, P. S., Bourke, A., Fresia, B. & Debreil, J. A., 2012. Analyse multiparamétrique à haute résolution de carottes de forage dans la région de Matagami 2010-2012 - Rapport final: Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec, MB 2012-05, 128p.
- Ross, P. S., Bourke, A. & Fresia, B., 2013a. A multi-sensor logger for rock cores: Methodology and preliminary results from the Matagami mining camp, Canada: *Ore Geology Reviews*, v. 53, p. 93-111.
- Ross, P. S., Bourke, A. & Leclerc, F., 2013b. Analyse multiparamétrique à haute résolution de carottes de forage dans la région de Chibougamau 2012-2013: Ministère des Ressources naturelles (Québec), MB 2013-07, 132 p.
- Ross, P. S., Bourke, A. & Fresia, B., 2014a. Improving lithological discrimination in exploration drill-cores using portable X-ray fluorescence measurements: (1) testing three Olympus Innov-X analysers on unprepared cores: *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v. 14, no. 2, p. 171-185.
- Ross, P. S., Bourke, A. & Fresia, B., 2014b. Improving lithological discrimination in exploration drill-cores using portable X-ray fluorescence measurements: (2) applications to the Zn-Cu Matagami mining camp, Canada: *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v. 14, no. 2, p. 187-196.
- Ross, P. S., Bourke, A., Leclerc, F. & Boulerice, A., 2014c. Analyse multiparamétrique à haute résolution de carottes de forage dans la région de Chibougamau 2012-2014, rapport final : Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec. MB 2014-05, 128 p.

- Ross, P. S., McNicoll, V. J., Debreil, J. A. & Carr, P., 2014d. Precise U-Pb geochronology of the Matagami mining camp, Abitibi greenstone belt, Quebec: Stratigraphic constraints and implications for volcanogenic massive sulfide exploration: *Economic Geology*, v. 109, no. 1, p. 89-101.
- Ross, P. S., Bourke, A., Mercier-Langevin, P., Lépine, S., Leclerc, F. & Boulerice, A., 2016a. High-Resolution Physical Properties, Geochemistry, and Alteration Mineralogy for the Host Rocks of the Archean Lemoine Auriferous Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Canada: *Economic Geology*, v. 111, no. 7, p. 1561-1574.
- Ross, P. S., Schnitzler, N. & Bourke, A., 2016b. Analyse multiparamétrique à haute résolution de carottes de forage dans la région de Matagami 2014-2015, résultats préliminaires.: Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, MB 2016-17, 60 p.
- Roy, G., & Allard, M., 2006. Matagami, une approche ciblée sur de nouveaux concepts: Québec Exploration 2006, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (Québec), document DV 2006, v. 3, p. 13.

S

- Scott, K. & Yang, K., 1997. Spectral reflectance studies of white micas. Australian Mineral Industries Research Association Ltd. report, v. 439, 35 p.
- Shanks, W. C. & Thurston, R., 2012. Volcanogenic massive sulfide occurrence model, US Geological Survey Scientific Investigations, 345 p.
- Sharpe, J., 1968. Géologie et gisements de sulfures de la région de Matagami, Comté d'Abitibi-Est, Québec: Ministère des Richesses Naturelles du Québec, rapport géologique, v. 137, no. 8, 122 p.

T

- Thompson, A. J., Hauff, P. L. & Robitaille, A. J., 1999. Alteration mapping in exploration: application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy: *SEG newsletter*, v. 39, no. 1, p. 16-27.
- Thurston, P. C., Ayer, J., Goutier, J. & Hamilton, M., 2008. Depositional gaps in Abitibi greenstone belt stratigraphy: A key to exploration for syngenetic mineralization. *Economic Geology*, v. 103, no. 6, p. 1097-1134.

Thurston, P. C. & Chivers, K., 1990. Secular variation in greenstone sequence development emphasizing Superior Province, Canada: *Precambrian Research*, v. 46, no. 1-2, p. 21-58.

V

Vatandoost, A., Fullagar, P. & Roach, M., 2008. Automated multi-sensor petrophysical core logging. *Exploration Geophysics*, v. 39, no. 3, p. 181-188.

W

Weltje, G. J., 2002. Quantitative analysis of detrital modes: statistically rigorous confidence regions in ternary diagrams and their use in sedimentary petrology. *Earth-Science Reviews*, v. 57, no. 3, p. 211-253.

Y

Yang, K., Huntington, J. F., Gemell, J. B. & Scott, K. M., 2011. Variations in composition and abundance of white mica in the hydrothermal alteration system at Hellyer, Tasmania, as revealed by infrared reflectance spectroscopy: *Journal of Geochemical Exploration*, v. 108, no. 2, p. 143-156.