

MB 2011-02

ANALYSE MULTIPARAMETRIQUE A HAUTE RESOLUTION DE CAROTTES DE FORAGES DANS LA REGION DE MATAGAMI - PARTIE 1, METHODOLOGIE ET PERFORMANCE

Documents complémentaires

Additional Files



Licence



Licence

Cette première page a été ajoutée
au document et ne fait pas partie du
rapport tel que soumis par les auteurs.

Énergie et Ressources
naturelles

Québec 

Laboratoire mobile de caractérisation physique, minéralogique et chimique des roches
(LAMROC)

**Analyse multiparamétrique à haute résolution de carottes de forage dans
la région de Matagami –
Partie 1, Méthodologie et performance**

Par
Pierre-Simon Ross, géo, PhD
Alexandre Bourke, MSc
Bastien Fresia

Présenté au
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF)

Le 15 mars 2011

Analyse multiparamétrique à haute résolution de carottes de forage dans la région de Matagami – Partie 1, méthodologie et performance

Pierre-Simon Ross, Alexandre Bourke et Bastien Fresia

Institut national de la recherche scientifique, centre Eau Terre Environnement
490 rue de la Couronne, Québec (QC), G1K 9A9, rossps@ete.inrs.ca

Mots clés : propriétés physiques, géochimie, minéralogie, carottes de forage

Résumé

Les mesures de propriétés physiques, géochimiques et minéralogiques sur les carottes de forage d'exploration ont plusieurs applications géoscientifiques, telles que la modélisation géologique en 3D, l'amélioration des modélisations géophysiques, la caractérisation de l'altération hydrothermale, ou la chimico-stratigraphie. Pourtant, peu de camps miniers québécois disposent de bases de données publiques importantes de propriétés physiques, et des mesures géochimiques ou minéralogiques à haute résolution ne sont généralement pas disponibles. Ceci est notamment la conséquence du fait que traditionnellement, les paramètres doivent être déterminés un à la fois ou que les analyses détruisent les échantillons. Le Laboratoire mobile de caractérisation physique, minéralogique et chimique des roches (LAMROC) de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) permet de mesurer presque simultanément et de manière non-destructive la densité, la susceptibilité magnétique, la géochimie et la minéralogie des carottes de forage, et ce directement sur les sites d'entreposage des carottes. Le LAMROC produit aussi une image numérique de haute qualité de la carotte, ce qui permet de comparer les mesures avec l'aspect visuel de la roche pour mieux comprendre les variations des différents paramètres et de constituer une archive virtuelle complète du forage.

Le MRNF a mandaté l'INRS pour réaliser une analyse multiparamétrique à haute résolution de carottes de forage avec le LAMROC dans la région de Matagami sur la période 2010-2012. La première année du projet (2010-2011) a permis de réaliser des mesures sur trois forages totalisant 2817 m (voir Partie 2). Dans le présent rapport (Partie 1), la méthodologie employée pour les mesures multiparamétriques du LAMROC est décrite en détail afin de permettre à l'utilisateur des données de juger de leur qualité. Cette description inclut la

préparation des carottes, le fonctionnement général du système automatisé pour l'analyse multiparamétrique de carottes de forage du LAMROC et le fonctionnement de chaque capteur ou appareil. Avant de débiter formellement les mesures, un grand nombre de tests techniques ont été effectués et plusieurs de ces tests sont également rapportés ici. Ces expériences ont permis de déterminer la précision et l'exactitude de la plupart des paramètres en réalisant des mesures répétées (précision) et en comparant les données du LAMROC avec celles obtenues sur des standards ou des échantillons grâce à des méthodes de mesures conventionnelles (exactitude). Les tests ont aussi permis de vérifier l'effet de certaines variables, comme l'humidité des carottes ou leur température, sur les données. Le rapport se termine sur un aperçu des développements méthodologiques anticipés pour la seconde année du projet (2011-2012).

Table des matières

| | |
|--|----|
| Résumé | 2 |
| Introduction | 5 |
| Description générale du laboratoire | 5 |
| Préparation des carottes pour le MSCL | 7 |
| Imagerie et effet de l'humidité | 10 |
| Effet de la température des carottes | 11 |
| Choix des points de mesure | 12 |
| Susceptibilité magnétique | 14 |
| Densité par atténuation gamma | 20 |
| Spectrométrie proche infrarouge et visible | 25 |
| Analyseur XRF portatif | 29 |
| Développements anticipés | 34 |
| Remerciements | 35 |
| Références | 36 |
| Figures | 40 |
| Tableaux | 65 |
| Annexe : Système de mesure de densité des roches par immersion du LAMROC | 71 |

Introduction

Le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF) a mandaté l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) pour réaliser une analyse multiparamétrique à haute résolution de carottes de forage dans la région de Matagami sur la période 2010-2012. Deux rapports et une base de données Access sont soumis après la première année du projet. Le présent rapport (Partie 1) présente la méthodologie utilisée par le Laboratoire mobile de caractérisation physique, minéralogique et chimique des roches (LAMROC) de l'INRS et discute de la performance du laboratoire. Le second rapport (Partie 2) décrit le contexte géologique de la région de Matagami, expose le problème à résoudre, résume brièvement la méthodologie employée, présente les résultats préliminaires et discute des plans pour la suite des travaux.

Le tableau 1 contient les définitions de certains termes employés dans ce rapport.

Description générale du laboratoire

Le LAMROC a été mis en service en juin 2010. L'équipement est contenu dans une remorque cargo modifiée de 6,1 m de long et 2,6 m de large, tirée par un véhicule 4x4 pour accéder aux sites d'entreposage des carottes de forage (Fig. 1a). Le laboratoire est équipé d'une génératrice de 50 ampères au cas où le courant ne serait pas disponible sur place. Un système de climatisation/chauffage et des fenêtres permettent de contrôler la température de l'air dans la remorque.

L'équipement principal du LAMROC est un système automatisé pour l'analyse multiparamétrique de carottes de forage, fabriqué par la compagnie Geotek Ltd. (Daventry, Angleterre) (Fig. 1b). Cette compagnie commercialise ce système sous le nom de *Multi-Sensor Core Logger* (MSCL). Habituellement, le MSCL sert à mesurer les propriétés physiques de carottes de sédiments non consolidés contenues dans une enveloppe de plastique (*liner*), par exemple les carottes obtenues pendant les programmes de forage scientifique. Récemment, Geotek Ltd. a proposé le MSCL pour mesurer les propriétés physiques sur les roches, et un groupe de recherche australien en fait l'essai depuis quelques années (Vatandoost et al., 2008).

Le MSCL comprend quatre éléments principaux : (1) une série de capteurs et d'instruments de mesure; (2) des rails et un pousseur; (3) une interface électronique; (4) un ordinateur qui contrôle l'équipement et enregistre les paramètres (Geotek Ltd., 2010). Le principe de base d'opération consiste à ce que chaque instrument/capteur prenne ses mesures de sorte qu'il n'y ait aucun doute sur la cohérence spatiale des résultats. Pour ce faire, le pousseur déplace une section de 1,5 m de carotte sur les rails et s'arrête le temps d'une mesure lorsqu'un point choisi, systématiquement ou arbitrairement, se retrouve dans le champ d'action d'un instrument/capteur. Le pousseur est guidé par un moteur électrique qui assure une précision sur le positionnement de 0,5 mm, et un même ordinateur contrôle à la fois les instruments/capteurs et le pousseur, de sorte que les différents paramètres sont automatiquement liés. Le système accepte les carottes entières ou les demi-carottes de tous les calibres courants (BQ = 36,5 mm de diamètre, NQ = 47,6 mm, HQ = 63,5 mm).

Les propriétés physiques possiblement mesurables par le MSCL incluent la susceptibilité magnétique, la densité par atténuation des rayons gamma, la vitesse des ondes sismiques, la résistivité électrique sans contact et le rayonnement gamma naturel. Geotek Ltd propose aussi une caméra à balayage linéaire (*line-scan*) qui permet d'obtenir des images de haute qualité des carottes de forage. Des paramètres susnommés, le MSCL du LAMROC peut mesurer la susceptibilité magnétique et la densité. Il dispose aussi de la caméra à balayage linéaire. L'INRS n'a pas fait l'achat du module pour mesurer la vitesse des ondes sismiques en raison de la rareté des levés sismiques dans le bouclier canadien. Aussi, le système de Geotek Ltd. pour mesurer la résistivité électrique est conçu pour les sédiments saturés en eau et semble peu applicable pour les roches très résistives. Enfin, le module pour les mesures de rayonnement gamma naturel initialement proposé était trop coûteux, mais il se peut que l'INRS puisse acquérir un module à moindre prix dans le futur.

L'INRS a plutôt opté pour l'ajout de nouveaux instruments qui semblaient plus utiles pour la caractérisation des roches de l'Est du Canada. En effet, à la demande de l'INRS, Geotek Ltd. a intégré au MSCL système deux nouveaux instruments :

- un spectromètre proche infrarouge et visible, pour détecter et semi-quantifier certains minéraux;
- un analyseur XRF portatif qui permet de détecter et quantifier certains éléments chimiques.

L'intégration au MSCL d'un spectromètre proche infrarouge et visible est une primeur; l'analyseur XRF n'a été intégré au MSCL qu'une seule fois précédemment. L'ajout de ces deux instruments, qui peuvent aussi être utilisés séparément, élargit considérablement l'éventail des mesures pouvant être réalisées sur les roches avec le MSCL. Le système automatisé pour l'analyse multiparamétrique des carottes de forage du LAMROC permet donc l'acquisition quasi-simultanée et non-destructive de mesures de propriétés physiques, géochimiques et minéralogiques.

En plus du MSCL, le LAMROC dispose de certains instruments et systèmes portables ou transportables pour les mesures complémentaires de propriétés physiques sur des carottes, sur d'autres échantillons de roche ou sur le terrain :

- un susceptibilité magnétique KT-10 de Terraplus Inc. (Richmond Hill, Ontario);
- un système de mesures de densités par immersion (poids dans l'air, poids dans l'eau) décrit en annexe;
- un spectromètre gamma portable RS-230 de Radiation Solutions Inc. (Mississauga, Ontario), qui contient un détecteur au germanium de 103 cm³, ce qui est l'équivalent, en termes de sensibilité, à un cristal de NaI de 390 cm³.

Préparation des carottes pour le MSCL

Transfert dans les bateaux et nettoyage

Au Québec, les carottes de forage au diamant sont typiquement entreposées dans des boîtes de bois contenant plusieurs sections de 1,5 m de long (5 pieds). Avant l'analyse au MSCL, les carottes sont d'abord nettoyées de leur poussière et autres débris avec une brosse. Grâce à un système de transfert fabriqué par Geotek Ltd. à la demande de l'INRS, les carottes

d'une boîte sont transférées d'un seul coup dans des contenants en fibre de verre de 1,55 m de long (Fig. 2) appelés bateaux (« *core boats* »). Le nombre de sections préparées simultanément dépend du nombre de sections par boîte, lui-même fonction du calibre des carottes. Les bateaux à carottes sont moulés sur mesure afin d'épouser parfaitement la forme des carottes. Dans le cas des demi-carottes (celles qui ont été sciées en deux sur la longueur pour fins d'analyse de métaux), le transfert dans les bateaux s'effectue à la main.

À la suite du transfert des carottes dans les bateaux, l'autre côté des carottes se trouve exposé et est également brossé vigoureusement (carottes entières seulement). Les morceaux de carotte sont rapprochés l'un de l'autre pour fermer les fractures dans la mesure du possible, afin de ne pas avoir une section dilatée; au besoin une légère rotation de certaines pièces est effectuée pour aider à refermer les fractures. Le début de chaque section est aligné exactement sur l'extrémité gauche du bateau.

Profondeurs

La profondeur en mètres du début de chaque section est inscrite au crayon gras sur la carotte (Fig. 3a) afin, d'une part, de s'assurer que les sections ne sont pas mélangées pendant les opérations et, d'autre part, que ce chiffre apparaisse sur les images de la caméra. Les blocs de bois introduits par les foreurs tous les trois mètres dans les boîtes de carottes sont placés verticalement à la position appropriée afin de dilater la carotte au minimum (environ 1 cm), et le métrage du bloc est recopié au feutre sur le dessus afin qu'il soit aussi visible sur l'imagerie (Fig. 3b) pour des fins de contrôle de la qualité. Enfin, dans le cas où une partie de la carotte est manquante à cause d'échantillonnage, une pièce de bois portant le numéro de l'échantillon est introduite dans l'espace vide (Fig. 3c).

Quelques commentaires supplémentaires s'imposent sur le sujet des profondeurs. Pour la section 1 de chaque boîte, la profondeur du début de section est toujours celle provenant de l'étiquette métallique de la boîte de bois. (Le nombre sur l'étiquette est typiquement arrondi au décimètre près, et non au centimètre près.) Ensuite, les blocs insérés dans les sections sont repérés; ceux-ci deviennent la référence pour déterminer la profondeur du début des sections dans lesquelles ils se trouvent (sauf pour la profondeur du début de la première

section) ainsi que pour la profondeur des sections qui suivent immédiatement. Par exemple, pour une boîte contenant un bloc à la section 1 et un autre à la section 3, la profondeur du début de la section 1 est déterminé par l'étiquette sur la boîte, la profondeur du début de la section 2 est déterminé par le bloc de la section 1, et la profondeur du début de la section 3 est déterminée par le bloc de la section 3.

Les problèmes inévitables de positionnement des carottes créent couramment des « trous » et des chevauchements de quelques centimètres (généralement moins de 5 cm dans des bonnes conditions) entre les sections d'une même boîte; on remarque ces problèmes mineurs quand on concatène les images de toutes les sections d'une même boîte. Notons que des trous et des chevauchements sont aussi inévitables entre les boîtes. Sur les images concaténées, en cas de chevauchement, ce sont les sections à numéro plus élevées qui cachent les précédentes. Par conséquence, si la position d'un point de mesure multiparamétrique n'apparaît pas sur l'image concaténée puisque cette position est cachée par l'image de la section suivante, le point de mesure en question est éliminé.

À cause de l'ambiguïté occasionnelle sur la position des blocs (ce bloc a-t-il bougé?), il est impératif d'utiliser la profondeur inscrite sur l'étiquette métallique comme référence de base tel qu'expliqué ci-dessus, et par conséquence l'erreur (par rapport à la profondeur vraie) sur la position enregistrée de chaque point de mesure devrait être de l'ordre de 5 cm dans un cas idéal. Le cas idéal est le suivant : récupération parfaite des carottes, pas d'échantillons de pris dans la boîte, les blocs de bois n'ont pas bougé, etc. Dans les cas non-idéaux, qui sont courants, l'erreur peut atteindre 10 cm, voire davantage si la récupération est faible, mais cette erreur ne se propage pas en principe à la prochaine boîte.

L'objectif de toutes ces règles est double : (1) les profondeurs des mesures enregistrées dans la base de données doivent refléter aussi fidèlement que possible les profondeurs vraies dans le forage; (2) la profondeur d'un point de mesure doit correspondre parfaitement (erreur de moins de 1 cm) à l'échelle de profondeur dans la marge de gauche des images, de sorte que l'utilisateur puisse savoir exactement où chaque mesure a été effectuée sur ces images. Ceci permet notamment de vérifier si certaines caractéristiques

géologiques des roches visibles sur les images, comme des veines ou de l'altération, ont pu affecter les mesures multiparamétriques.

Imagerie et effet de l'humidité

À la suite de la préparation des carottes, on procède à l'imagerie à l'état humide avec la caméra à balayage linéaire du MSCL. L'humidification se fait à l'eau propre avec un pinceau, ce qui achève de nettoyer la surface des carottes. L'eau du récipient dans lequel on trempe le pinceau est changée entre chaque section, puisqu'elle devient rapidement chargée de particules fines.

Le nettoyage rigoureux des carottes, qui résulte du brossage et de l'humidification pour l'imagerie, est important puisque plusieurs mesures du MSCL sont effectuées à la surface de la roche, avec une faible profondeur de pénétration (XRF, spectrométrie proche infrarouge et visible). Les carottes sèchent ensuite pendant au moins 10 minutes avant de procéder à l'acquisition des paramètres physiques, chimiques et minéralogiques.

L'effet de l'eau externe sur la spectrométrie proche infrarouge et visible des sols et des roches est bien connu (ex. Clark, 1981; Lobell et Asner, 2002) et inclut l'apparition de pics d'absorption additionnels, l'atténuation de d'autres pics, et même des décalages de certains pics (Gray, 1997). Ces effets peuvent clairement fausser l'interprétation minéralogique des spectres. Les tests de l'été 2010 montrent qu'un temps de séchage suffisant doit être alloué à la suite de l'imagerie des carottes pour se débarrasser de toute l'eau externe.

Spécifiquement, pour un des tests, une carotte de la boîte #13 du forage BRC-08-72 (voir Partie 2 pour la localisation des forages) a été mouillée au pinceau et une mesure de spectrométrie proche infrarouge et visible a été prise toutes les 7,5 s environ en laissant sécher la carotte à l'air libre entre les mesures (Fig. 4). Pour cet échantillon, un temps de séchage d'environ cinq minutes a été nécessaire pour obtenir un spectre qui ne changeait plus avec le temps (c.-à-d. un spectre dû uniquement aux minéraux dans la roche). Selon la porosité des roches et l'humidité dans le laboratoire, le temps de séchage nécessaire pourrait être plus long. Sur la base de cette expérience et de d'autres observations, un temps

de séchage de dix minutes a été adopté comme procédure standard. Quand l'air est humide dans le laboratoire, un ventilateur est utilisé pour accélérer le séchage.

Notons qu'en plus de l'effet sur la spectrométrie infrarouge et visible, l'eau dans les pores de la roche a aussi un effet sur les mesures XRF : Ge et al. (2005) rapporte une détérioration de la précision, de l'exactitude et des limites de détection des mesures XRF.

Effet de la température des carottes

Initialement, les boites de carottes étaient placées au moins une heure à l'avance dans le laboratoire afin que leur température s'équilibre avec celle de l'air ambiant (Vatandoost et al., 2008, suggèrent même 2-3 heures d'équilibration). Cependant, des tests effectués pendant l'été 2010 ont révélé que cette précaution était inutile puisque la température des carottes n'influence pas suffisamment les mesures pour que l'effet soit problématique.

Pour le premier test, deux propriétés physiques (susceptibilité magnétique et densité) et la signature spectrale proche infrarouge et visible de la boite #5 du forage BRC-08-72 ont été mesurées aux mêmes 22 positions à trois températures différentes : 15°C, 25°C et 35°C. La boite #5 contient du basalte tholéiitique faiblement magnétique (environ $100-130 \times 10^{-5}$ SI) d'aspect relativement homogène et on peut supposer que les propriétés physiques y suivent une distribution normale. La température des carottes a été mesurée à environ 10 cm de distance avec un détecteur de fuites de chaleur de marque Black & Decker, basé sur le rayonnement infrarouge, et dont l'exactitude est de $\pm 1,3^\circ\text{C}$ à 23°C selon le manuel d'instructions. La température de l'air du laboratoire est demeurée constante pendant les essais.

Aucune différence majeure n'a pu être détectée entre les trois séries de mesures, puisque les profils se superposent (Figs. 5, 6). Pour ce qui est des moyennes, une légère diminution de la susceptibilité magnétique est notée quand la température augmente, alors que la densité moyenne reste constante (Tableau 2). Un test t supposant des variables dépendantes montre que la différence entre les susceptibilités moyennes à 15°C et à 35°C est statistiquement significative, mais ce n'est le cas pour les différences de susceptibilités moyennes entre

15°C et 25°C ou entre 25°C et 35°C (Tableau 3). Le test non-paramétrique équivalent (test de Wilcoxon) suggère que toutes les différences sont statistiquement significatives avec un seuil de probabilité de 5%. Malgré ceci, les différences ne sont pas géologiquement importantes, tel que discuté plus bas.

Pour vérifier l'effet de la température des carottes pour les lithologies plus magnétiques, un second test a été effectué. Des mesures ont été réalisées à deux températures sur 18 points différents dans la boîte #107 du forage BRC-08-72. Cette boîte contient du gabbro dont la susceptibilité magnétique varie approximativement entre 7000 et 15 000 x 10⁻⁵ SI. Les moyennes et les écarts-types obtenus sont pratiquement identiques : 11 533 ± 1954 x 10⁻⁵ SI et 11 554 ± 1949 x 10⁻⁵ SI pour des carottes à 23°C et à 37°C, respectivement. Il s'agit d'une différence de seulement 0,2% sur la moyenne. Néanmoins, un test t supposant des variables dépendantes révèle que la différence entre les séries de mesures est statistiquement significative avec un seuil de probabilité de 5% (valeur p = 0,023). La même conclusion est tirée en utilisant le test de Wilcoxon (valeur p = 0,002).

Par contre, comme l'illustre les différences de susceptibilité magnétique entre le basalte de la boîte #5 et le gabbro de la boîte #107, la susceptibilité magnétique peut varier de plusieurs ordres de grandeur selon la lithologie. Des différences d'au plus quelques pourcent dues à la température des carottes ne sont donc pas importantes dans le contexte du projet Matagami. Ainsi, il a été décidé de ne pas s'occuper formellement de la température des carottes, bien qu'en pratique la grande majorité des boîtes ont le temps de s'équilibrer avec la température du laboratoire, qui elle est maintenue constante.

Choix des points de mesure

Le choix des points de mesure est une décision importante qui influence grandement la qualité et la représentativité des données du MSCL. De toute évidence, les fractures dans la carotte doivent être évitées à cause de leur influence sur tous les paramètres, qu'elles soient fermées ou ouvertes. Une méthode de détection automatique des fractures avec un laser a été proposée par Geotek Ltd. dans une perspective de maintenir un échantillonnage d'espacement constant tout en évitant les fractures (le laser doit détecter les fractures et

permettre au logiciel d'éliminer automatiquement les points non valides). Cependant, des tests ont rapidement montré que les fractures étroites n'étaient pas détectées et que les fractures à faible angle par rapport à l'horizontale étaient problématiques. Le mode *variable sampling* du logiciel du MSCL a donc été utilisé; ce mode permet d'entrer manuellement la profondeur relative des points de mesure désirés pour chaque section de carottes.

En pratique, la position de chacun des points de mesure est décidée en fonction de certains critères (listés ci-dessous) et entrée pour chaque section dans le logiciel du MSCL. Les positions sont exprimées en profondeurs relatives (en cm) par rapport au début de chaque section et mesurées à partir d'une planche graduée placée parallèlement à la section. Il suffit d'additionner ces positions aux profondeurs de chaque début de section afin de les convertir en profondeurs absolues (en mètres) le long du forage. Comme les images de la caméra du MSCL montrent, dans la marge, la profondeur absolue en mètres, tous les centimètres (ex. Fig. 3), il est possible de visualiser exactement la position de chaque point de mesure sur les images et de comparer les paramètres mesurés (propriétés physiques, géochimiques et minéralogiques) avec l'apparence visuelle de la roche.

Pendant les opérations d'acquisition de données régulières du LAMROC, le choix des points de mesure est basé sur les critères suivants :

- Chaque point est à environ 20-30 cm du point précédent;
- Aucun point n'est choisi à moins de 2 cm de toute fracture dans la carotte;
- Les points doivent être le plus représentatifs possible de la roche présente dans une section.

Le dernier critère implique notamment d'éviter les veines et veinules dans la mesure du possible, de même que les zones anormalement amygdalaires dans les roches volcaniques, et les endroits altérés si l'altération est irrégulière. Par contre, si les veines et veinules, les amygdales, ou les minéraux d'altération hydrothermale sont abondants dans toute la section, des points de mesure y sont choisis quand-même puisque ces éléments sont alors caractéristiques de la roche.

Les sections suivantes du rapport décrivent un par un les capteurs et les instruments installés sur le MSCL du LAMROC, ainsi que les tests effectués pour chaque paramètre.

Susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique volumétrique d'une roche correspond à son degré de magnétisation en réponse à l'application d'un champ magnétique. Il est important de bien connaître la susceptibilité magnétique des roches d'une région afin de pouvoir interpréter les levés géophysiques. Les valeurs typiques pour certaines lithologies sont listées au tableau 4 pour référence, mais l'utilisation de mesures réelles spécifiques à chaque région d'étude est fortement préférable à l'utilisation de valeurs typiques. Par exemple, le tableau 4 liste une plage de 100 à 9000 x 10⁻⁵ SI pour les gabbros et de 25 à 18 000 x 10⁻⁵ SI pour les basaltes, ce qui laisse croire qu'on ne pourra pas distinguer ces deux lithologies sur le levé du champ magnétique. Pourtant, à Matagami, les gabbros sont souvent beaucoup plus susceptibles que les basaltes (voir Partie 2).

La susceptibilité magnétique volumétrique est un paramètre sans unités, mais il faut préciser tout de même le système d'unités utilisé (SI ou CGS). Dans ce rapport et dans la Partie 2, toutes les susceptibilités sont exprimées en format SI.

Principe de mesure

Le MSCL utilise le capteur de susceptibilité magnétique MS2C *Core Logging Sensor* de Bartington Instruments Ltd. (Oxford, Angleterre), lequel est connecté par un câble coaxial au compteur MS2, fabriqué par la même firme. La carotte dans son bateau est introduite dans l'ouverture circulaire du capteur MS2C. Un champ magnétique alternatif de basse fréquence (0,565 kHz) et basse intensité (~80 A/m) est appliqué par le capteur. La présence de l'échantillon modifie la fréquence du champ magnétique, et cette nouvelle fréquence est utilisée pour calculer la susceptibilité magnétique (Bartington Instruments Ltd., non daté). Les mesures sont effectuées en 1,1 s en format SI (0,9 s en format CGS).

Dérive instrumentale et influence de la température de l'air

Les mesures de susceptibilité magnétique dépendent de la température de l'air ambiant (Geotek Ltd., 2010). Pour éliminer toute possibilité de dérive instrumentale et d'influence de la température, le compteur MS2 est remis à zéro automatiquement par le MSCL avant le passage de chaque nouvelle boîte de carottes, ou chaque série de deux boîtes. Notons que le capteur MS2C n'est pas influencé par la présence ou l'absence du bateau à carottes.

Étalonnage, précision et exactitude

L'étalonnage du capteur MS2C a été réalisé avant la livraison par Bartington Instruments Ltd. et en principe ne s'altère pas dans le temps puisqu'il dépend de l'électronique du système MS2 (Geotek Ltd., 2010). Pour fins de vérification, un cylindre en béton contenant une faible quantité de minéraux magnétiques est fourni avec chaque capteur MS2C. La valeur mesurée sur le cylindre doit être à l'intérieur de 5% de la valeur inscrite dessus (Bartington Instruments Ltd., non daté). Cette vérification a été faite régulièrement pendant l'été, en particulier à la suite du déplacement du LAMROC ou du démontage/remontage du MSCL; l'exactitude était toujours mieux que 1%.

La précision des mesures du système MS2 est $<1 \times 10^{-5}$ SI pour des échantillons faiblement magnétiques, comme le cylindre de béton ($\kappa \sim 500 \times 10^{-5}$ SI). En pourcentage, il s'agit d'une précision $<0,2\%$. Des séries de mesures sur ce cylindre n'ont pas été enregistrées pour en calculer l'écart-type, puisque la valeur mesurée était presque toujours la même à l'échelle de quelques minutes lors de tests de précision. Il serait souhaitable de faire un test de précision sur un échantillon de susceptibilité plus élevée.

Correction pour les diamètres; susceptibilités élevés

La plage de mesures de susceptibilités magnétiques (κ_{uncor}) du compteur MS2 est de 1 à 9999×10^{-5} SI, mais pour les carottes de forage il ne s'agit pas des vraies susceptibilités puisqu'il faut appliquer un facteur de correction (F_d) pour tenir compte du diamètre de la carotte. La susceptibilité magnétique volumétrique corrigée (κ) est calculée par la formule

$$\kappa = \kappa_{\text{uncor}} / F_d \text{ (} 10^{-5} \text{ unités SI)}$$

où F_d est fonction du diamètre de la carotte (d) et du diamètre interne du capteur MS2C (D_1) selon une relation déterminée expérimentalement (Geotek Ltd., 2010):

$$F_d = 4,8566 (d/D_1)^2 - 3,0163 (d/D_1) + 0,6448.$$

Pour les carottes de calibre NQ, $D_1 = 100$ mm et $d = 47,6$ mm, donc $F_d = 0,309$, ce qui donne une plage de mesures de κ entre 3 et 32359×10^{-5} SI pour des carottes entières (multiplier approximativement par deux pour les demi carottes – voir plus bas). Le tableau 4 donne des susceptibilités typiques de différentes lithologies et montre que pour des roches ignées, sédimentaires ou métamorphiques typiques, cette plage de susceptibilités magnétiques convient bien. Notons que le compteur MS2 offre un mode « 0.1 » qui permet de diminuer la limite inférieure de κ_{uncor} à $0,1 \times 10^{-5}$ SI, mais l'utilisation de ce mode n'a pas été nécessaire jusqu'à maintenant sur les roches de Matagami.

Le tableau 5 donne les valeurs typiques pour des minéraux purs et montre que si une roche contient des quantités appréciables de magnétite, ilménite, titanomagnétite ou pyrrhotite, elle risque de posséder une susceptibilité magnétique plus grande que la limite supérieure du compteur MS2, spécialement pour les carottes entières. Par exemple, pour une carotte NQ entière, environ 4-5% de magnétite serait suffisant pour obtenir $30\,000 \times 10^{-5}$ SI selon un graphique de Parasnis (1997). Dans le cas de roches très susceptibles, il est donc souhaitable de prendre également des mesures au KT-10, qui a une plage de mesures entre 0,1 et $99\,999 \times 10^{-5}$ SI. Une comparaison des mesures au MSCL et des mesures au KT-10 est présentée ci-dessous.

Vatandoost et al. (2008) ont rencontré le même problème : les minerais peuvent avoir une susceptibilité magnétique dépassant la limite du système MS2 de Bartington Instruments Ltd. Comme ils s'intéressent surtout aux minerais métallifères, ces auteurs ont choisi d'augmenter le diamètre D_1 (pour diminuer F_d) et ont même fait modifier physiquement leur capteur MS2C par le fabricant afin d'atteindre une susceptibilité maximale de ~ 3 SI (Vatandoost et al., 2008; A. Vatandoost, comm. pers., 2010). Cependant, ces modifications

créent une perte de sensibilité qui a été jugée non souhaitable puisque la majorité des roches étudiées ne sont pas des minerais. Aussi, le nouveau compteur MS3 de Bartington Instruments Ltd., qu'il est prévu d'acquérir prochainement, permet de mesurer des susceptibilités magnétiques très élevées, y compris celles de minerais de fer.

Correction pour les carottes sciées

Quand des sulfures sont présents dans les carottes de forage, les carottes sont sciées en deux ou fendues par les compagnies d'exploration pour analyser sur une moitié les métaux d'intérêt économique. Les opérations du LAMROC doivent tenir compte de cet état de fait. À Matagami, les demi-carottes ayant fait l'objet de mesures jusqu'à maintenant (Partie 2) étaient sciées. L'épaisseur des « demi-carottes » varie beaucoup d'un point de mesure à l'autre, donc il est nécessaire d'en mesurer l'épaisseur au vernier et d'appliquer un facteur de correction pour la partie manquante. Dans le cas de la susceptibilité magnétique, le facteur de correction (F_s) dépend du volume manquant (que l'on peut résumer par la surface verticale manquante en supposant que la carotte est longue dans la dimension horizontale) selon la relation :

$$F_s = \frac{2}{1 - \frac{2}{\pi} \left(\theta + \frac{\Delta}{R} \cos \theta \right)}$$

où R est le rayon de la carotte entière, Δ est la partie manquante du rayon (positif si la demi-carotte est mince, et négatif si la demi-carotte est épaisse) et θ est l'angle d'un triangle rectangle dont le côté opposé est Δ et l'hypoténuse est R (Vatandoost et al., 2008). Le facteur F_s est de 2 si $\Delta = 0$.

Résolution limite

Le capteur MS2C est prévu pour pouvoir réaliser des mesures à haute résolution (20 mm) sur des matériaux à faible susceptibilité comme des sédiments (Bartington Instruments Ltd., non daté). Des tests sur des sulfures massifs de Matagami, qui possèdent une forte susceptibilité magnétique, ont été réalisés pour vérifier la résolution limite. Les mêmes

sections de carottes ont été traitées avec un espacement entre les mesures de 2 cm et de 10 cm. La comparaison des profils aux deux résolutions suggère que pour des matériaux fortement susceptibles, la limite de résolution du capteur est quelque part entre 2 et 10 cm, puisque les profils à 2 cm sont très lisses à cause de l'influence des roches à l'extérieur du capteur (ex., Fig. 7). Dans les opérations courantes du LAMROC, l'espacement entre les mesures est normalement de plusieurs décimètres.

Comparaison MSCL – KT-10

Un test comparatif entre les mesures au MSCL avec le capteur MS2C et les mesures avec l'appareil portatif KT-10 a été réalisé. Le KT-10, ou des versions antérieures de cet appareil, sont couramment utilisés en exploration minière (par exemple, par Xstrata Zinc à Matagami). L'objectif du test était simplement de vérifier la correspondance des mesures entre les deux appareils. Les huit boîtes suivantes du forage BRC-08-72 ont été choisies : #4 (basalte), #65 (andésite), #97 (gabbro), #107 (gabbro à quartz, magnétique), #121 (Rhyolite de Bracemac), #127 (sulfures massifs), #135 (Rhyolite de Watson fortement chloritisée), #146 (Rhyolite de Watson modérément chloritisée). Ces huit boîtes représentent l'ensemble des lithologies importantes typiques du secteur de Bracemac-McLeod, et donc la gamme des susceptibilités magnétiques que l'on pense rencontrer dans ce secteur. Les carottes ont été transférées dans les bateaux, puis des mesures ont été faites aux 10 cm par les deux méthodes, avant que les carottes soient remises dans leurs boîtes d'origine.

Si on exclut les points de mesures où la carotte était brisée ou partiellement manquante, il reste 324 couples de mesures. De ce nombre, 230 couples proviennent de carottes entières faiblement magnétiques ($\kappa < 500 \times 10^{-5}$ SI avec le capteur MS2C), incluant des mesures sur les boîtes #4, #65, #97, #121, #135, et #146. Visuellement, les profils de susceptibilité magnétiques par les deux méthodes sont très similaires pour cette sous-population (Fig. 8) et la corrélation entre les deux séries de mesures est de 96%. La droite de régression linéaire entre les deux séries de mesures, que l'on a forcé à passer par (0,0), montre une pente de 0,81 (Fig. 9), ce qui indique que le KT-10 sous-estime les valeurs de susceptibilité magnétique d'environ 24%. La différence entre les deux méthodes pourrait s'expliquer par

la configuration différente des bobines de fils par rapport à l'axe de la carotte: dans le cas du KT-10, la bobine est déposée à plat (axe vertical) sur la carotte horizontale, alors que pour le MS2C l'axe de la bobine est coaxial avec la carotte horizontale.

Les roches à forte susceptibilité ($\kappa > 2000 \times 10^{-5}$ SI) testées dans le forage BRC-08-72 sont de deux types : les gabbros magnétiques (boite #107, n = 45, carottes entières) et les sulfures massifs (boite #127, n = 18, demi-carottes). Le nombre de paires de mesures est plus faible pour les sulfures massifs parce qu'il ne restait souvent qu'un quart de carotte dans cette boîte, dont toute la section 2; ces quarts de carottes n'ont pas été utilisés. Certains profils de susceptibilité en fonction de la profondeur sont montrés à la figure 10 et les diagrammes de corrélation sont représentés à la figure 11. Pour les gabbros magnétiques, la corrélation entre les deux séries est de 90%. Le phénomène de la sous-estimation de la susceptibilité magnétique par le KT-10 se poursuit pour les gabbros magnétiques, mais cette fois-ci la sous-estimation est d'environ 33%.

Dans le cas des sulfures massifs, les couples de mesures se situent pour la majorité près de la droite 1:1 sur la figure 11, ce qui indique une bonne correspondance entre les méthodes et l'absence de sous-estimation par le KT-10, ce qui est surprenant compte tenu des résultats précédents. Possiblement le design et la calibration du KT-10 ont été faits en fonction de bien mesurer les minerais plutôt que les gabbros. Toutefois, pour les valeurs de $\kappa > \sim 60\,000 \times 10^{-5}$ SI, on approche ou dépasse la limite des capacités du compteur MS2 pour les demi-carottes. Les valeurs mesurées avec compteur MS2 sur des roches dont la susceptibilité magnétique est supérieure à cette limite ne sont pas pertinentes (la valeur indiquée semble relativement aléatoire, voir Figs. 10-11), mais le système MS2 n'avertit pas l'utilisateur que la limite est dépassée. Le seul moyen de savoir que la limite a été dépassée est de prendre aussi des mesures au KT-10 tel que fait au cours de ce test. Cette précaution est seulement nécessaire pour les carottes de sulfures massifs, et comme le pourcentage d'intervalles de sulfures massifs dans un forage typique est faible, cette procédure ne représente pas une perte de temps significative. Tel qu'indiqué ci-dessus, ce problème sera réglé sous peu par le remplacement du MS2 par le compteur MS3.

Densité par atténuation gamma

La densité d'une roche correspond à sa masse divisée par son volume. Une bonne connaissance des densités des roches d'une région est importante pour l'interprétation des levés de gravité, en particulier pour les inversions géophysiques. Les valeurs de densité typiques pour certaines lithologies sont listées au tableau 4. La densité se mesure traditionnellement par la pesée dans l'air et dans l'eau d'un échantillon (méthode d'immersion). Une méthode plus rapide, utilisée par le MSCL, est l'atténuation des rayons gamma.

Principe de mesure

Une source de ^{137}Cs (10 millicuries) émet un faisceau vertical étroit de rayons gamma (énergie de 0,662 MeV) qui traverse la carotte de forage de haut en bas. Les photons qui ne sont pas perturbés par l'interaction avec la roche sont détectés de l'autre côté de la carotte, par scintillation d'un cristal de NaI de 2 pouces de diamètre par 2 pouces d'épais (Figs. 1b, 12) (Geotek Ltd., 2010). 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. L'atténuation des rayons gamma est fonction du diamètre de la carotte (d) et de la densité de la roche (ρ_{brut}). La notation ρ_{brut} est utilisée puisqu'une correction à la densité gamma est proposée ci-dessous.

Étalonnage

Le MSCL enregistre des mesures de rayonnement gamma atténué en coups par seconde (cps), que l'on peut convertir en densités brutes grâce à une courbe d'étalonnage qui se visualise par un graphique $\rho_{\text{brut}} \cdot d$ vs. $\ln(\text{cps})$ (Fig. 13). Cet étalonnage est fait deux fois par jour (avant le début des mesures sur les carottes de forage, et à la toute fin) pour contrôler la dérive du détecteur. Cette dérive peut être due à des variations de température dans le laboratoire (Geotek Ltd., 2010) ou à l'exposition prolongée à des flux élevés de rayons gamma (Vatandoost et al., 2008). La température dans la remorque est donc maintenue constante à 22°C dans la mesure du possible, grâce notamment à un climatiseur. Dans le cas où des variations importantes de température se produiraient au cours d'une journée en particulier, un troisième étalonnage serait réalisé vers midi.

L'étalonnage est réalisé sur une pièce d'aluminium ($2,71 \text{ g/cm}^3$) (Fig. 12) placée horizontalement dans un bateau à carottes. La pièce d'étalonnage comprend plusieurs segments cylindriques de diamètre différent pour simuler des échantillons de densité différente. Le diamètre maximal de la pièce correspond à celui des carottes de forage d'intérêt : il y a donc une pièce d'étalonnage différente pour chaque calibre de carottes. Pour une pièce donnée, on compte les photons pendant 120 s pour chaque segment, ce qui donne plusieurs points sur le graphique $\rho_{\text{brut}} \cdot d$ vs. $\ln(\text{cps})$. On calcule une régression linéaire entre ces points (ex., Fig. 13). Un long temps de mesure est nécessaire pendant l'étalonnage pour assurer une précision maximale. Notons que sur la figure 13, pour fins d'étalonnage, la « densité moyenne » est la densité brute d'un cylindre imaginaire de calibre NQ, qui comprend un cylindre d'aluminium de diamètre variable, entouré d'air. Puis, quand on utilise la courbe d'étalonnage pour calculer les densités brutes d'échantillons inconnus (ρ_{brut}), on place « $\ln(\text{cps})$ » dans l'équation et on trouve $\rho_{\text{brut}} \cdot d$. Comme le diamètre nominal des carottes est connu, on peut trouver la densité brute.

Cette méthode d'étalonnage, qui est celle suggérée par Geotek Ltd., est imparfaite pour plusieurs raisons. D'une part, la densité des roches de Matagami dépasse typiquement celle de l'aluminium, se sorte qu'il faut extrapoler au-delà des limites de la courbe d'étalonnage. D'autre part, les segments de petits diamètres de la pièce d'étalonnage (ex. 1,5 cm, 2 cm, 2,5 cm) ne semblent pas appropriés pour une carotte NQ et un faisceau de rayons gamma collimé à 5 mm, tel qu'utilisé pendant les mesures. Ces petits diamètres pourraient produire des effets de courbure. Le segment le plus problématique est celui de 1,5 cm, qui a été éliminé des courbes d'étalonnage, mais il a fallu garder les autres segments étroits pour conserver suffisamment de points sur les courbes. La manière dont l'étalonnage imparfait est corrigé est discutée ci-dessous. Une nouvelle méthode d'étalonnage qui éliminerait potentiellement ces problèmes est en développement.

Précision des mesures

La précision de la méthode de mesures de densités par atténuation gamma varie en fonction du temps d'intégration et du flux primaire de rayons gammas. Vatandoost et al. (2008) ont

déterminé que pour une source identique collimée à 5 mm, la précision est de $0,01 \text{ g/cm}^3$ pour un temps d'intégration de 8 s.

Pour s'assurer d'obtenir une précision de $0,01 \text{ g/cm}^3$ ou mieux, un temps d'intégration de 10 s a été choisi pour les mesures de routine du LAMROC. La précision a été vérifiée grâce à plusieurs tests sur un cylindre d'aluminium. Par exemple, la figure 14a montre des séries de mesures aux 10 s pendant environ 10 minutes (51 à 77 mesures de 10 s), pour des températures de l'air différentes. (L'objectif de ce test était de vérifier l'effet de la température de l'air sur les densités, mais le test peut aussi servir à calculer la précision des données.) Les séries de mesures sont espacées d'environ une demi-heure. L'écart-type a été calculé pour chaque série et varie entre $0,008 \text{ g/cm}^3$ et $0,010 \text{ g/cm}^3$, la valeur inférieure revenant le plus souvent. Le test confirme donc que la précision des mesures de 10 s est $<0,01 \text{ g/cm}^3$, soit environ 0,4% d'erreur pour l'aluminium.

La figure 14b montre un test similaire, au cours duquel la température de l'air ambiant est demeurée constante. Huit séries de 52 à 76 mesures de 10 s ont été réalisées sur une période d'environ 7 heures, avec des écarts-types de $0,008$ à $0,009 \text{ g/cm}^3$. Toutefois, dans ce cas, les densités moyennes mesurées sont demeurées approximativement constantes, puisque la température ne variait pas dans le temps. Ce test montre non seulement la précision des mesures de densité du MSCL mais aussi l'importance de conserver une température constante dans le laboratoire pendant la journée et pendant la nuit pour que la température du détecteur gamma ne fluctue pas à long terme. Les fluctuations à court terme sont acceptables en raison de l'importante masse de métal entourant le détecteur de rayons gamma.

Ajustement pour les carottes sciées

Dans le cas des carottes sciées, un ajustement est nécessaire pour compenser la roche manquante. On suppose que le faisceau de rayons gamma est unidimensionnel (linéaire vertical) en traversant la carotte. Le facteur de correction est alors simplement d/e , où d est le diamètre nominal de la carotte entière, et e est l'épaisseur mesurée de la carotte sciée. Par

exemple, si l'épaisseur mesurée correspond à la moitié du diamètre nominal de la carotte, on multiplie la densité initialement calculée par deux pour obtenir la densité brute.

Comparaison MSCL – densités par immersion

Boszczyk (2009) a réalisé des mesures de densité par immersion (poids dans l'air, poids dans l'eau), notamment sur les carottes des forages BRC-08-72 et MC-05-18, et on peut utiliser ces mesures pour évaluer de façon approximative l'exactitude des données de densité brutes du MSCL sur les mêmes forages. La figure 15 illustre que les mesures brutes du MSCL surestiment systématiquement la densité des roches étudiées. Malheureusement, les pièces de carottes ayant fait l'objet de mesures par Boszczyk (2009) ont été détruites en 2008 pour fins d'analyses géochimiques et n'ont forcément pas pu être incluses dans les mesures au MSCL. Il n'est donc pas possible d'utiliser directement les données de Boszczyk (2009) pour établir un facteur de correction pour les mesures du MSCL.

De nouvelles mesures de densité par immersion donc ont été réalisées sur les huit boîtes du forage BRC-08-72 précédemment utilisées pour les mesures aux 10 cm de susceptibilité magnétique (#4, #65, #97, #107, #121, #127, #135, et #146). Ces boîtes représentent l'ensemble des lithologies majeures du forage, et donc couvrent la gamme des densités attendues pour les roches du secteur. La densité de chacun des 145 morceaux de carotte, numérotés individuellement, a été déterminée par immersion à l'INRS avec l'équipement et la méthode décrits en annexe de ce rapport. Parmi ces échantillons, 31 étaient des pièces de carotte sciée et 114 des pièces de carotte entière. Notons que les sulfures massifs, dont la densité est bien plus élevée ($>3,9 \text{ g/cm}^3$) que celle des autres lithologies, étaient seulement représentés par des carottes sciées.

Dans le cadre d'une telle expérience, plusieurs mesures au MSCL sont nécessaires pour chaque morceau afin d'atténuer l'effet de la variabilité à petite échelle de la roche. Ainsi, les densités brutes de tous ces échantillons ont été déterminées au MSCL tous les 2 cm, ce qui donne 1 à 18 mesures par morceau de carotte, pour une moyenne de 6 mesures par morceau et un total de 901 mesures. Les résultats sont discutés ci-dessous. Il s'est avéré nécessaire de traiter séparément les carottes entières et les carottes sciées.

Correction proposée pour compenser l'étalonnage imparfait du MSCL – carottes entières

La figure 16 compare la moyenne des mesures brutes du MSCL pour chaque morceau de carotte entière avec la mesure de densité équivalente par immersion. La corrélation entre les deux séries est de 96%. Tel qu'anticipé, le MSCL surestime légèrement les densités des roches de Matagami à cause de la méthode imparfaite d'étalonnage. Une correction empirique des mesures du MSCL permet de les ajuster à la baisse pour qu'elles correspondent mieux aux densités par immersion. Ce paramètre est nommé « densité corrigée » (ρ_{corr}) :

$$\rho_{\text{corr}} = 0,9022 \rho_{\text{brut}} + 0,2051.$$

Cette correction empirique, établie sur la base d'une régression linéaire (Fig. 16), est proposée pour la gamme de densités brutes de 2,8 à 3,2 g/cm³, sur des carottes entières seulement, avec la méthode d'étalonnage décrite ci-haut. Deux exemples extrêmes sont donnés pour illustrer l'effet de cette correction : $\rho_{\text{brut}} = 2,80 \text{ g/cm}^3$ devient $\rho_{\text{corr}} = 2,73 \text{ g/cm}^3$ (diminution de 0,07 g/cm³), et $\rho_{\text{brut}} = 3,20 \text{ g/cm}^3$ devient $\rho_{\text{corr}} = 3,09 \text{ g/cm}^3$ (diminution de 0,11 g/cm³).

La figure 17 montre, sous forme de profils de densité en fonction de la profondeur, comment la correction proposée ramène les mesures du MSCL près des mesures par immersion. La base de données Access contient deux colonnes de densités, brutes et corrigées, pour que l'utilisateur puisse choisir laquelle il désire utiliser. L'utilisation de la densité corrigée est toutefois recommandée.

Correction proposée pour compenser l'étalonnage imparfait du MSCL – carottes sciées

La figure 18 compare la moyenne des mesures brutes du MSCL pour chaque morceau de carotte sciée avec la mesure de densité équivalente par immersion. La corrélation entre les deux séries est de 99%. En général, les densités des carottes sciées sont aussi sous-estimées par le MSCL, mais étonnamment convergent vers la ligne 1:1 pour les sulfures massifs. Comme le comportement des carottes sciées semble différent de celui des carottes entières, une correction différente est proposée pour les carottes sciées :

$$\rho_{\text{corr}} = 1,1307 \rho_{\text{brut}} - 0,5728.$$

Cette correction empirique, établie sur la base d'une régression linéaire (Fig. 18), est proposée pour la gamme de densités brutes de 2,9 à 4,4 g/cm³, sur des carottes sciées seulement, avec la méthode d'étalonnage décrite ci-haut. Deux exemples extrêmes sont mentionnés pour illustrer l'effet de cette correction : $\rho_{\text{brut}} = 2,90 \text{ g/cm}^3$ devient $\rho_{\text{corr}} = 2,71 \text{ g/cm}^3$ (diminution de 0,19 g/cm³), et $\rho_{\text{brut}} = 4,40 \text{ g/cm}^3$ devient $\rho_{\text{corr}} = 4,40 \text{ g/cm}^3$ (diminution de 0,00 g/cm³) (voir aussi Fig. 19). De toute évidence, d'autres tests seront nécessaires pour mieux comprendre le comportement des carottes sciées. La base de données Access contient deux colonnes de densités, brutes et corrigées, pour que l'utilisateur puisse choisir laquelle utiliser. L'utilisation de la densité corrigée est toutefois recommandée.

Spectrométrie proche infrarouge et visible

La spectrométrie proche infrarouge et visible (Clark, 1999) permet d'identifier et de semi-quantifier certains minéraux, notamment des minéraux produits par l'altération hydrothermale et déposés dans les veines et veinules. Ces minéraux font partie des quatre familles suivantes : silicates, carbonates, sulfates, et oxydes (Huntington et al., 1997). Spécifiquement, on pense à des minéraux comme l'alunite, les argiles (smectite, kaolinite, dickite, etc.), la biotite, les carbonates (calcite, dolomite, ankérite, magnésite, ...), la chlorite, l'épidote, le gypse, l'hématite, la jarosite, les micas blancs (muscovite, paragonite, phengite, illite), la phlogopite, la serpentine, le talc, et la tourmaline.

Cette méthode permet aussi d'identifier des minéraux métamorphiques comme les amphiboles, la prehnite, et les zéolites (Huntington et al., 1997). Une autre application intéressante est de donner des indications sur la chimie minérale, par exemple la semi-quantification du ratio Fe:Mg des chlorites (Yang et al., 1997) ou l'identification des variétés de micas blancs et de leur contenu en Al (Scott et Yang, 1997; Yang et al., 2011). Les variations spatiales dans la chimie des micas blancs ont des applications en exploration, notamment pour les sulfures massifs volcanogènes (SMV) (Yang et al., 1997, 2011; Huntington et al., 1999; Herrman et al., 2001).

La spectrométrie proche infrarouge et visible permet donc – sans préparation d'échantillons – d'identifier des minéraux à grains fins difficilement reconnaissables à l'œil nu, de différencier les variétés de certaines espèces minérales comme les micas ou les argiles et de semi-quantifier les proportions de mélanges de minéraux comme la chlorite et les micas blancs, typiques des zones d'altération des SMV. Il est possible de développer des vecteurs d'exploration à partir de ces données.

Une des limitations de la spectrométrie proche infrarouge et visible est qu'un minéral doit être suffisamment abondant dans un échantillon pour être identifié; les limites de détection sont de plusieurs pourcent (Thompson et al., 1999). Certains minéraux foncés ont des limites de détection de plus de 10%. Typiquement entre un et trois minéraux peuvent être identifiés pour chaque échantillon (Huntington et al., 1997).

Principe de mesure

Le premier appareil utilisé couramment sur le terrain pour la minéralogie des roches par spectrométrie proche infrarouge était le PIMA (*Portable Infrared Mineral Analyser*), introduit en 1991 (Thompson et al., 1999). Cet instrument dispose d'une source lumineuse interne et est toujours disponible commercialement. Les longueurs d'onde couvertes sont de 1300 nm à 2500 nm. Le temps de mesure est de l'ordre de 30 s ou plus par échantillon (Thompson et al., 1999; Yang et al., 2011). Cet appareil était le plus répandu en exploration à la fin des années 1990 (Thompson et al., 1999).

La firme Analytical Spectral Devices (ASD) Inc. (Boulder, Colorado) a développé des produits concurrents qui permettent des mesures beaucoup plus rapides (<1 s) et qui incluent la lumière visible. Des appareils comme le *TerraSpec® Portable Vis/NIR Mineral Spectrometer* de ASD Inc., ou des spectromètres équivalents de la même firme, sont donc de plus en plus utilisés comme alternative au PIMA (ex., Canet et al., 2010).

L'instrument intégré au MSCL est le *LabSpec 2600 Portable Vis/NIR Spectrometer* de ASD Inc.: c'est l'équivalent du TerraSpec. Une source lumineuse artificielle émettant dans les longueurs d'onde d'intérêt est mise en contact direct avec la carotte de forage grâce au

High Intensity Contact Probe de ASD Inc. La zone illuminée est un cercle de 1 cm de diamètre. Une partie de la lumière est réfléchiée et une autre est absorbée par la roche. Les longueurs d'ondes absorbées dépendent de la minéralogie. L'appareil mesure le facteur de réflexion (en anglais : *reflectance*), c'est-à-dire le ratio entre l'énergie réfléchiée et l'énergie incidente, pour des longueurs d'onde entre 350 et 2500 nm. Trois spectromètres sont utilisés pour couvrir la lumière visible et la partie pertinente du proche infrarouge : 350-1000 nm, 1000-1800 nm et 1800-2500 nm. La résolution spectrale est de 3 nm pour une longueur d'onde de 700 nm, de 6 nm pour une longueur d'onde de 1400 nm et de 6 nm pour une longueur d'onde de 2100 nm (ASD Inc., 2007). L'intervalle d'échantillonnage est 1,4 nm entre 350-1000 nm et 2 nm entre 1000-2500 nm. Les mesures en tant que telles prennent moins d'une seconde, mais il faut y ajouter le temps de baisser et de remonter la source lumineuse avec le MSCL.

Étalonnage

L'étalonnage de l'appareil est fait avant chaque nouvelle boîte de carottes (une fois par heure suffirait mais pour l'instant le logiciel du MSCL ne permet pas de conserver la calibration entre les boîtes). Il s'agit de mettre une tuile blanche en contact avec la source lumineuse pour obtenir une lecture à un facteur de réflexion de 100% (*white calibration*). Ensuite l'appareil ferme un obturateur et obtient une mesure à 0% (*black calibration*). La tuile d'étalonnage est constituée de Spectralon, un polymère spécial dont le facteur de réflexion est près de 100% pour les longueurs d'onde d'intérêt. Tous les jours, la tuile est sablée délicatement sous un jet d'eau avec un papier abrasif très fin (1000 grains), afin d'éliminer toute impureté de la surface.

Répétabilité

Un test de répétabilité a été réalisé. La section 1 de la boîte #13 du forage BRC-08-72 a été placée dans un bateau à carotte et analysée deux fois de suite aux mêmes six points (profondeurs relatives : 10, 46, 70, 92, 114, et 136 cm). Un nouvel étalonnage de l'appareil a été réalisé entre les deux séries de mesures. Les carottes sont restées dans le bateau entre les deux séries. Le test montre que la répétabilité des mesures est excellente quand la tuile de Spectralon est propre (exemple : Fig. 20). Si la carotte avait été remise dans sa boîte

entre les séries puis retransférée dans le bateau, la correspondance entre les séries serait sans doute moins bonne, puisque les points de mesure n'auraient pas été exactement les mêmes. Un autre facteur important pour la répétabilité est la propreté de la tuile d'étalonnage (ex., Fig. 6).

Interprétation des spectres

La méthode la plus répandue pour l'interprétation spectrale est la comparaison visuelle du spectre de chaque échantillon avec des bibliothèques de spectres couvrant une gamme de minéraux (ex. Thompson et al., 1999). Une des bibliothèques bien connue est celle distribuée gratuitement par l'U.S. Geological Survey (Clark et al., 2007); des bibliothèques commerciales sont aussi disponibles. Les critères utilisés pour l'identification minéralogique sont la forme générale du spectre et l'étude des pics d'absorption : profondeur, largeur et position (longueur d'onde) (Thompson et al., 1999). Cette méthode dite « visuelle » est relativement subjective (Canet et al., 2010), puisque la qualité de l'interprétation dépend de l'expérience de la personne qui fait l'interprétation. De plus, cette méthode est difficilement applicable pour des bases de données de milliers de spectres.

L'interprétation des spectres du LAMROC est faite grâce au logiciel *The Spectral Geologist* (TSG), version *Core*. Ce logiciel a été développé par l'organisme *Australian Commonwealth Scientific and Research Organization* (CSIRO) à la suite de plusieurs années de recherche. Il est possible d'utiliser la méthode « visuelle » avec ce logiciel. Toutefois, le logiciel a été conçu afin de traiter jusqu'à des milliers de spectres simultanément et propose donc une identification automatique des minéraux. En effet, la fonction *The Spectral Assistant* identifie un ou plusieurs minéraux dans la roche, et suggère des proportions quand plus d'un minéral est identifié (Berman et Bishof, 1997; Huntington et al., 1997) (Fig. 21). Notons qu'il s'agit de proportions d'un mélange de minéraux qui explique la signature spectrale, et non de réelles proportions volumétriques ou massiques de minéraux dans la roche. Les minéraux qui ne sont pas spectralement actifs (quartz, feldspath, etc.) ne sont pas pris en compte dans les calculs. Notons aussi que plusieurs solutions sont proposées par *The Spectral Assistant*, en ordre de probabilité. Seule la solution la plus probable est incluse dans la base de données Access.

Il est possible, voire presque certain, que des erreurs se produisent lorsque des minéraux sont identifiés automatiquement par un logiciel. Néanmoins, c'est la seule solution réaliste pour traiter rapidement des milliers de spectres, et un des intérêts de cette méthode est de traiter simultanément un grand nombre d'échantillons possédant une relation spatiale entre eux. Il est clair que de tels échantillons risquent d'avoir une minéralogie similaire s'ils ont été pris près l'un de l'autre. Par exemple, en considérant toutes les données d'un forage d'un seul coup, on peut identifier des associations minéralogiques correspondant possiblement à différentes zones d'altération (Huntington et al., 1997).

Notons tout de même certaines faiblesses de *The Spectral Assistant* signalées par Huntington et al. (1997). D'abord, l'illite et la muscovite peuvent être confondues. Ensuite, dans les échantillons foncés, la chlorite peut être confondue avec l'épidote, et la biotite avec la phlogopite. Enfin, la limite de détection pour la calcite est d'environ 20-25%, une limite beaucoup plus élevée que celle de la majorité des autres minéraux spectralement actifs.

Analyseur XRF portatif

Pour déterminer la géochimie d'une roche, la procédure habituelle est de sélectionner un échantillon représentatif et de l'envoyer au laboratoire, où il sera broyé et pulvérisé avant d'être analysé par des méthodes comme la spectrométrie de la fluorescence des rayons X (XRF) ou la spectrométrie de masse par ICP-MS. La géochimie traditionnelle repose donc sur des méthodes destructives, et les résultats prennent des semaines ou parfois même des mois à revenir.

Il est toutefois possible, si on est prêt à faire des compromis sur la qualité des données au profit de la quantité, de mesurer les concentrations de certains éléments de façon non-destructive, sur le terrain ou dans un laboratoire mobile, grâce à un analyseur XRF portatif. La carotte de forage est un matériel propice aux analyses XRF *in situ* puisque sa surface est beaucoup plus lisse que celles d'échantillons de roches obtenus au marteau, ce qui élimine les problèmes analytiques dus à l'irrégularité de la surface. Aussi, la surface est fraîche, c'est-à-dire exempte de patine d'altération météoritique, ce qui est important compte tenu

de la faible profondeur de pénétration de la méthode d'analyse et de l'effet des croûtes d'altération sur la géochimie (ex., Potts et al., 2006).

Toutefois, les problèmes reliés à l'hétérogénéité minéralogique, à la variation granulométrique et aux effets de matrice demeurent (Potts et al., 1997; Ge, 2008). Le problème de variation minéralogique est particulièrement important et doit être pris en compte, sachant qu'en général seulement 1-2 mm de profondeur de la roche est utilisée pour l'analyse XRF des éléments les plus lourds et seulement quelques dizaines de micromètres pour les éléments légers, incluant Fe et Ti (Potts et al., 1997; Jones et al., 2005; Analytical Methods Committee, 2008). Il est généralement recommandé de prendre plusieurs mesures et de faire une moyenne pour caractériser un volume de roche donné, surtout pour les échantillons grossiers (Potts et al., 1997).

Principe de mesure

L'analyseur XRF portatif actuellement en service au LAMROC est le modèle Alpha de Innov-X Systems Inc. (Woburn, Massachusetts), une division de Olympus Corporation. Cet appareil sera sous peu remplacé par un modèle Delta du même fabricant. Le principe de mesure est le suivant (Potts, 2008; Peter et al., 2009; site Internet du fabricant). Des rayons X primaires sont émis par un tube à rayons X miniature (10-40 kV) et dirigés vers la surface de l'échantillon. Ces rayons déplacent certains électrons des orbitales internes des atomes de la roche. Des électrons des orbitales externes viennent prendre leur place tout en émettant des rayons X secondaires, qui sont caractéristiques des atomes présents dans l'échantillon. L'intensité des rayons d'une certaine énergie est proportionnelle à la concentration de l'élément qui cause cette radiation. Les rayons X secondaires sont mesurés par un détecteur de type *silicon positive intrinsic negative*, qui convertit les rayons X en voltage proportionnel à l'énergie des rayons. La spectrométrie des rayons X consiste à enregistrer l'énergie et l'intensité des rayons X secondaires. L'analyse quantitative des éléments chimiques est réalisée à partir des spectres, directement par le logiciel d'Innov-X Systems Inc. qui est installé sur l'assistant numérique personnel compris avec l'analyseur Alpha.

L'analyseur Alpha est typiquement opéré en mode *soil*, conçu pour les sols mais qui fonctionne aussi sur les roches qui ne sont pas fortement minéralisées (Peter et al., 2009). Le mode *soil* fait appel à la normalisation Compton (Peter et al., 2009). Le modèle Alpha permet de doser simultanément plus de 20 éléments chimiques parmi les éléments de numéro atomique 15 et plus. Toutefois, le choix des éléments d'intérêt doit être fait lors de la commande de l'appareil puisque ce dernier est calibré en usine par Innov-X Systems Inc. Comme l'analyseur Alpha reçu par le LAMROC était déjà programmé, il n'a été possible de mesurer que les douze éléments suivants pendant l'année 2010-2011 dans les roches de Matagami: As, Ba, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Rb, Sr, Ti, Zn, Zr. Parmi ceux-ci, seuls Fe, Mn, Sr, Ti, Zn et Zr ont été détectés et quantifiés avec une précision raisonnable (voir ci-dessous) pour la majorité des points de mesure. Les six autres éléments ont seulement été détectés occasionnellement, quand la lithologie s'y prêtait (ex. Cr dans certains basaltes) ou que la roche était minéralisée (ex. As et Cu).

Précision et exactitude sur des poudres

Des tests ont été réalisés sur un standard international en poudre et des carottes de roche de Matagami dont on connaissait la composition afin de déterminer la précision et l'exactitude de l'analyseur XRF Alpha. Il s'agissait aussi de déterminer le temps de mesure optimal représentant le meilleur compromis entre la rapidité et la précision.

Le test sur le standard en poudre a surtout été réalisé pour vérifier que l'analyseur XRF fonctionnait bien, car il ne renseigne pas beaucoup sur la performance de l'appareil sur des roches non-broyées. Le *Standard Reference Material 2702, Inorganics in Marine Sediment* du *National Institute of Standards and Technology* (NIST) est fourni par Innov-X Systems Inc., avec la composition certifiée, et a été utilisé pour le test. Les durées de mesures suivantes ont été investiguées : 10 s, 15 s, 20 s, 25 s, 30 s, 40 s, 50 s, 70 s, 90 s et 120 s, avec dix mesures pour chaque durée. Puisque l'objectif était simplement d'avoir une idée de la performance de l'appareil, et non de faire des statistiques valides, dix mesures par durée ont été jugées suffisantes. Les éléments suivants ont pu être quantifiés avec des écarts-types relatifs (précisions) de 10-15% à 120 s: Cr et Cu; entre 5-10% d'écart-type relatif: As et Ba;

entre 1-5% : Fe, Mn, Pb, Rb, Sr, Ti, Zn, Zr. Les autres éléments programmés dans l'analyseur XRF avaient des écart-types relatifs plus élevés ou n'étaient pas détectés.

En termes d'exactitude, la différence entre les valeurs certifiées (ou de référence, selon les éléments) et les valeurs moyennes mesurées à 120 s était de plus de 25% pour As, Ba et Ti, entre 10-25% pour Cr, Cu, Mn et Zn et entre 0-10% pour Fe, Pb, Rb, et Sr. Aucune valeur de référence n'était disponible pour Zr.

Le choix du temps de mesure optimal pour une poudre est difficile et dépend des éléments chimiques d'intérêt. Pour le Zn par exemple, la précision continue de s'améliorer significativement jusqu'à 120 s de temps d'intégration (Fig. 22). Pour le Fe par contre, aucun gain de précision n'est visible après 40 s d'intégration (Fig. 22). Seulement 25 s suffisent pour le Zr (non illustré).

Précision et exactitude sur des roches

Un test de précision a été réalisé sur une carotte de basalte tholéïitique du forage BRC-08-72, à 45,94 m (profondeur absolue). Il s'agit d'une lave à grains fins, faiblement vésiculaire, d'aspect peu altéré. Une zone de mesure a été délimitée au ruban adhésif sur la carotte pour s'assurer de prendre toutes les mesures au même endroit (Fig. 23). Trente mesures ont été réalisées pour chacune des durées d'intégration suivantes : 10 s, 20 s, 30 s, 45 s, 60 s, 90 s, et 120 s. Les éléments suivants ont été quantifiés avec un écart-type relatif de moins de 8% à partir de 60 s: Fe, Mn, Sr, Ti, Zn et Zr (Fig. 24). Pour les six autres éléments mentionnés ci-dessus comme étant détectés occasionnellement dans les roches de Matagami, les écart-types relatifs à 120 s étaient les suivants sur cet échantillon en particulier: As 70%, Ba 41%, Cr non détecté, Cu 47%, Ni non détecté, Rb 154%. Enfin le Pb a été détecté à 120 s mais avec un écart-type relatif de 19%.

La figure 24 montre l'amélioration de la précision des mesures, sous forme d'écart-type relatif, en fonction de la durée d'intégration, pour les éléments Fe, Mn, Sr, Ti, Zn et Zr. Une durée de 30 s suffit pour le Fe, alors qu'on note des points d'inflexion à 30 s pour Ti et Zr, et à 45 s pour Mn et Sr. La précision du ratio Ti/Zr, souvent utilisé pour discriminer les

roches mafiques des roches felsiques, continue de s'améliorer jusqu'à 90 s. Considérant le comportement de l'ensemble des éléments et du ratio Ti/Zr, une durée d'intégration de 60 s a été choisie pour les mesures de routine, ce qui donne un écart-type relatif de 10% ou mieux pour tous les éléments et ratios illustrés à la figure 24. La précision n'aurait pas été fortement améliorée avec un temps d'intégration plus long.

La quantification de l'exactitude des mesures sur les roches n'était pas aussi évidente que pour une poudre dont on dispose de la composition certifiée. Il est bien connu (ex., Ge, 2008) que les mesures à l'analyseur XRF sur des roches varient beaucoup en fonction de la position de l'appareil sur l'échantillon, à l'échelle millimétrique et centimétrique. Comment atténuer l'effet de l'hétérogénéité de la roche et se concentrer sur la performance de l'appareil? Aussi, on connaît la composition de la carotte à plusieurs endroits, mais les analyses géochimiques traditionnelles ont détruit la carotte, qui ne pouvait donc plus être testée à ces endroits en particulier.

Six boîtes du même basalte tholéiitique ont été choisies dans le forage BRC-08-72, boîtes pour lesquelles on disposait de géochimie traditionnelle d'Xstrata Zinc ou de l'INRS : #1, #2, #4, #7, #8 et #11. Une composition de référence moyenne a été calculée pour chaque élément à partir de cinq des six analyses traditionnelles dont on disposait, la sixième (échantillon G0578652) ayant été exclue puisque la quantité de Zr semblait trop élevée. Cette composition de référence est présentée au Tableau 6. Les valeurs du Sr, un élément mobile pendant l'altération hydrothermale (et possiblement le métamorphisme), sont très variables et la moyenne du Sr n'a pas été calculée. Les valeurs du Zn sont aussi plus variables que celles des autres éléments, ce qui suggère une mobilité. Le tableau 6 montre que le basalte tholéiitique est relativement homogène sur l'intervalle choisi (en particulier pour Fe, Mn, Ti, et Zr), l'homogénéité se manifestant quand les échantillons sont suffisamment gros.

Des mesures à l'analyseur XRF Alpha ont été réalisées tous les 20-30 cm dans ces six boîtes, pour un total de 112 points de mesures, avec un temps d'intégration de 45 s (plutôt que 60 s, pour sauver du temps). Une composition mesurée moyenne a été calculée pour

chaque élément (Tableau 7) en excluant huit points extrêmes qui avaient des teneurs en fer et titane nettement trop basses, ce qui suggère qu'il s'agit de points mesurés dans d'autres lithologies (ex. dykes). En comparant les tableaux 6 et 7, on remarque que les écart-types pour chaque élément sont plus grands sur les mesures de l'analyseur XRF portatif Alpha que sur les mesures de laboratoire. Une des raisons qui explique cela est que les méthodes géochimiques conventionnelles utilisent des échantillons plus volumineux (carotte NQ complète de 10-25 cm de long vs. une fenêtre d'environ 2 cm de large). Si on compare la précision des mesures à l'analyseur XRF portatif (Fig. 24) avec l'écart-type des mesures sur les 104 points de basalte tholéitique par cette méthode, on note que la variabilité des mesures XRF entre les points est surtout due à la variabilité naturelle de la roche à petite échelle (Fig. 25a).

Sur la base de la différence entre ces deux séries de moyennes (géochimie conventionnelle vs. analyseur XRF Alpha pour chaque élément), on peut estimer l'exactitude des mesures de l'analyseur XRF, en supposant que la géochimie conventionnelle représente la « vérité ». Selon les éléments, la différence entre les deux méthodes varie entre 11% et 63% (Tableau 8). Nonobstant l'hétérogénéité à petite échelle de la roche, les mesures XRF sont donc relativement précises, mais peu exactes. Cependant, on peut corriger l'erreur systématique de l'analyseur XRF portatif pour rendre les moyennes identiques à celles de la géochimie conventionnelle avec les facteurs de correction listés au Tableau 8 et appliquées à la figure 25b. Le concept de facteur de correction est valide si le manque d'exactitude de la mesure vient en partie d'une erreur systématique plutôt qu'aléatoire, ce qui a été suggéré dans la littérature pour les analyseurs XRF (ex. Nazaroff et al., 2010). Seulement les analyses brutes sont incluses dans la base de données Access, mais l'utilisateur intéressé à comparer les mesures XRF avec la géochimie conventionnelle peut utiliser les facteurs du tableau 8.

Développements anticipés

Les développements méthodologiques suivants sont anticipés au LAMROC pour la prochaine année.

Une nouvelle méthode d'étalonnage des mesures de densité par atténuation des rayons gamma est en développement. Cette méthode utiliserait des cylindres de matériaux couvrant la gamme des densités d'intérêt, plutôt que des cylindres d'aluminium seulement. Les nouvelles pièces d'étalonnage auraient toutes le même diamètre, celui de la carotte pour laquelle on veut étalonner le système, ce qui éviterait des effets de géométrie, et éventuellement les corrections pour compenser l'étalonnage imparfait. Si l'étude théorique du concept est concluante, des tests empiriques seront réalisés.

Un analyseur XRF portatif modèle Delta de Innov-X Systems Inc est présentement en intégration avec le MSCL chez Geotek Ltd. Par rapport au modèle Alpha, le Delta possède de meilleures limites de détection pour plusieurs métaux et permet de mesurer certains éléments dits légers dont Mg, Al et Si grâce notamment à un nouveau type de détecteur de rayons X.

Il est prévu de commander le nouveau compteur de susceptibilité magnétique MS3 de Bartington Instruments Ltd. afin d'étendre la gamme des mesures.

Enfin, la possibilité d'inclure la spectrométrie du rayonnement gamma naturel des roches sur le MSCL sera évaluée, afin de pouvoir quantifier les éléments radioactifs K, Th et U.

Remerciements

L'infrastructure du LAMROC est financée par la Fondation Canadienne pour l'Innovation et le gouvernement du Québec. Nous remercions le MRNF, en particulier Sylvain Lacroix, pour le financement du projet de recherche en cours à Matagami. Xstrata Zinc permet l'accès au site et aux carottes, en plus d'assurer un soutien logistique; nous remercions particulièrement Michel Allard, Gilles Roy et Michel Dessureault. Les compagnies Donner Metals, Ressources Breakwater et SOQUEM sont aussi impliquées dans nos travaux à Matagami et nous les remercions pour leur contribution. Pierre-Guillaume Baron-Riopelle a participé au projet comme assistant de terrain.

Références

- ANALYTICAL METHODS COMMITTEE, 2008 – Evaluation of analytical instrumentation. Part XXIII. Instrumentation for portable X-ray fluorescence spectrometry. Accreditation and Quality Assurance; volume 13, pages 453-464.
- ASD INC., 2007 – LabSpec® user manual. ASD Document 600531 Rev H, pages 1-72 (téléchargé de <http://support.asdi.com> le 3 janvier 2011)
- BARTINGTON INSTRUMENTS LTD, non daté – Operation manual for MS2 magnetic susceptibility system, version OM0408, pages 1-71 (téléchargé de www.bartington.com le 26 décembre 2010).
- BERMAN, M. – BISCHOF, L., 1997 – The algorithms underlying The Spectral Assistant software. Commonwealth Scientific and Research Organization, Exploration and Mining Report 427R, pages 1-114.
- BIPM, 2008 – Vocabulaire international de métrologie - concepts fondamentaux et généraux et termes associés. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Groupe de travail 2 du Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM/WG 2), pages 1-90.
- BOSZCZUK, P., 2009 – Mesures de densité sur des échantillons prélevés lors de la campagne de terrain de Matagami, 2008. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec; GM 64056, pages 1-21.
- CANET, C. – ARANA, L. – GONZÁLEZ-PARTIDA, E. – PI, T. – PROL-LEDESMA, R.M. – FRANCO, S.I. – VILLANUEVA-ESTRADA, R.E. – CAMPRUBÍ, A. – RAMÍREZ-SILVA, G. – LÓPEZ-HERNÁNDEZ, A., 2010 – A statistics-based method for the short-wave infrared spectral analysis of altered rocks: An example from the Acozulco Caldera, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. Journal of Geochemical Exploration; volume 105, pages 1-10.
- CLARK, R.N., 1981 – The spectral reflectance of water-mineral mixtures at low temperatures. Journal of Geophysical Research; volume 86, pages 3074-3086.
- CLARK, R.N., 1999 – Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. *In*: RENCZ, A.N. (ed) Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences. John Wiley and Sons; pages 3- 58.

- CLARK, R.N. – SWAYZE, G.A. – WISE, R. – LIVIO, E. – HOEFEN, T. – KOKALY, R. – SUTLEY, S.J., 2007 – USGS digital spectral library splib06a, U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231, <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06>.
- GE, L., 2008 – Geochemical prospecting. *In* POTTS, P.J. – WEST, M. (eds) Portable X-ray fluorescence spectrometry: capabilities for in situ analysis. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, Royaume-Uni, pages 141-173.
- GE, L. – LAI, W. – LIN, Y., 2005 – Influence of and correction for moisture in rocks, soils and sediments on in situ XRF analysis. *X-Ray Spectrometry*; volume 34, pages 28-34.
- 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).
- GRAY, D.J., 1997 – Spectral reflectance studies of the impact of water on mineral spectra. Commonwealth Scientific and Research Organization, Exploration and Mining Report 444R, pages 1-82.
- HERRMANN, W. – BLAKE, M. – DOYLE, M. – HUSTON, D. – KAMPRAD, J. – MERRY, N. – PONTUAL, S., 2001 – Short wavelength infrared (SWIR) spectral analysis of hydrothermal alteration zones associated with base metal sulfide deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland. *Economic Geology*; volume 96, pages 939-955.
- HUNT, C.P., MOSKOWITZ, B.M., BANERGEE, S.K., 1995 – Magnetic properties of rocks and minerals. *In* AHRENS, T.J. (ed), *Rock physics & phase relations: a handbook of physical constants*. American Geophysical Union Reference Shelf 3, pages 189-204.
- HUNTINGTON, J. – MASON, P. – BERMAN, M., 1997 – Geological evaluation of The Spectral Assistant (TSA) for mineralogical identification. Commonwealth Scientific and Research Organization, Exploration and Mining Report 417R, pages 1-74.
- HUNTINGTON, J.H. – CUDAHY, T.J. – YANG, K. – SCOTT, K.M. – MASON, P. – GRAY, D.J. – BERMAN, M. – BISCHOF, L. – RESTON, M.S. – MAUGER, A.J. – KEELING, J.L. – PHILLIPS, R.N., 1999 – Mineral mapping with field spectroscopy for exploration - final report. Commonwealth Scientific and Research Organization, Exploration and Mining Report 419R, pages 1-35.
- JONES, M.C. – WILLIAMS-THORPE, O. – POTTS, P.J. – WEBB, P.C., 2005 – Using field-portable XRF to assess geochemical variations within and between dolerite

- outcrops of Preseli, South Wales. *Geostandards and Geoanalytical Research*; volume 29, pages 251-269.
- LOBELL, D.B. – ASNER, G.P., 2002 – Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*; volume 66, pages 722–727.
- NAZAROFF, A.J. – PRUFER, K.M. – DRAKE, B.L., 2010 – Assessing the applicability of portable X-ray fluorescence spectrometry for obsidian provenance research in the Maya lowlands. *Journal of Archaeological Science*; volume 37, pages 885-895.
- PARASNIS, D.S., 1997 – Principles of applied geophysics. Chapman & Hall, Londres, pages 1-429.
- PETER, J. – MERCIER-LANGEVIN, P. – CHAPMAN, J.B., 2009 – Application of field-portable x-ray fluorescence spectrometers in mineral exploration, with examples from the Abitibi Greenstone Belt. *Proceedings of the 24th International Applied Geochemistry Symposium*, Fredericton, Nouveau-Brunswick, volume 1, pages 83-86.
- POTTS, P.J., 2008 – Introduction, analytical instrumentation and application overview. *In* POTTS, P.J. – WEST, M. (eds) *Portable X-ray fluorescence spectrometry: capabilities for in situ analysis*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, Royaume-Uni, pages 1-12.
- POTTS, P.J. – WILLIAMS-THORPE, O. – WEBB, P.C., 1997 – The bulk analysis of silicate rocks by portable X-ray fluorescence: effect of sample mineralogy in relation to the size of the excited volume. *Geostandards Newsletter*; volume 21, pages 29-41.
- POTTS, P.J. – BERNARDINI, F. – JONES, M.C. – WILLIAMS-THORPE, O. – WEBB, P.C., 2006 – Effects of weathering on in situ portable X-ray fluorescence analyses of geological outcrops: dolerite and rhyolite outcrops from the Preseli Mountains, South Wales. *X-Ray Spectrometry*; volume 35, pages 8-18.
- SCOTT, K.M. – YANG, K., 1997 – Spectral reflectance studies of white micas. Commonwealth Scientific and Research Organization, Exploration and Mining Report 439R, pages 1-35.
- TAYLOR, J.R., 1997 – An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements. University Science Books, pages 1-327.

- THOMPSON, A.J.B. – HAUFF, P.L. – ROBITAILLE, A.J., 1999 – Alteration mapping in exploration: application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy. Society of Economic Geologists Newsletter; volume 39, pages 16-27.
- VATANDOOST, A. – FULLAGAR, P. – ROACH, M., 2008 – Automated multi-sensor petrophysical core logging. Exploration Geophysics; volume 39, pages 181-188.
- YANG, K. – HUNTINGTON, J.F. – PHILLIPS, R.N. – GEMMELL, J.B. – FULTON, R., 1997 – Spectral signatures of hydrothermal alteration in the volcanic rocks at Hellyer, Tasmania. Commonwealth Scientific and Research Organization, Exploration and Mining Report 306R, pages 1-58.
- YANG, K. – HUNTINGTON, J.F. – GEMMELL, 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; DOI 10.1016/j.gexplo.2011.01.001.

FIGURES

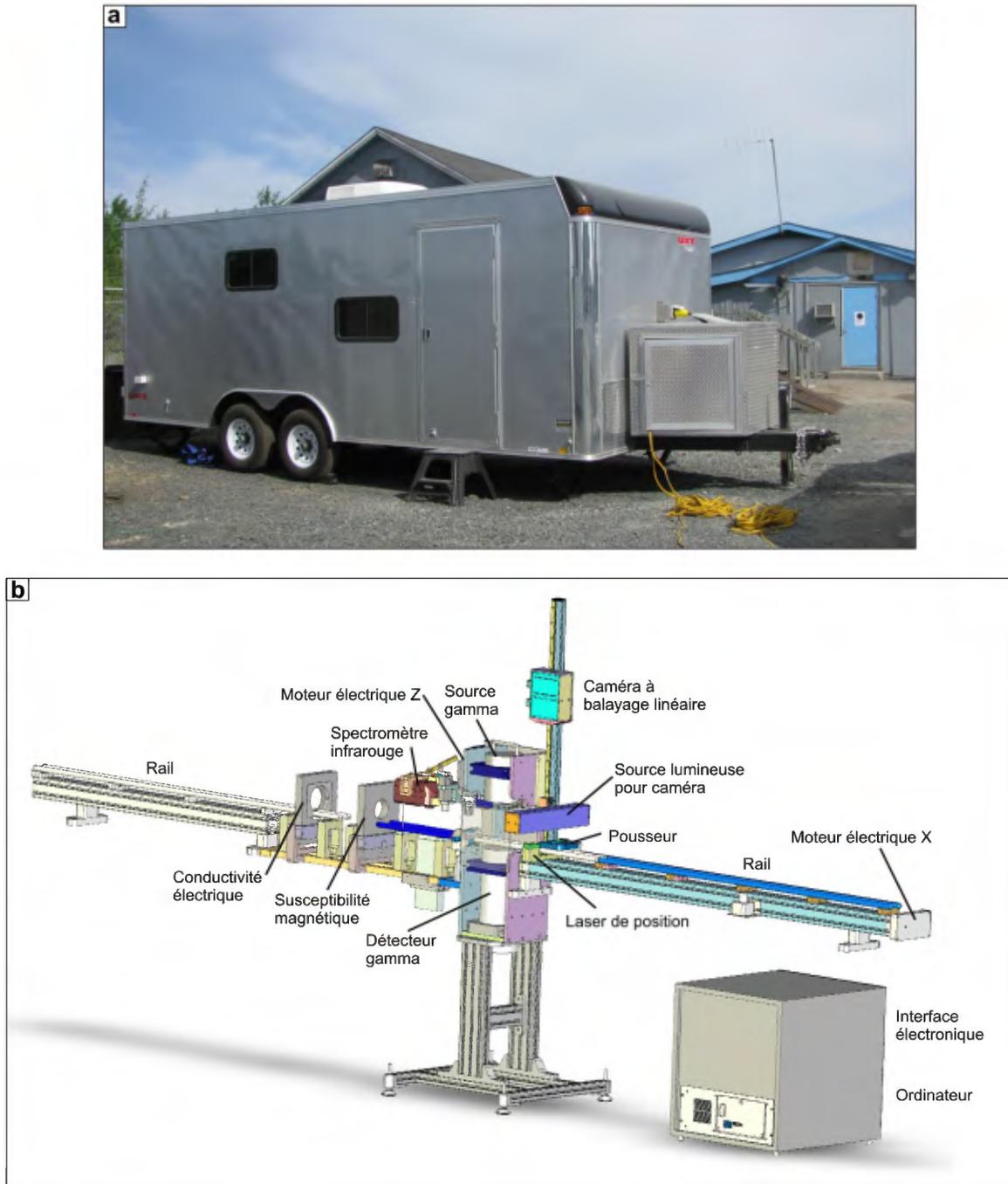
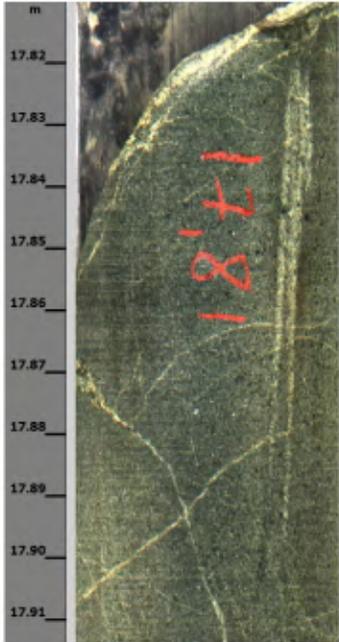


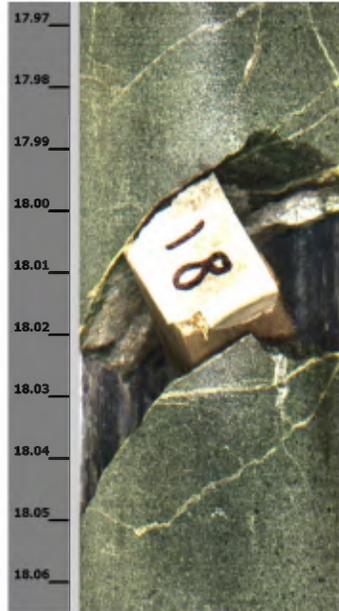
Figure 1. Illustration du Laboratoire mobile de caractérisation physique, minéralogique et chimique des roches (LAMROC). (a) La remorque-laboratoire sur le site de l'ancienne mine Matagami Lake, où sont entreposées les carottes de forage de Xstrata Zinc pour tout le camp de Matagami. (b) Vue en perspective du Système automatisé pour l'analyse multiparamétrique des carottes de forage, illustrant les différentes composantes. L'analyseur XRF est manquant sur le dessin. La carotte est déposée sur le rail dans son bateau du côté droit et voyage vers la gauche.



Figure 2. Système de transfert des carottes de forage dans les bateaux en fibre de verre. Il s'agit ici de carottes NQ. Les carottes sont brossées avant le transfert (côté « endroit ») et après le transfert (côté « envers ») pour éliminer un maximum de poussière et autres débris de leur surface.

a

Le chiffre sur la carotte est la profondeur en mètres du début de la section

b

Des blocs de bois sont intercalés tous les trois mètres par les foreurs

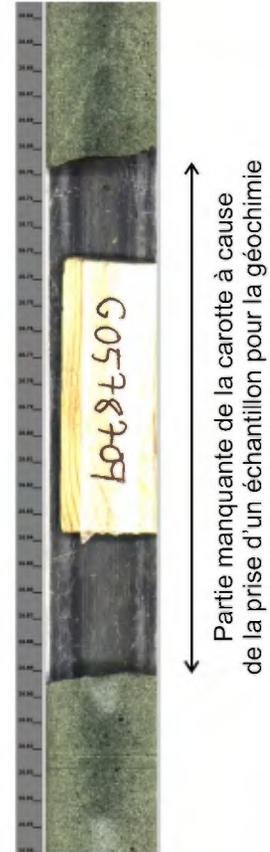
c

Figure 3. Exemples d'images de carottes de forage obtenues avec le MSCL, illustrant certains aspects de la préparation des sections pour l'imagerie. (a) La profondeur de chaque début de section (en haut sur la photo) est marquée au crayon et doit correspondre à la profondeur en mètres inscrite dans la marge gauche de la photo. (b) Les blocs de bois sont retournés verticalement et la profondeur est inscrite sur du ruban adhésif. La profondeur dans la marge de la photo doit correspondre au chiffre sur le bloc à quelques centimètres près. (c) Quand une partie de la carotte est manquante à cause de la prise d'un échantillon, un morceau de bois portant le numéro de l'échantillon est introduit dans le bateau.

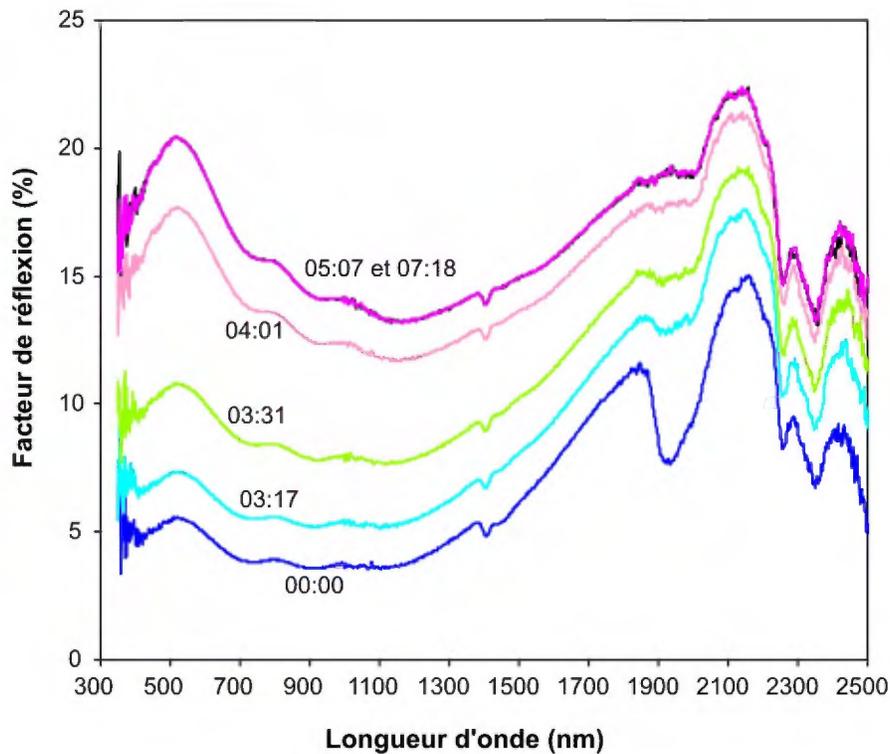


Figure 4. Test de séchage sur une carotte du forage BRC-08-72, boîte 13, section 1, profondeur relative 10 cm (profondeur absolue 82,1 m). Au début de l'expérience (temps 0), la surface de la carotte est saturée en eau. On remarque un important pic d'absorption vers 1920 nm, absent du spectre de la carotte sèche à la fin de l'expérience (7 minutes 18 secondes). Plusieurs autres différences sont aussi évidentes, comme la différence du facteur de réflexion moyen, et la hauteur du pic de réflexion à 600 nm. Pour cet échantillon en particulier, 5 minutes ont été nécessaires pour que la roche paraisse sèche et que les spectres infrarouge et visible soient stabilisés.

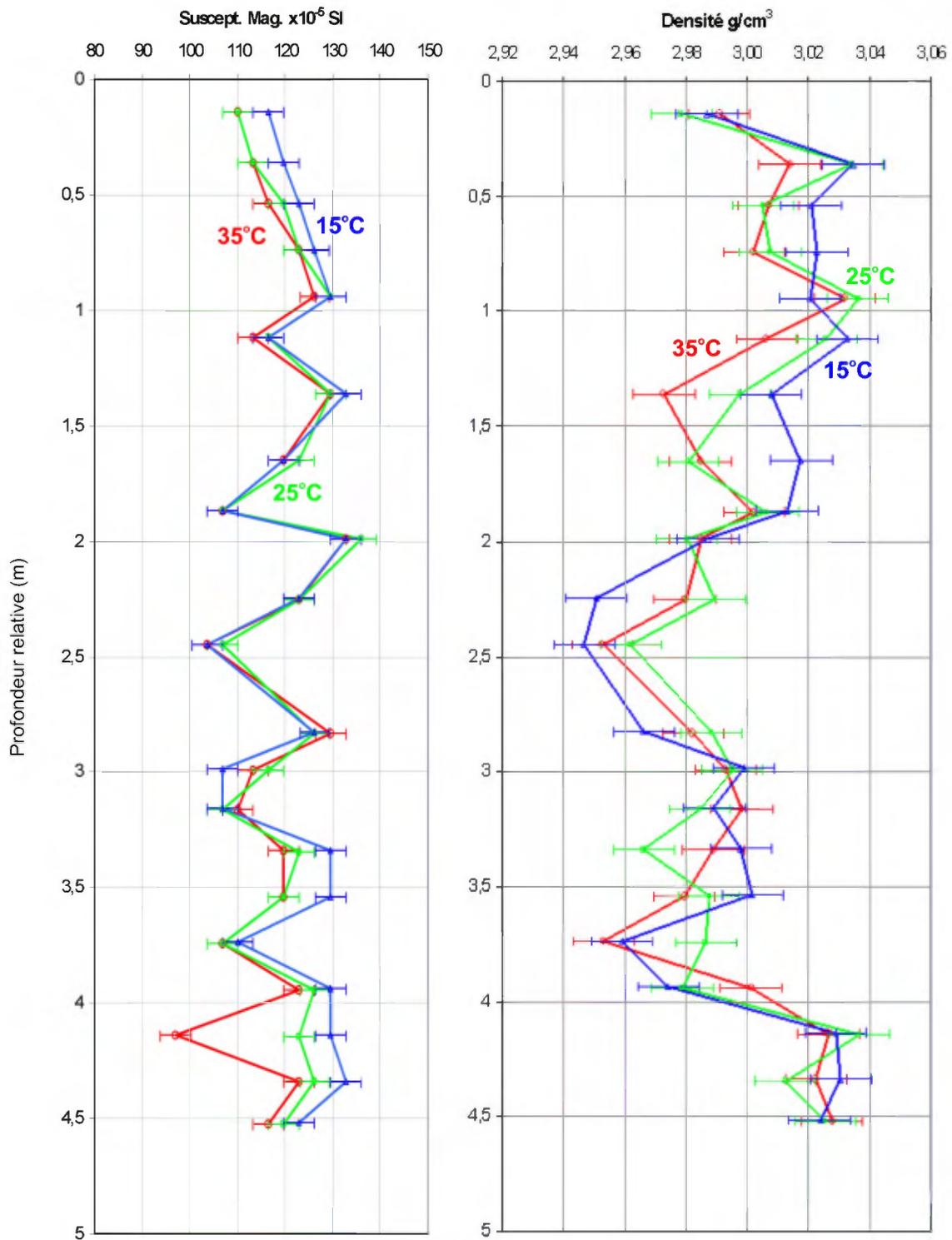


Figure 5. Résultats du test servant à vérifier l'effet de la température des carottes sur les mesures du LAMROC, basé sur les des mesures de la boîte #5 du forage BRC-08-72. Voir aussi le Tableau 2 pour la moyenne et l'écart-type de ces mesures. Les barres d'erreur horizontales représentent la précision des mesures.

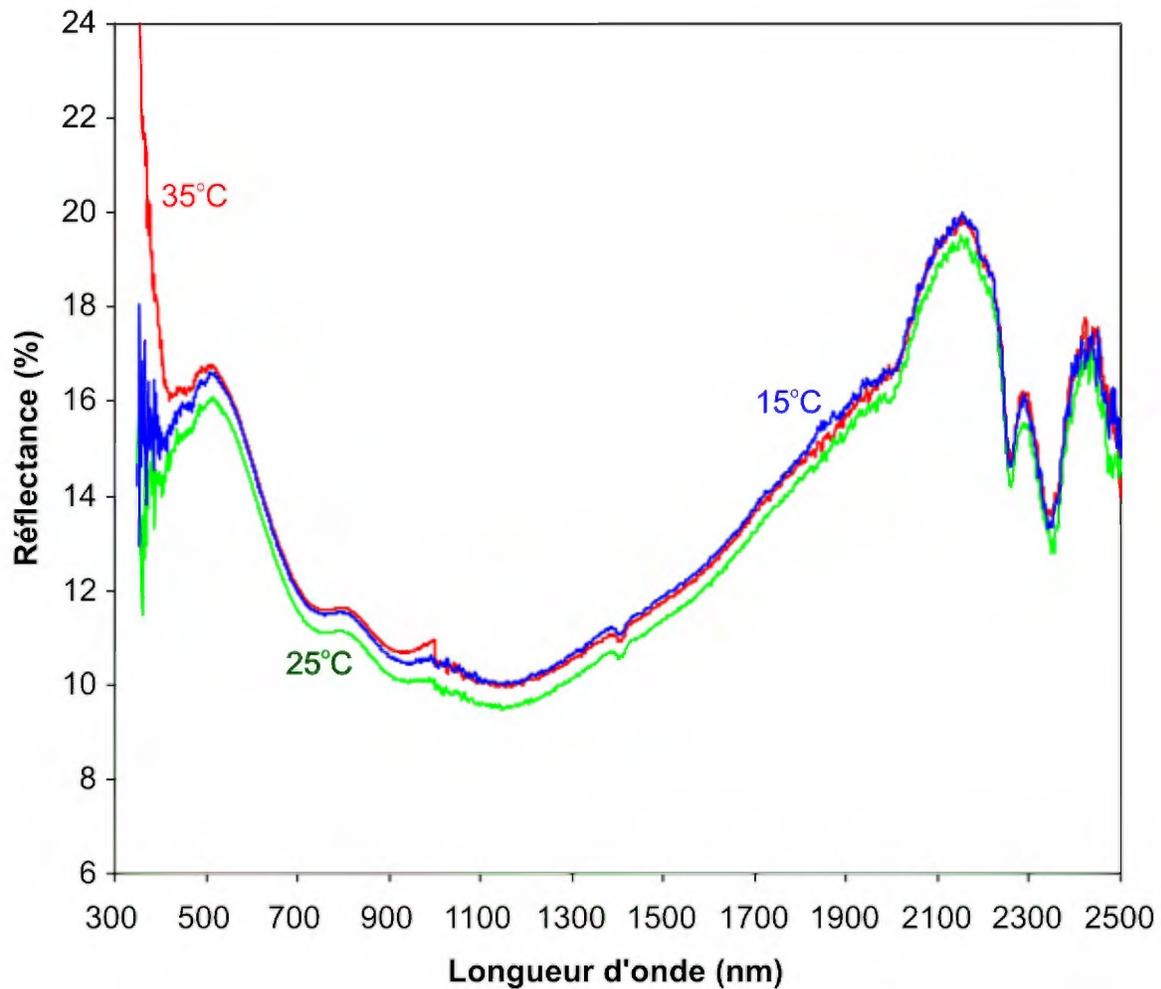


Figure 6. Résultats du test servant à vérifier l'effet de la température des carottes sur les mesures du LAMROC. On voit ici le spectre infrarouge et visible pour la position relative 0,14 m dans la boîte #5 du forage BRC-08-72. Les différences entre les spectres sont attribuées à des étalonnages différents du spectromètre (possiblement influencées par la propreté de la tuile d'étalonnage) plutôt qu'à l'effet de la température des carottes.

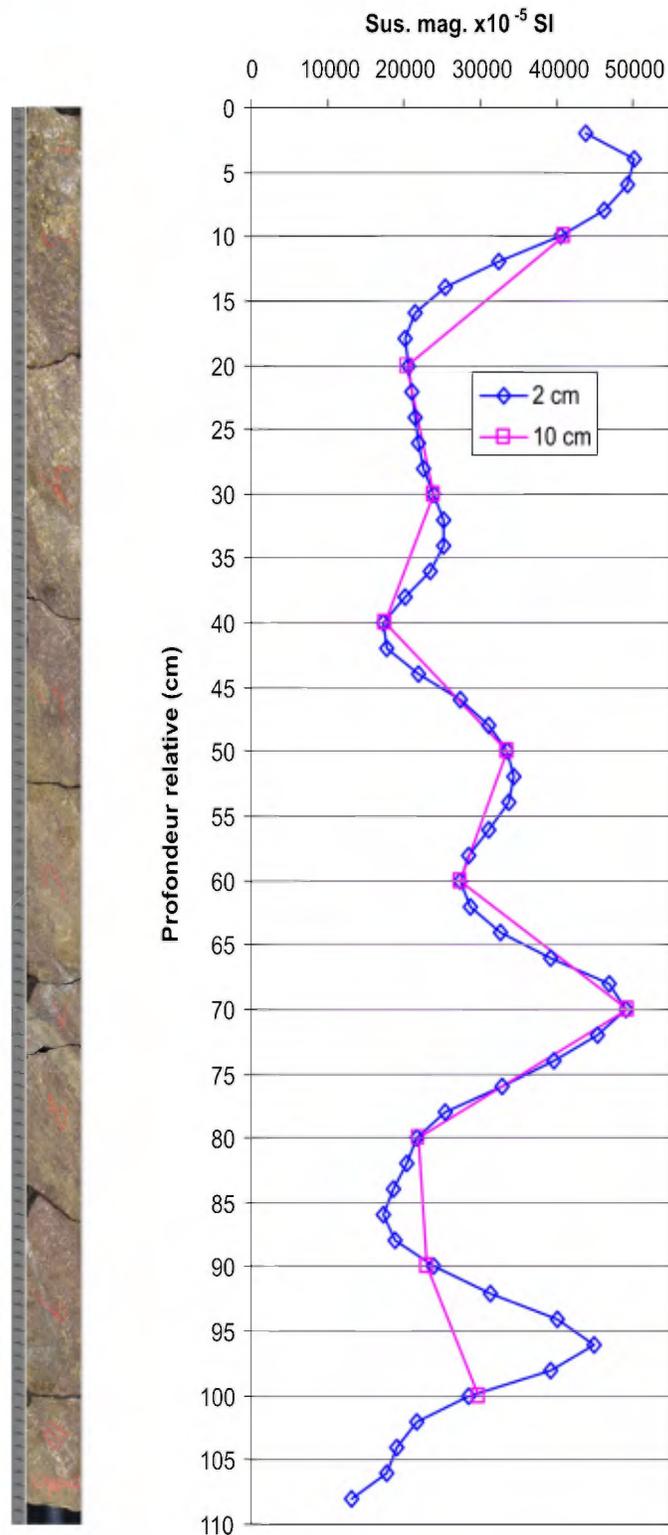


Figure 7. Image de la demi-carotte et profils de susceptibilité magnétique sur la section 1 (profondeur relative 0-110 cm) de la boîte #127 du forage BRC-08-72. Il s'agit de sulfures massifs riches en sphalérite, mais des veinules de magnétite semblent présentes, notamment vers 70 cm et vers 96 cm. Voir texte pour discussion.

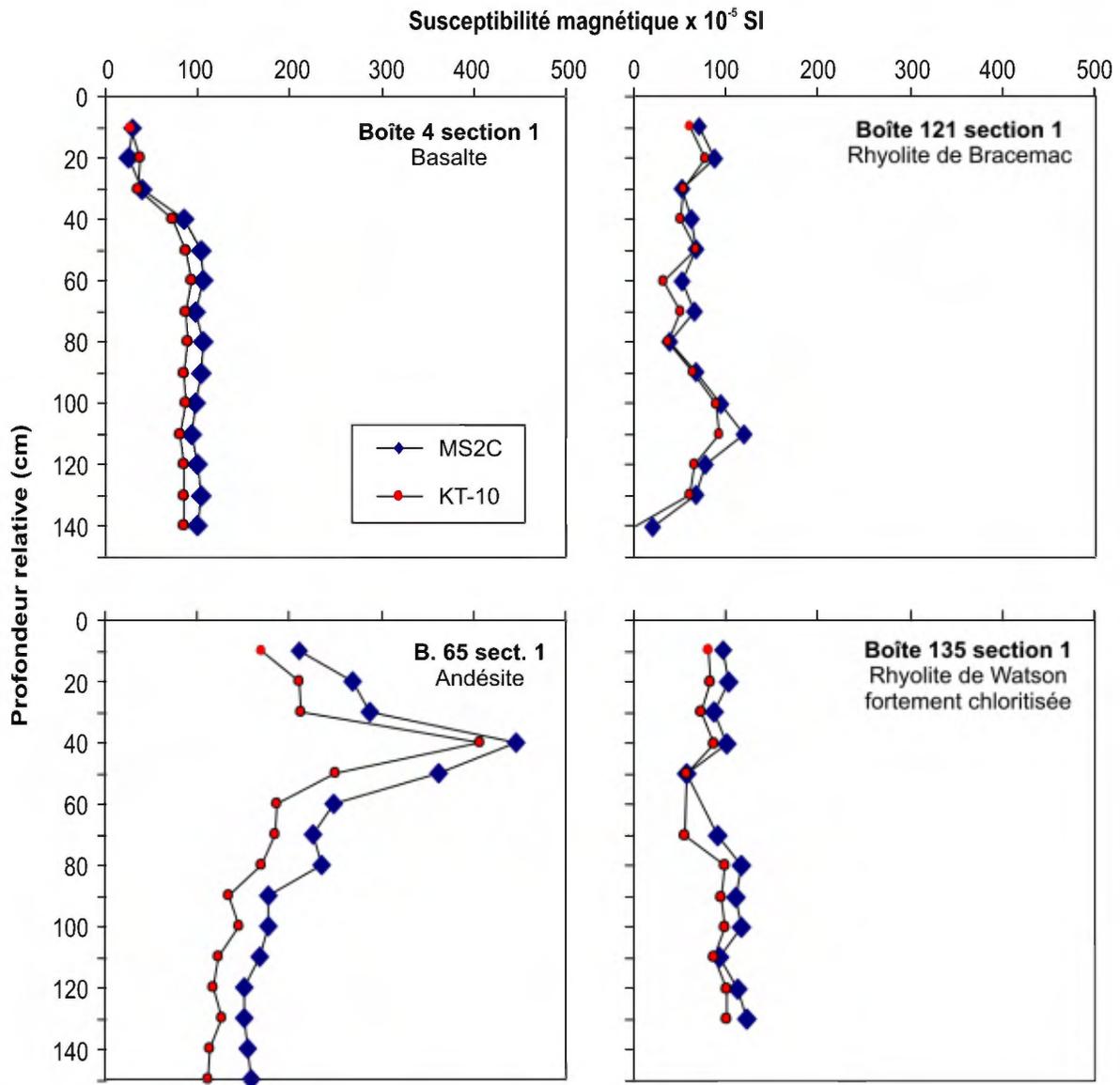


Figure 8. Profils de susceptibilité magnétique tous les 10 cm dans le forage BRC-08-72, avec deux méthodes : le capteur MS2C du MSCL et l'appareil indépendant KT-10. Les quatre sections illustrées proviennent de laves faiblement magnétiques. Notez la bonne corrélation entre les deux séries, mais la sous-estimation du KT-10 par rapport au MS2C.

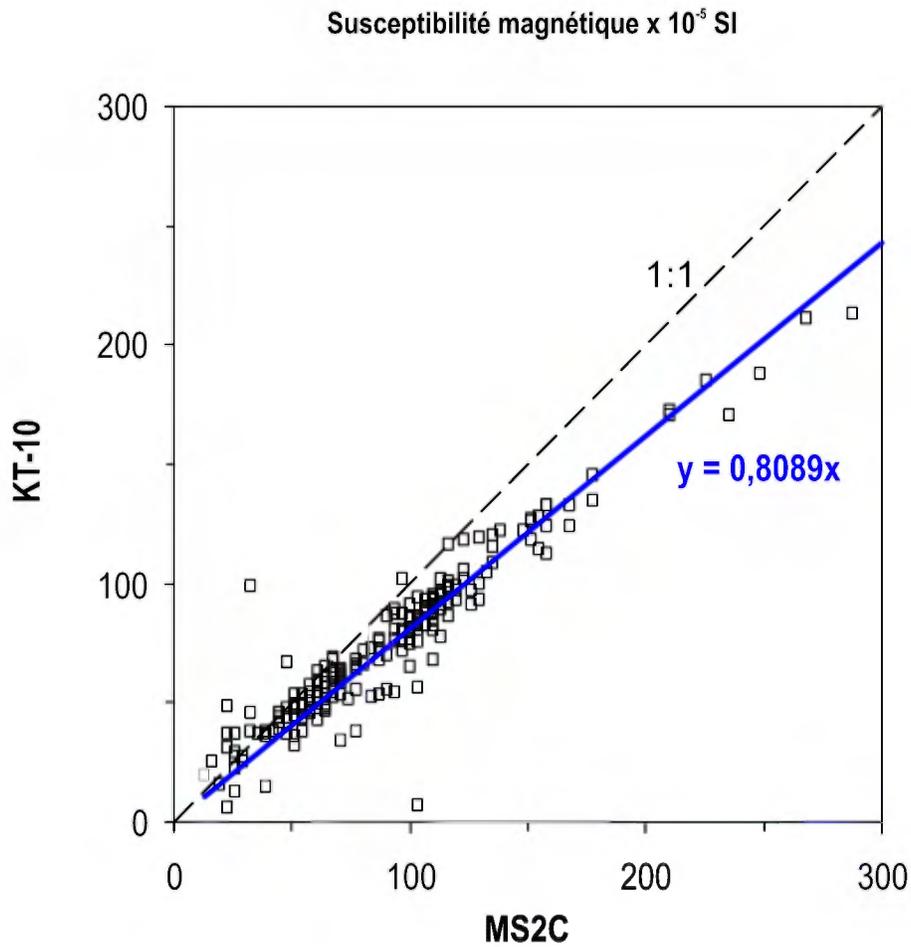


Figure 9. Mesures de susceptibilité magnétique sur six boîtes de carottes entières (#4, #65, #97, #121, #135, #146) du forage BRC-08-72. Le graphique montre chaque point de mesures avec deux méthodes : le capteur MS2C du MSCL et l'appareil indépendant KT-10. Voir texte pour discussion.

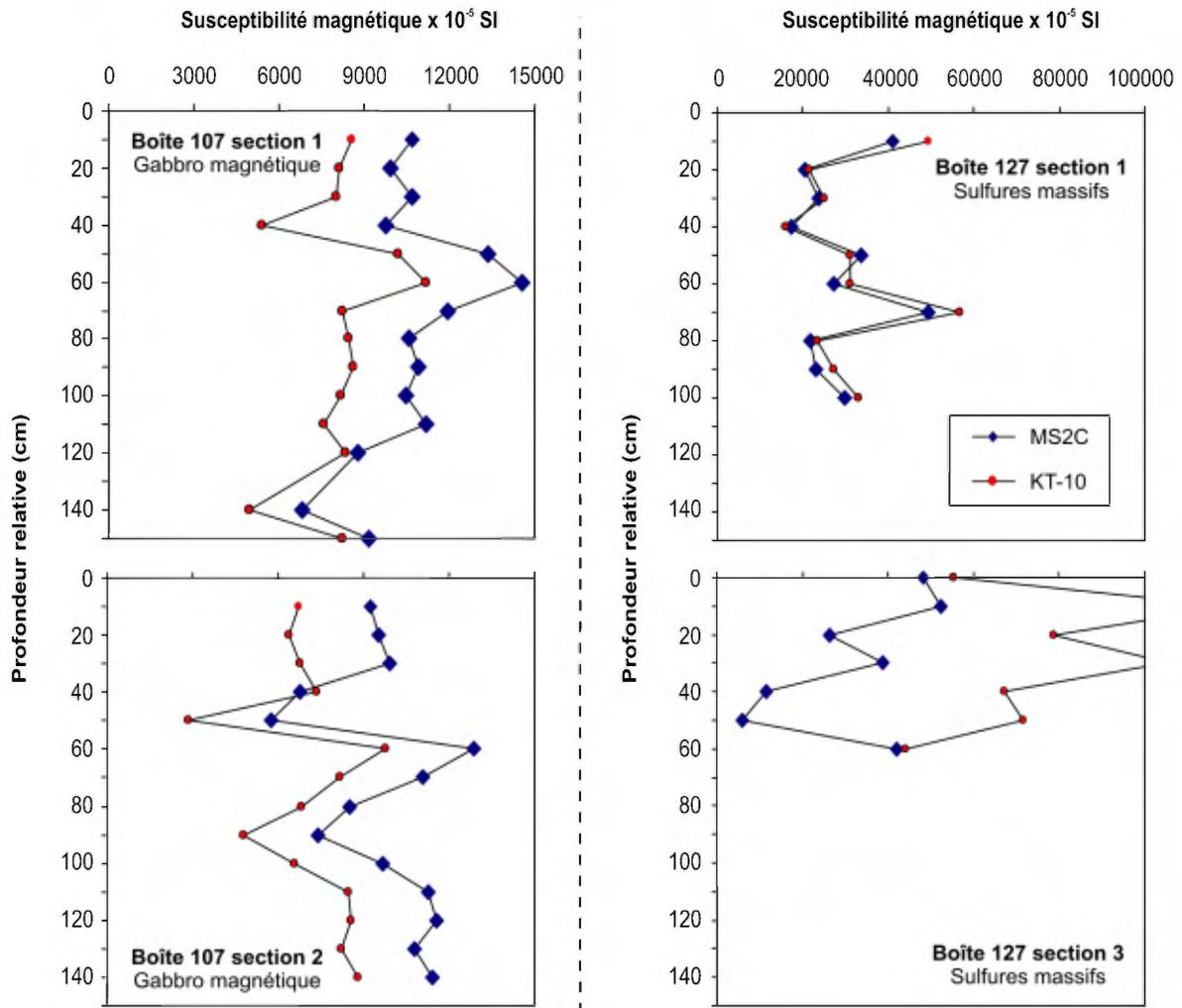


Figure 10. Profils de susceptibilité magnétique tous les 10 cm dans le forage BRC-08-72, avec deux méthodes : le capteur MS2C du MSCL et l'appareil indépendant KT-10. Les quatre sections illustrées proviennent de roches avec une susceptibilité élevée. Pour le gabbro magnétique, la corrélation est bonne mais le KT-10 sous-estime la susceptibilité d'environ 34%. Pour les sulfures massifs, la correspondance est bonne entre les deux méthodes de mesures, sauf au-delà de $\sim 60\,000 \times 10^{-5}$ SI (voir texte pour discussion).

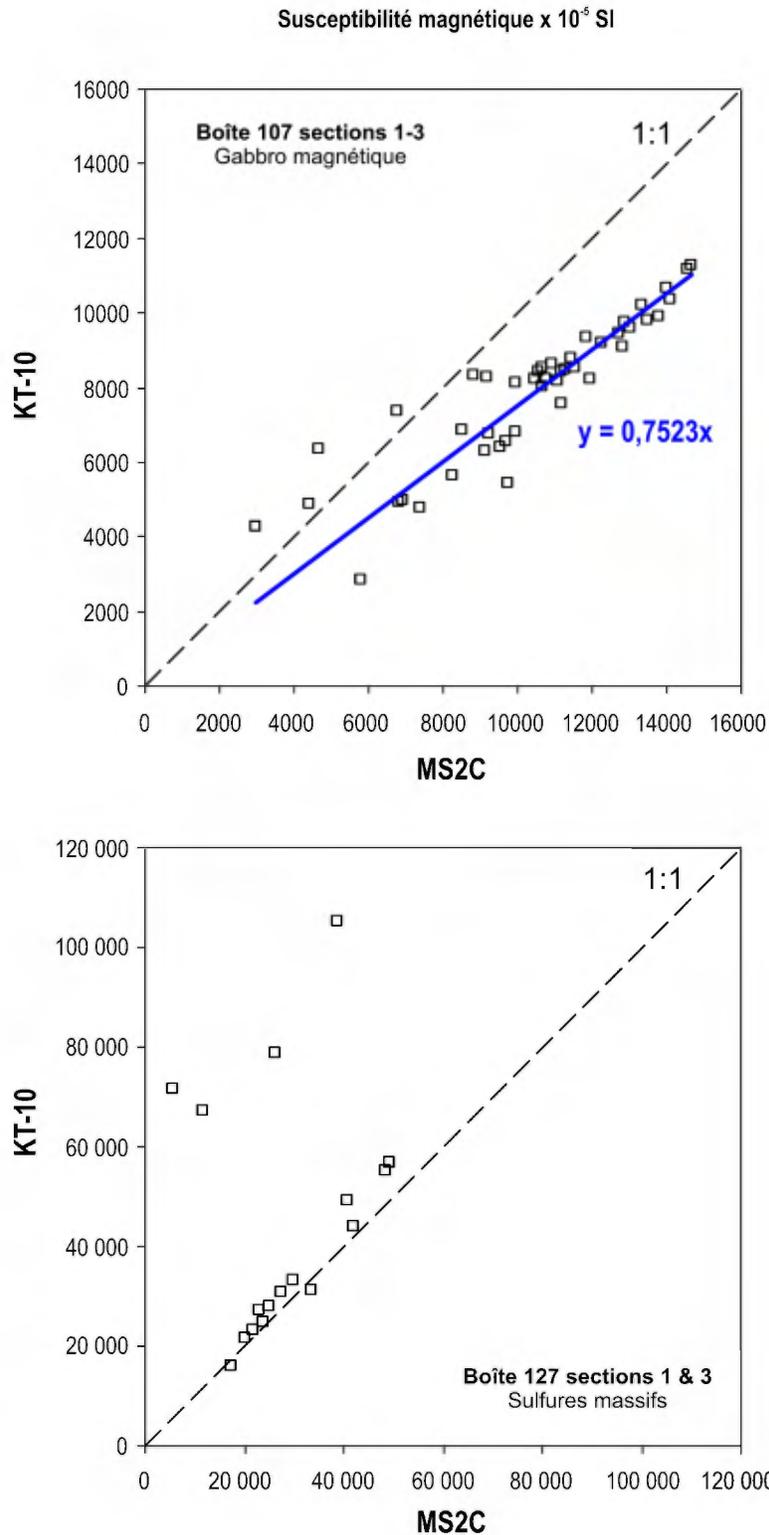


Figure 11. Mesures de susceptibilité magnétique sur des gabbros magnétiques et des sulfures massifs du forage BRC-08-72. Le graphique montre chaque point de mesures avec deux méthodes : le capteur MS2C du MSCL et l'appareil indépendant KT-10. Voir texte pour discussion.

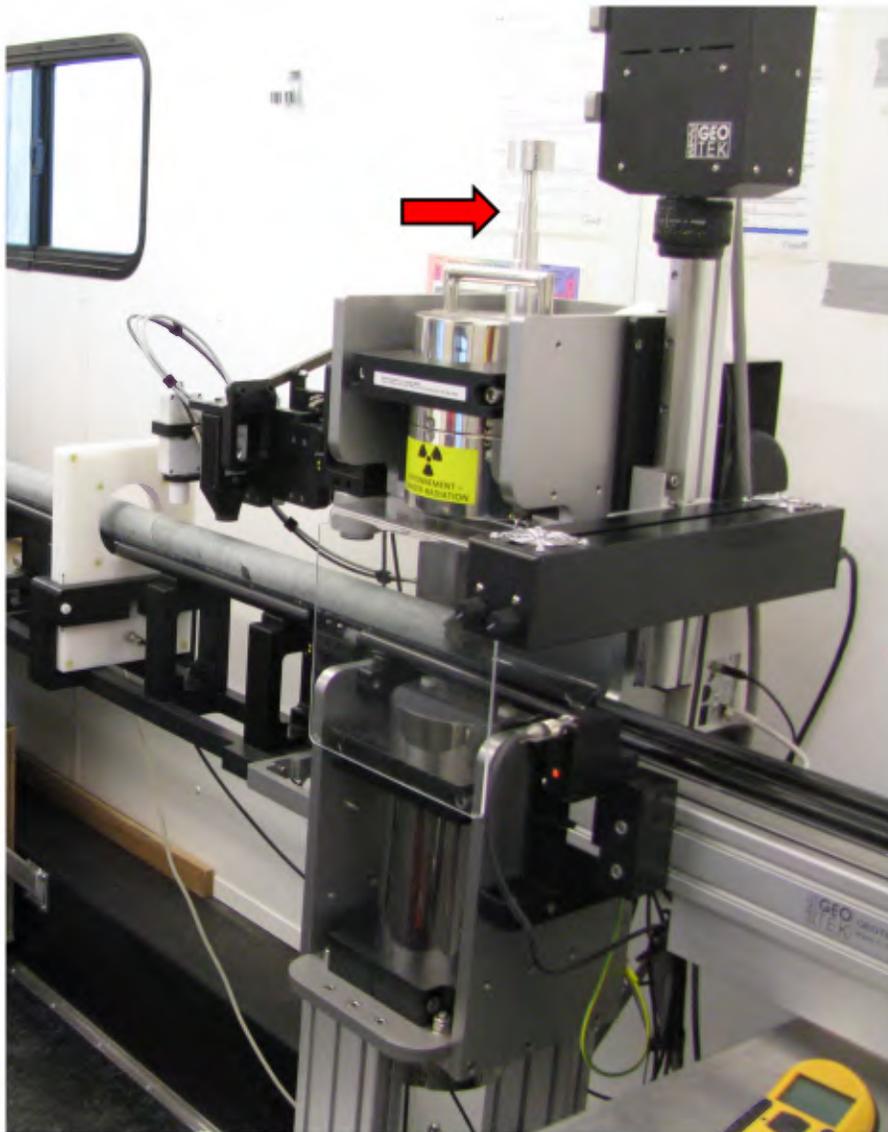


Figure 12. Photo d'une partie du MSCL; voir la figure 1b pour l'identification des composantes. La flèche rouge pointe vers la pièce d'étalonnage en aluminium pour les mesures de densité sur les carottes NQ. La carotte passant dans le capteur de susceptibilité magnétique est aussi de calibre NQ.

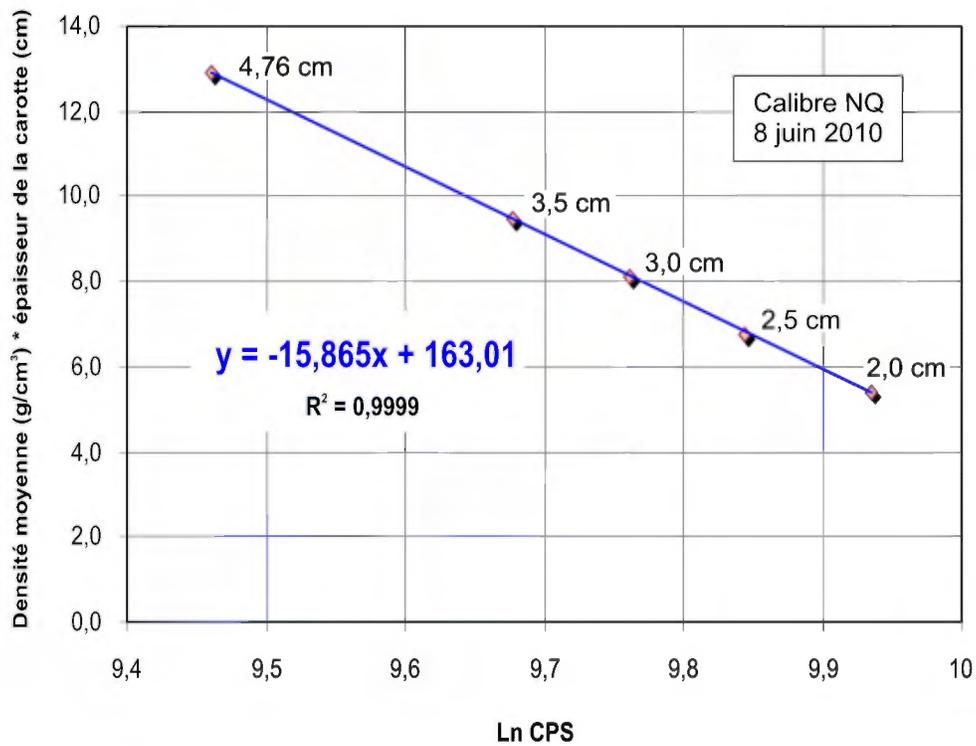


Figure 13. Exemple de courbe d'étalonnage pour les mesures de densité (ρ_{brut}). Les chiffres en centimètres près des losanges correspondent au diamètre des segments sur la pièce d'aluminium. La pièce d'étalonnage comprend aussi un segment de 1,5 cm de diamètre, mais il n'est pas utilisé.

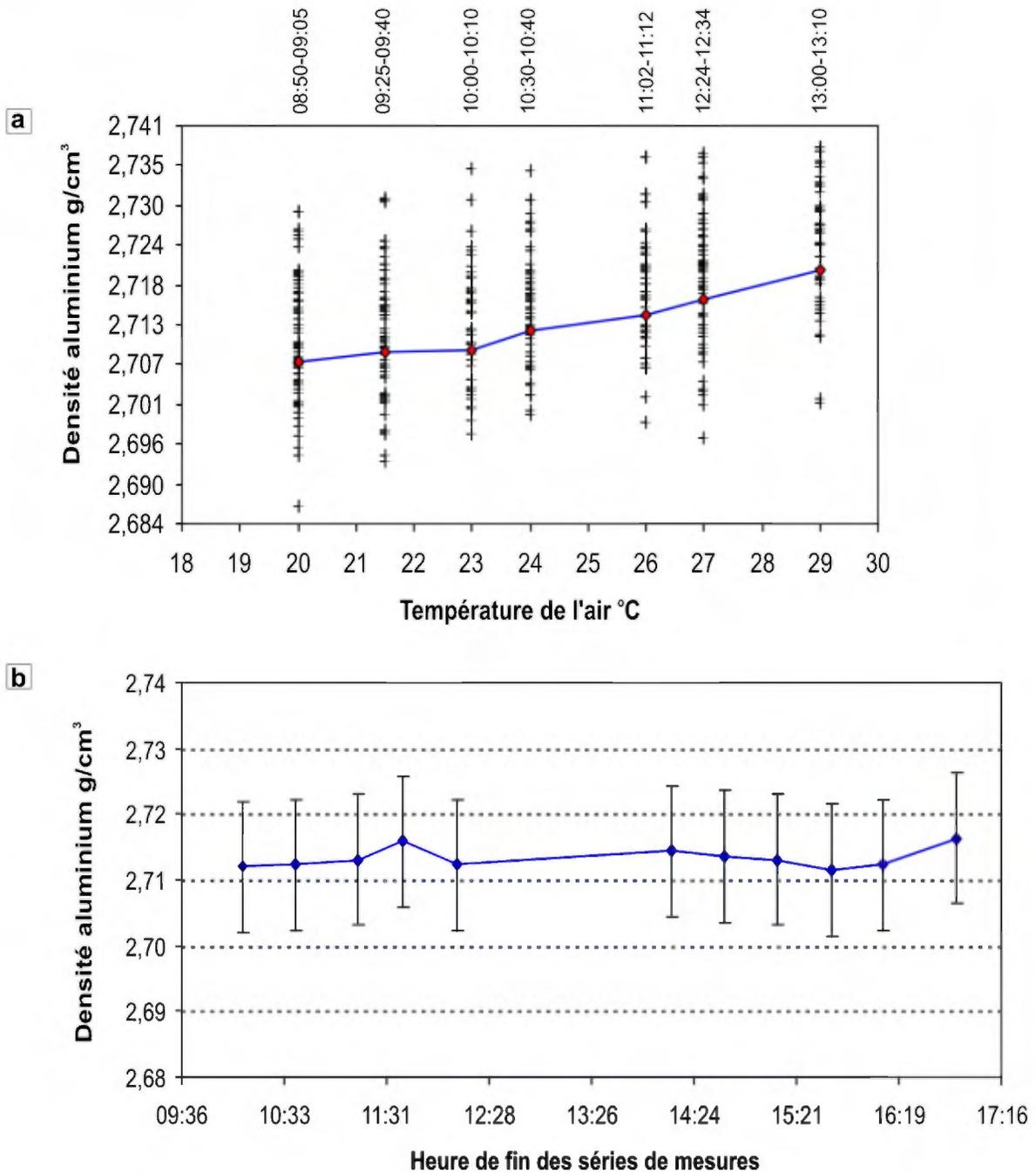


Figure 14. Deux tests réalisés sur un cylindre d'aluminium de calibre NQ, avec comme objectif de déterminer la précision des mesures de densité de 10 s au MSCL, et de vérifier l'impact de variations volontaires de température de l'air ambiant sur les mesures de densité. Les courbes bleues montrent la moyenne d'une série de mesures de densité. (a) Premier test au cours duquel la température a augmenté rapidement au cours de la matinée. La densité mesurée augmente progressivement. Les croix représentent des mesures individuelles. (b) Second test à température constante, sur sept heures. Les barres d'erreurs verticales représentent un écart-type maximal tolérable de $0,01\text{g/cm}^3$. Voir texte pour discussion.

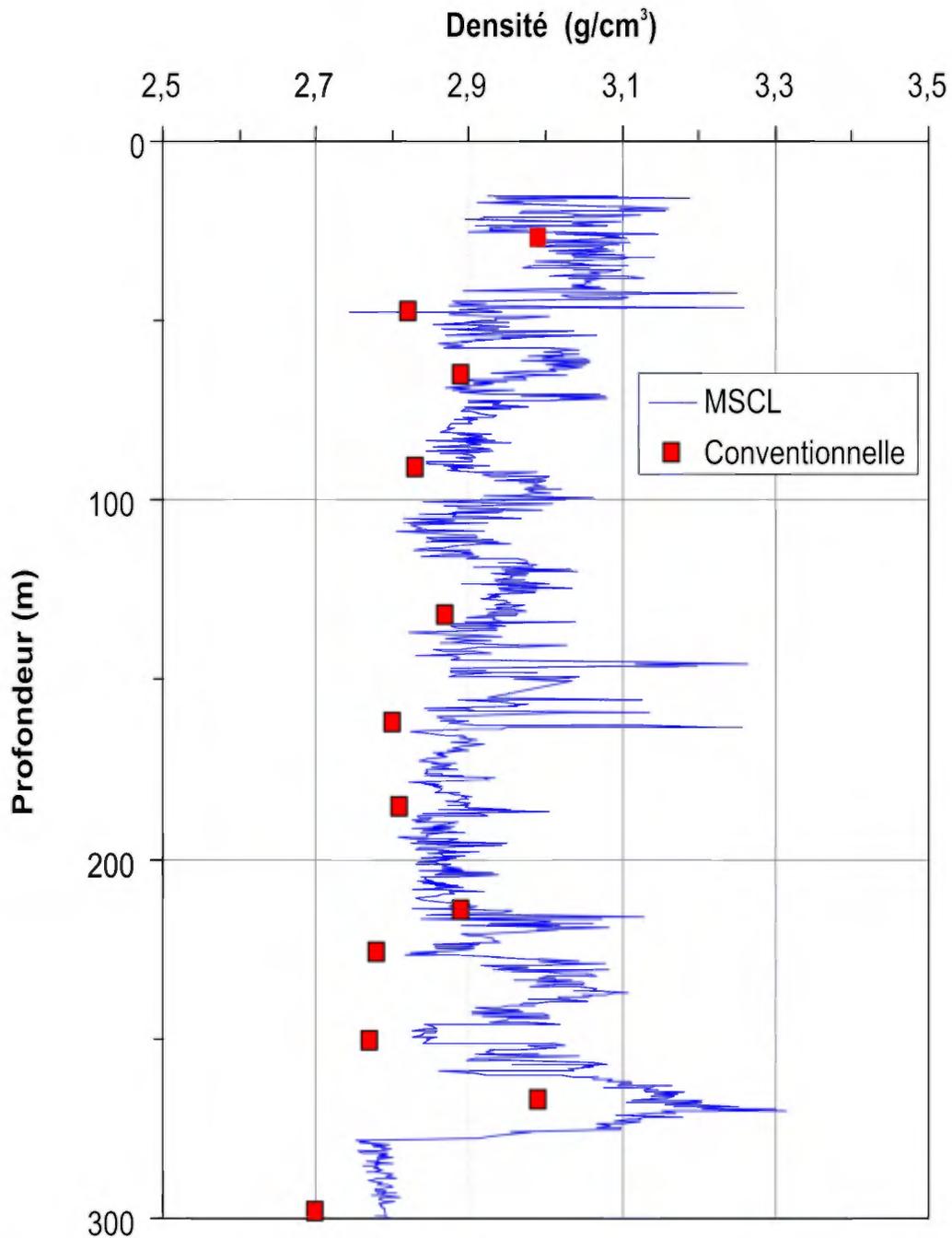


Figure 15. Profil de densité en fonction de la profondeur par deux méthodes pour le forage MC-05-18 : atténuation des rayons gammas (MSCL, ρ_{brut}) et méthode conventionnelle par immersion (données de Boszczuk, 2009). Seuls les 300 premiers mètres sont montrés pour que la figure reste lisible, mais les données de Boszczuk (2009) sont systématiquement plus faibles que celles du MSCL (ρ_{brut}) pour l'ensemble du forage.

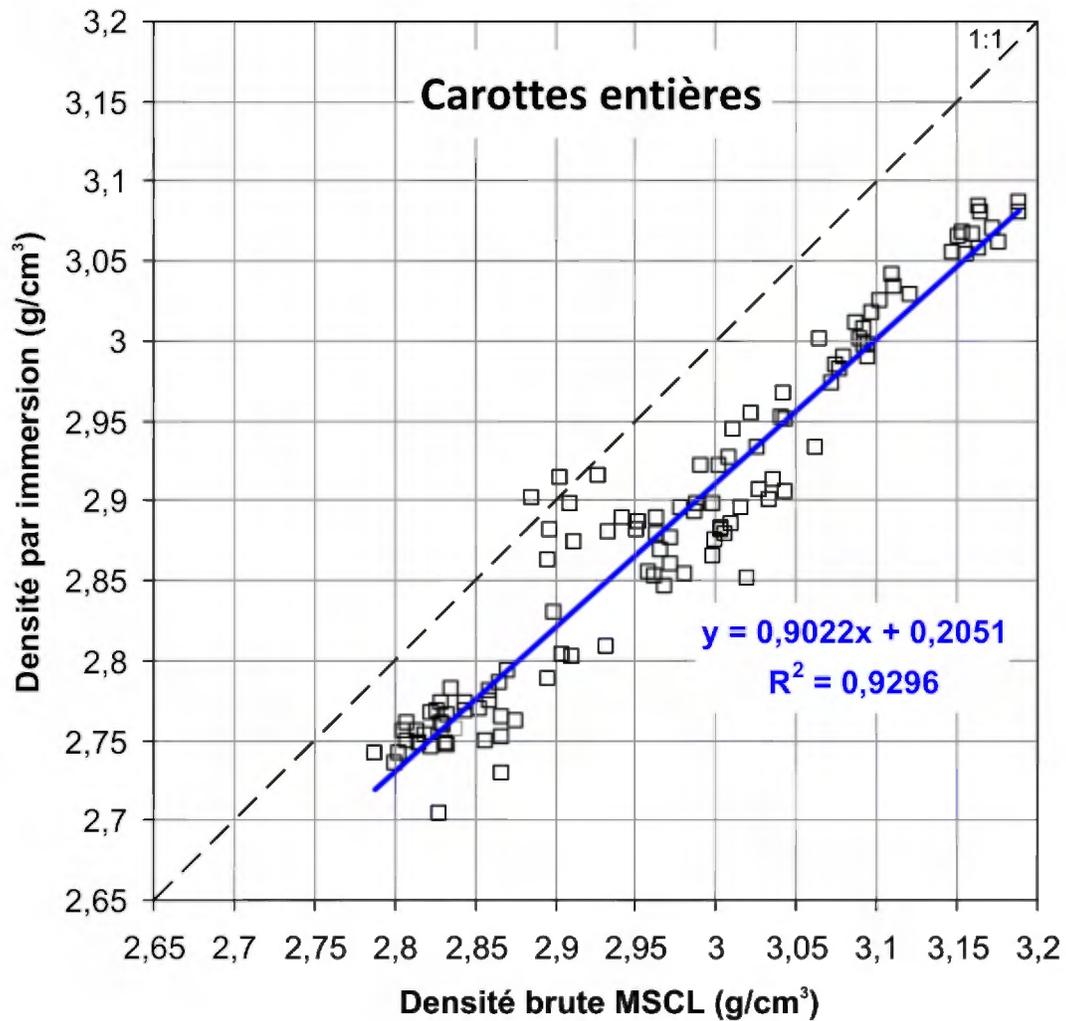
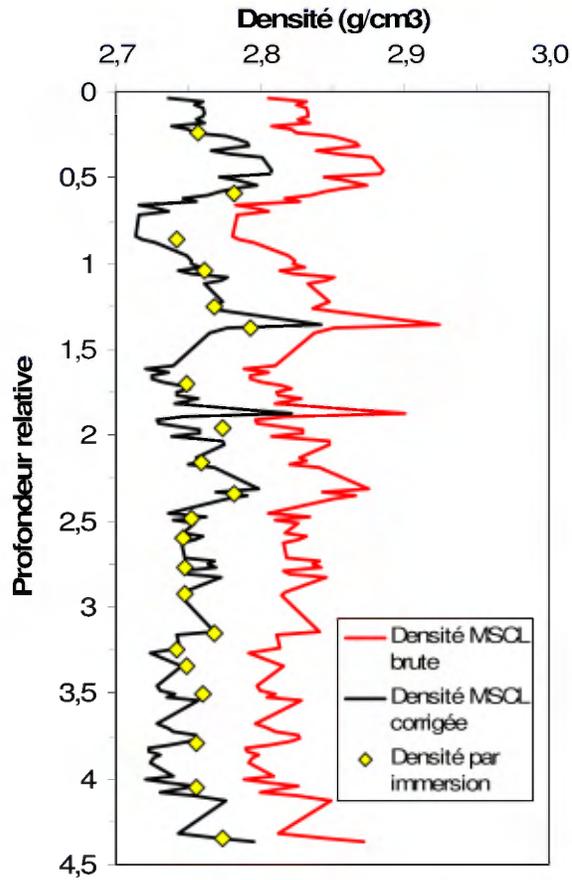


Figure 16. Comparaison entre les mesures de densité par immersion à l'INRS (g/cm^3) et les moyennes des mesures de densité brutes au MSCL par atténuation des rayons gamma (g/cm^3), pour 114 pièces de carottes entières du forage BRC-08-72. La ligne tiretée a une pente de 1 et la ligne pleine est une régression linéaire des données dont l'équation est montrée sur le graphique. Voir texte pour discussion.

BOITE 146, Rhyolite de Watson



BOITE 97, Gabbro

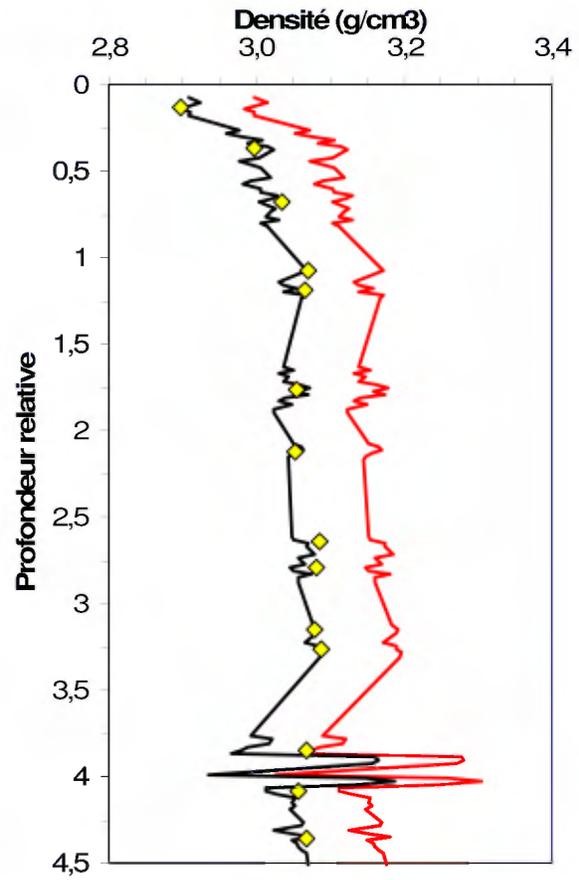


Figure 17. Comparaison entre les densités brutes du MSCL (courbes rouges, ρ_{brut}) et les densités corrigées (courbes noires, ρ_{corr}) pour deux boîtes de carottes entières du forage BRC-08-72. Les mesures de densité par immersion réalisées à l'INRS, qui ont servi à calculer l'équation de correction, sont aussi représentées (losanges jaunes) à la position du point milieu de chaque pièce de carotte. L'axe vertical est gradué en mètres.

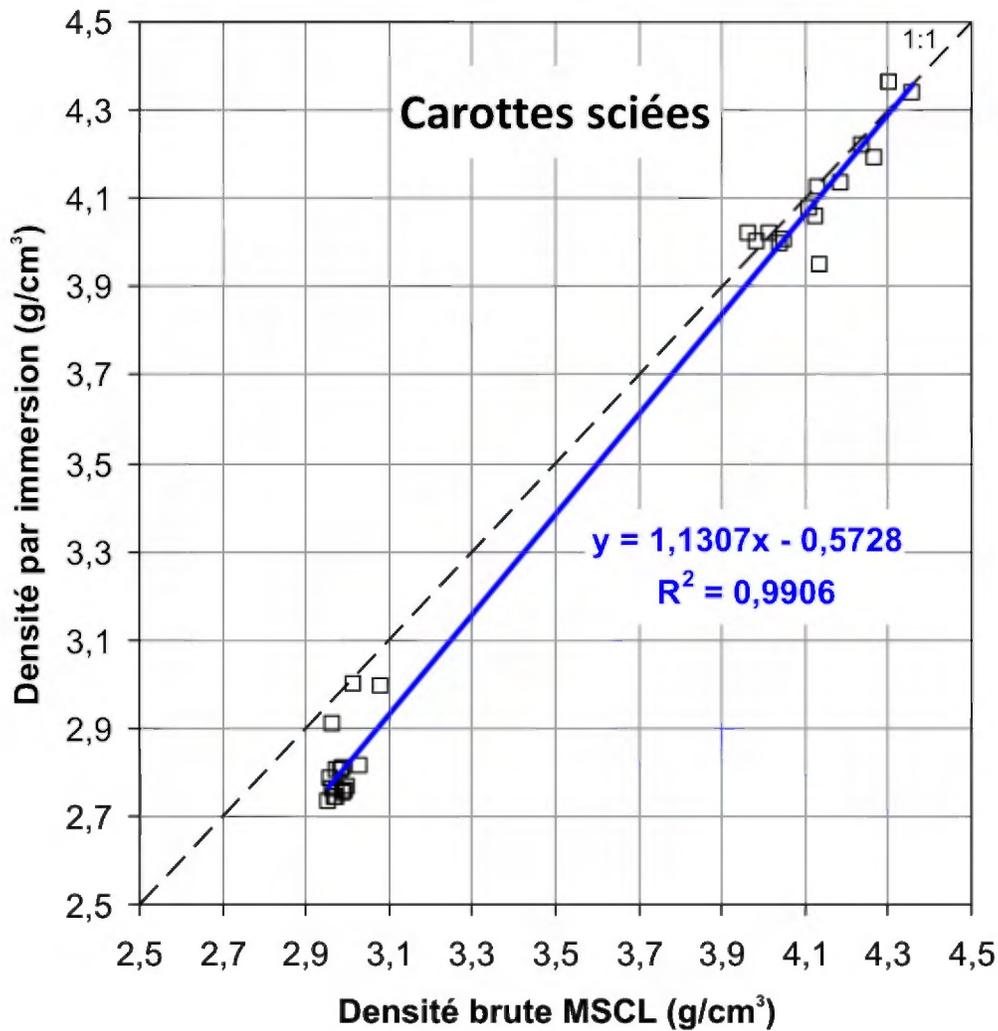
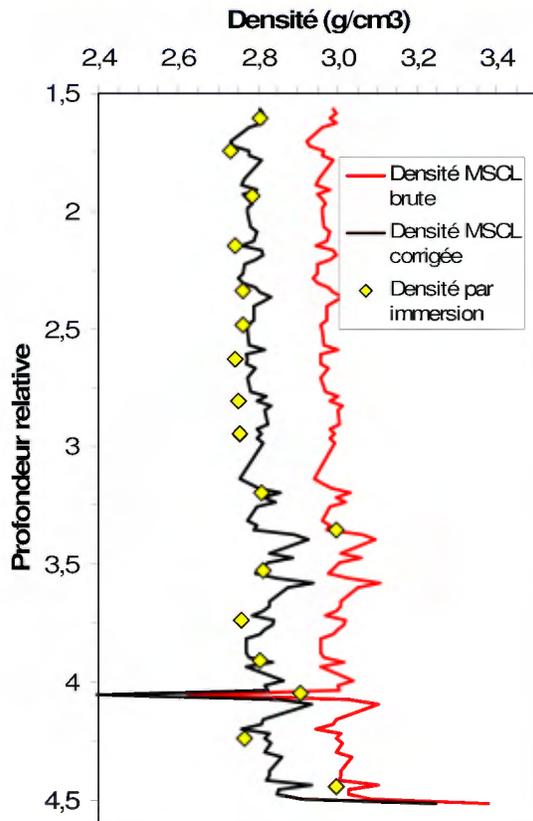


Figure 18. Comparaison entre les mesures de densité par immersion (g/cm^3) à l'INRS et les moyennes des mesures de densité brutes au MSCL par atténuation des rayons gamma (g/cm^3) pour 31 pièces de carottes sciées du forage BRC-08-72. La ligne tiretée a une pente de 1 et la ligne pleine est une régression linéaire des données dont l'équation est montrée sur le graphique. Voir texte pour discussion.

BOITE 121, Rhyolite de Bracemac



BOITE 127, Sulfures massifs

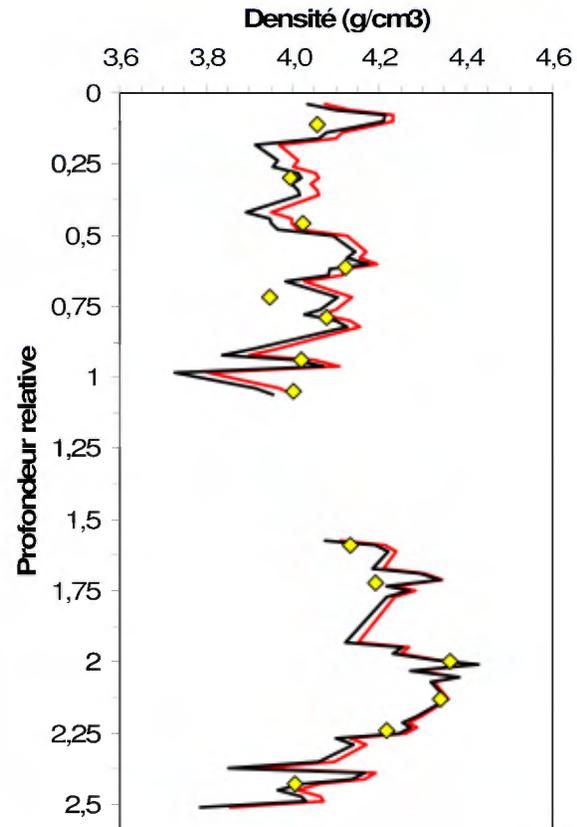


Figure 19. Comparaison entre les densités brutes du MSCL (courbes rouges, ρ_{brut}) et les densités corrigées (courbes noires, ρ_{corr}) pour deux boîtes de carottes sciées du forage BRC-08-72. Les mesures de densité par immersion réalisées à l'INRS, qui ont servi à calculer l'équation de correction, sont aussi représentées (losanges jaunes) à la position du point milieu de chaque pièce de carotte. L'axe vertical est gradué en mètres.

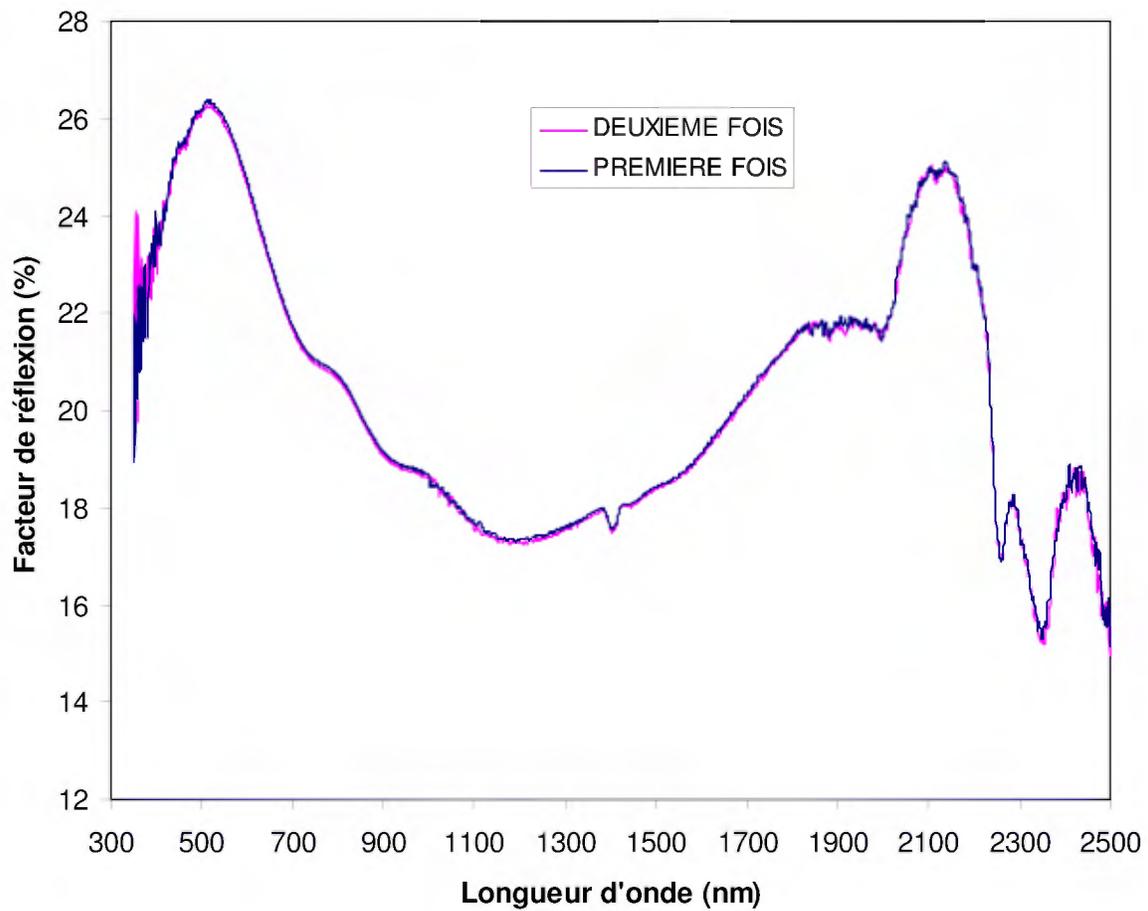


Figure 20. Test de répétabilité sur le spectromètre ASD. La section 1 de la boîte #13 du forage BRC-08-72 a été mesurée à six endroits différents deux fois de suite. On voit ici la mesure à la profondeur relative 92 cm (profondeur absolue : 82,92 m).

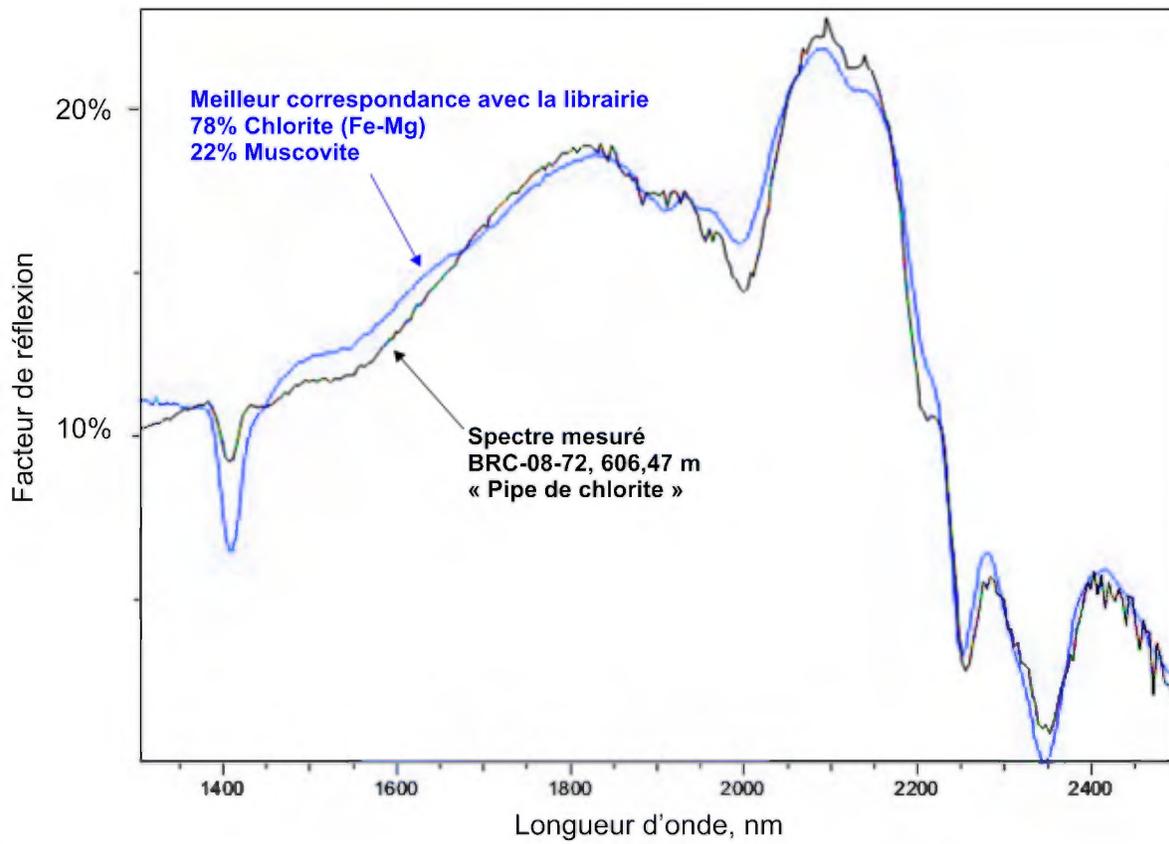


Figure 21. Exemple d'interprétation spectrale automatique avec le logiciel TSG Core.

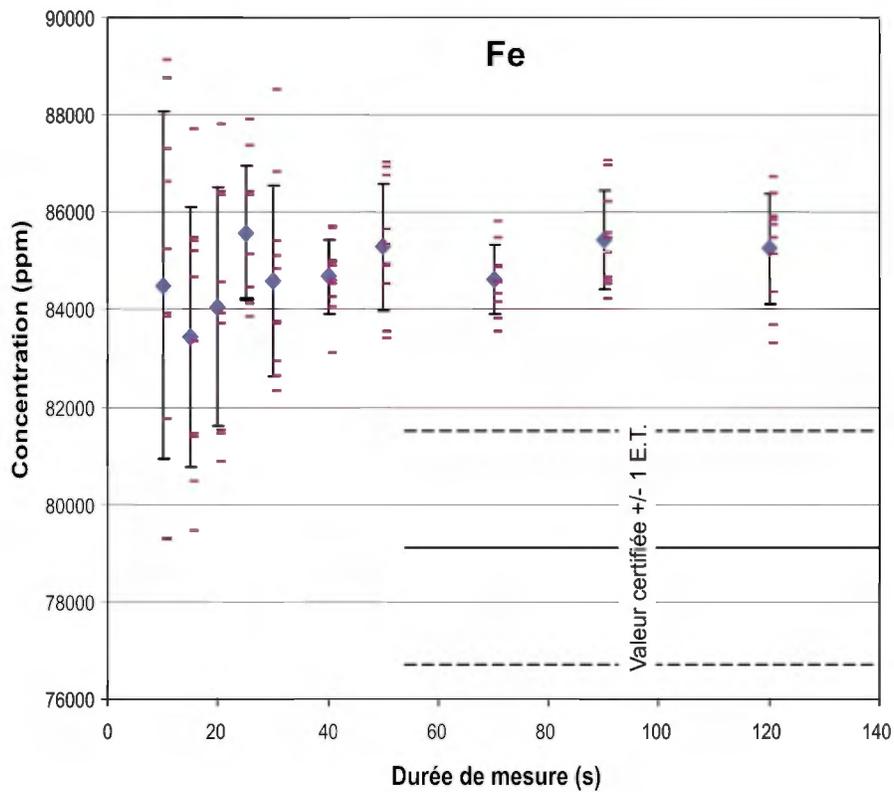
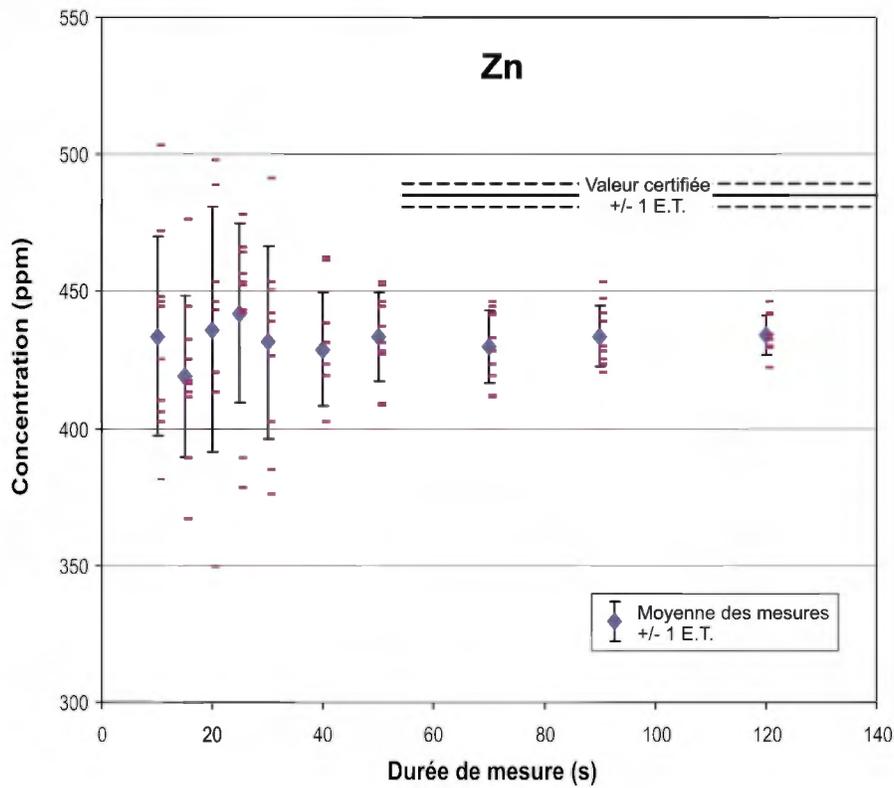


Figure 22. Valeurs mesurées à l'analyseur XRF portatif Alpha (traits horizontaux mauves) pour le standard en poudre NIST 2702. Voir texte pour discussion.



Figure 23. Test de précision de l'analyseur XRF portatif Alpha sur une carotte de forage de Matagami.

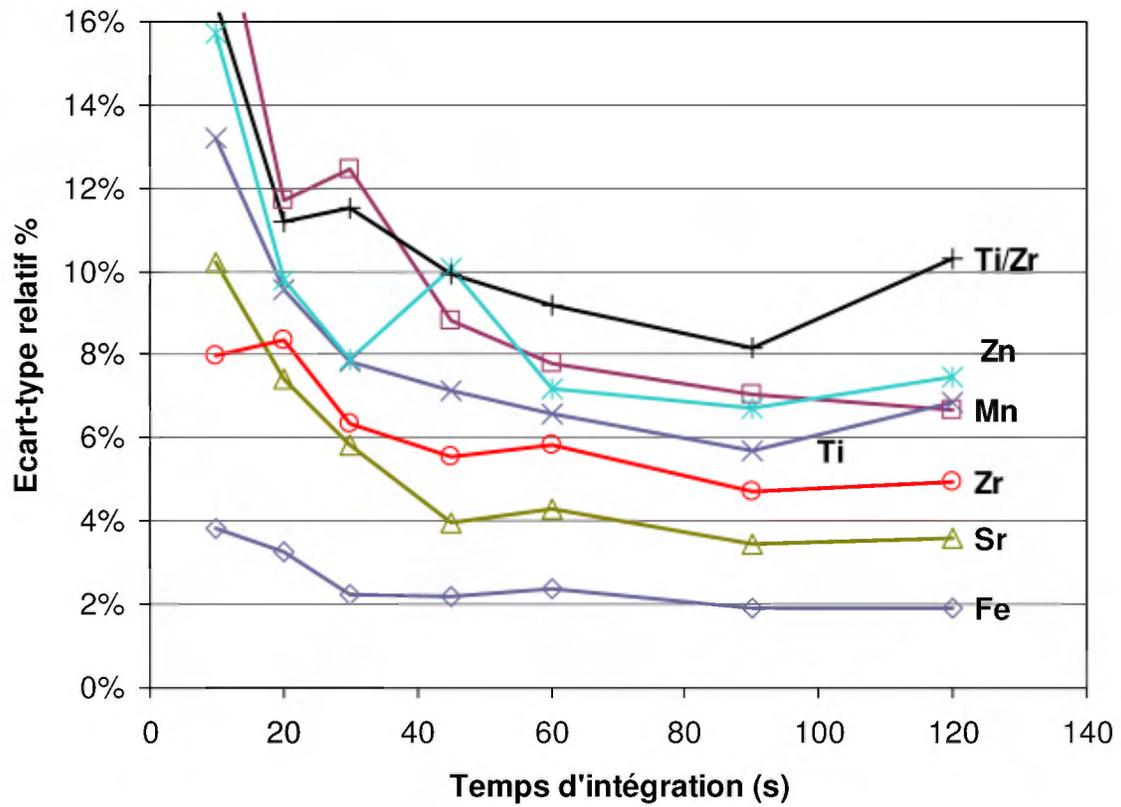


Figure 24. Résultats du test de précision de l'analyseur XRF Alpha sur le basalte tholéiitique du forage BRC-08-72 à 45,94 m. Voir texte pour discussion.

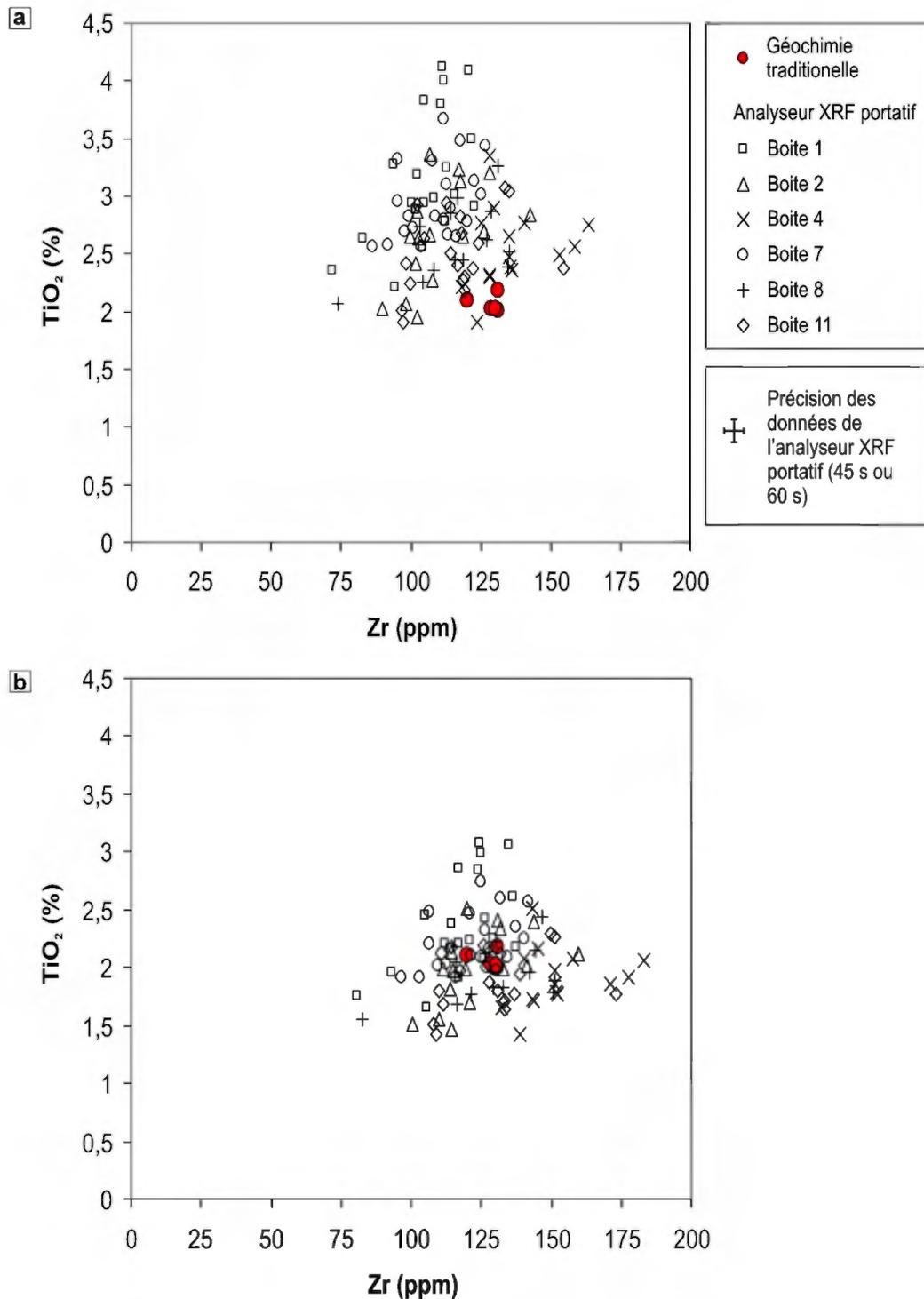


Figure 25. Comparaison de cinq mesures de géochimie traditionnelle (sur des échantillons différents) avec 104 mesures de l'analyseur XRF portable Alpha (45 s d'intégration) réparties sur six boîtes de carottes de basalte tholéïitique dans le forage BRC-08-72. (a) Valeurs brutes. Les valeurs en Zr de l'analyseur XRF sont typiquement trop faibles, alors que les valeurs en Ti sont trop élevées. (b) Valeurs corrigées pour que les moyennes soient égales pour les deux méthodes. Voir texte pour explications.

TABLEAUX

Tableau 1. Définitions de certains termes employés dans ce rapport.

| Terme | Définition |
|---------------------------------|---|
| Capteur | « Dispositif fixe, placé à la source du phénomène auquel il est sensible et qui mesure une valeur physique propre à ce phénomène pour la transmettre, sous forme de signal électrique, à un système d'affichage ou de traitement d'information » |
| Écart-type relatif | « Valeur obtenue en divisant l'écart-type par la moyenne » Note : quasi-synonyme = coefficient de variation. |
| Erreur aléatoire | « Composante de l'erreur de mesure qui, lors de plusieurs mesurages du même mesurande, varie d'une façon imprévisible » Note : « On ne peut pas tenir compte de l'erreur aléatoire par application d'une correction. » |
| Erreur systématique | « Composante de l'erreur de mesurage qui, lors de plusieurs mesurages de la même grandeur, reste constante ou varie d'une façon prévisible » |
| Étalonnage | « Ensemble des opérations établissant, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs de la grandeur indiquées par un appareil de mesure et les valeurs correspondantes de la grandeur réalisées par des étalons » En anglais : <i>calibration</i> |
| Exactitude | « Aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications proches de la valeur vraie d'une grandeur mesurée » |
| Instrument, appareil, de mesure | « Dispositif destiné à faire un mesurage » Note : l'instrument de mesure se distingue du simple capteur par le fait qu'il est autonome et dispose de son propre organe d'affichage ou de stockage des données. |
| Précision | « La finesse avec laquelle une estimation approche la moyenne d'une longue série d'estimations effectuées sur le même objet dans des conditions similaires » Note : en pratique, est quantifié par l'écart-type d'une série de mesures sur le même objet dans les mêmes conditions (répétabilité). |
| Répétabilité | « Étroitesse de l'accord entre les résultats successifs obtenus avec la même méthode sur une matière identique soumise à l'essai dans les mêmes conditions (même opérateur, même appareil, même laboratoire et court intervalle de temps) » Note : ne pas confondre avec la reproductibilité. |

Tableau 1. Définitions de certains termes employés dans ce rapport (suite).

| Terme | Définition |
|-------------|---|
| Résolution | « Aptitude, d'un instrument d'observation ou de mesure, à discriminer deux objets ou deux valeurs proches l'une de l'autre » Note : on utilise aussi ce terme pour désigner l'écart spatial entre les mesures, en termes d'espacement le long de la carotte. |
| Sensibilité | « Capacité d'une échelle de mesure à discriminer différents degrés d'intensité du phénomène à l'étude » |

Source des citations : Grand dictionnaire terminologique, Office de la Langue Française du Québec. Autre références consultées : Taylor (1997) et BIPM (2008).

Tableau 2. Résumé des séries de mesures à trois températures différentes sur la boîte #5 du forage BRC-08-72.

| Température des carottes °C | Densité Moyenne* \pm E.T. g/cm ³ | Susceptibilité magnétique Moyenne* \pm E.T. 10 ⁻⁵ SI |
|--------------------------------|---|---|
| 15 | 3,00 \pm 0,03 | 122 \pm 10 |
| 25 | 3,00 \pm 0,02 | 120 \pm 8 |
| 35 | 3,00 \pm 0,02 | 117 \pm 9 |

* Moyenne d'une série de mesures aux 22 profondeurs relatives suivantes (en mètres par rapport au début de la boîte de carottes): 0,14; 0,36; 0,54; 0,74; 0,94; 1,12; 1,36; 1,65; 1,87; 1,99; 2,25; 2,45; 2,83; 2,99; 3,16; 3,34; 3,54; 3,74; 3,94; 4,14; 4,34; 4,52. La profondeur relative est mesurée par rapport au début de la boîte. E.T. = écart-type de ces séries de mesures.

Tableau 3. Tests* pour vérifier la signification statistique des différences de susceptibilité magnétique observées au tableau 2.

| Comparaison | Différence de susceptibilité moyenne | Valeur p | Interprétation |
|-------------|--------------------------------------|----------|--|
| 15-25°C | 1,6% | 0,056 | Pas de différence significative entre les moyennes de susceptibilité magnétique à ces températures |
| 25-35°C | 2,1% | 0,050 | Idem |
| 15-35°C | 3,8% | 0,013 | Les différences sont significatives |

*Test t pour des variables dépendantes, seuil de probabilité de 5% ($\alpha = 0,05$). Si valeur $p < \alpha$, on rejette l'hypothèse nulle selon laquelle les deux séries de données viennent de populations dont la moyenne est égale; donc on accepte l'hypothèse alternative selon laquelle les séries de données doivent venir de populations dont les moyennes sont différentes. Si $p > \alpha$, on ne rejette pas l'hypothèse nulle.

Tableau 4. Susceptibilités magnétiques volumétriques et densités typiques de différentes lithologies, selon Hunt et al. (1995).

| Lithologie | Susceptibilité magnétique $\times 10^{-5}$ SI | Densité g/cm^3 |
|------------------------------|--|----------------------------|
| <i>Roches ignées</i> | | |
| Andésite | 17 000 | 2,61 |
| Basalte | 25 – 18 000 | 2,99 |
| Diabase | 100 – 16 000 | 2,91 |
| Diorite | 63 – 13 000 | 2,85 |
| Gabbro | 100 – 9000 | 3,03 |
| Granite | 0 – 5000 | 2,64 |
| Péridotite | 9600 – 20 000 | 3,15 |
| Pyroxénite | 13 000 | 3,17 |
| Rhyolite | 25 – 3800 | 2,52 |
| Roche ignée felsique moyenne | 4 – 8200 | 2,61 |
| Roche ignée mafique moyenne | 55-12 000 | 2,79 |
| <i>Roches sédimentaires</i> | | |
| Argile | 17 – 25 | 1,70 |
| Calcaire | 0,2 – 2500 | 2,11 |
| Charbon | 3 | 1,35 |
| Dolomie | -1 – 94 | 2,30 |
| Grès | 0 – 2090 | 2,24 |
| Shale | 6 – 1860 | 2,10 |
| Roche sédimentaire moyenne | 0 – 5000 | 2,19 |
| <i>Roches métamorphiques</i> | | |
| Amphibolite | 75 | 2,96 |
| Gneiss | 0 – 2500 | 2,80 |
| Granulite | 300 – 3000 | 2,63 |
| Phyllite | 160 | 2,74 |
| Quartzite | 440 | 2,60 |
| Schiste | 3 – 300 | 2,64 |
| Serpentinite | 310 – 1800 | 2,78 |
| Slate | 0 – 3800 | 2,79 |
| Roche métamorphique moyenne | 0 – 7300 | 2,76 |

Tableau 5. Susceptibilités magnétiques volumétriques et densités typiques de différents minéraux, selon Hunt et al. (1995).

| Lithologie | Susceptibilité magnétique $\times 10^{-5}$ SI | Densité g/cm^3 |
|----------------------------|--|----------------------------|
| <i>Minéraux sans fer</i> | | |
| Graphite | -8 – 20 | 2,16 |
| Calcite | -0,8 – 4 | 2,83 |
| Anhydrite | -1,4 – 6 | 2,98 |
| Gypse | -1,3 – 3 | 2,34 |
| Orthoclase | -1,3 – 1,7 | 2,57 |
| Magnésite | -1,5 | 3,21 |
| Forstérite | -1,2 | 3,20 |
| Serpentine | 310 – 7500 | 2,55 |
| Halite | -1 – 1,6 | 2,17 |
| Galène | -3,3 | 7,50 |
| Quartz | -1,3 – 1,7 | 2,65 |
| Cassitérite | 110 | 6,99 |
| Sphalérite | -3,1 – 75 | 4,00 |
| <i>Minéraux ferrifères</i> | | |
| Grenat | 270 | 3,90 |
| Illite | 41 | 2,75 |
| Montmorillonite | 33 – 35 | 2,50 |
| Biotite | 150 – 290 | 3,00 |
| Sidérite | 130 – 1100 | 3,96 |
| Chromite | 300 – 12 000 | 4,80 |
| Orthopyroxène | 150 – 180 | 3,59 |
| Fayalite | 550 | 4,39 |
| Olivines | 160 | 4,32 |
| <i>Sulfures de fer</i> | | |
| Chalcopyrite | 2,3 – 40 | 4,20 |
| Arsénopyrite | 300 | 6,05 |
| Pyrrhotite | 46-140 000 | 4,62 |
| Pyrite | 4 – 500 | 5,02 |
| <i>Oxydes de Fe-Ti</i> | | |
| Hématite | 50 – 4000 | 5,26 |
| Ilménite | 220 – 380 000 | 4,72 |
| Magnétite | 100 000 – 570 000 | 5,18 |
| Titanomagnétite | 130 000 – 280 000 | 4,99 |

Tableau 6. Les cinq analyses géochimiques conventionnelles ayant servi pour calculer la composition de référence pour le basalte tholéïitique du forage BRC-08-72 entre 30,70 et 77,80 m.

| Échantillon* | Boite # | De m | À m | Fe ₂ O ₃ ^T % | MnO % | Sr ppm | TiO ₂ % | Zn ppm | Zr ppm |
|--------------|---------|-------|-------|---|-------|--------|--------------------|--------|--------|
| G0578651 | 1 | 30,80 | 31,00 | 16,7 | 0,20 | 97,2 | 2,01 | 137,3 | 131,0 |
| 549636 | 2 | 36,0 | 36,1 | 16,1 | 0,20 | 59 | 2,1 | 135 | 120 |
| 549637 | 7 | 57,4 | 57,55 | 16,4 | 0,23 | 133 | 2,18 | 122 | 131 |
| G0578654 | 8 | 61,0 | 61,2 | 17,9 | 0,26 | 340,1 | 2,03 | 164,4 | 128,6 |
| G0578655 | 11 | 75,75 | 76,00 | 17,5 | 0,25 | 219,5 | 2,02 | 167,5 | 130,3 |
| Moyenne | | | | 16,9 | 0,23 | x | 2,07 | 145 | 128 |
| Écart-type | | | | 0,8 | 0,03 | x | 0,07 | 20 | 5 |

* Les trois échantillons dont le numéro commence par « G » ont été analysés à l'INRS-ETE, par ICP-AES (Fe, Mn, Sr, Ti, Zn) et ICP-MS (Zr). Les deux autres analyses ont été fournies par Xstrata Zinc (méthode XRF, laboratoire ALS Chemex).

Tableau 7. Résumé des 104 mesures de l'analyseur XRF portatif sur six boîtes de forage de basalte tholéïitique du forage BRC-08-72*.

| Élément/oxyde | Fe ₂ O ₃ ^T % | MnO % | Sr ppm | TiO ₂ % | Zn ppm | Zr ppm |
|--------------------|---|-------|--------|--------------------|--------|--------|
| Moyenne | 22,3 | 0,18 | 132 | 2,77 | 237 | 115 |
| Écart-type | 4,6 | 0,05 | 83 | 0,47 | 142 | 23 |
| Écart-type relatif | 21% | 25% | 63% | 17% | 60% | 20% |

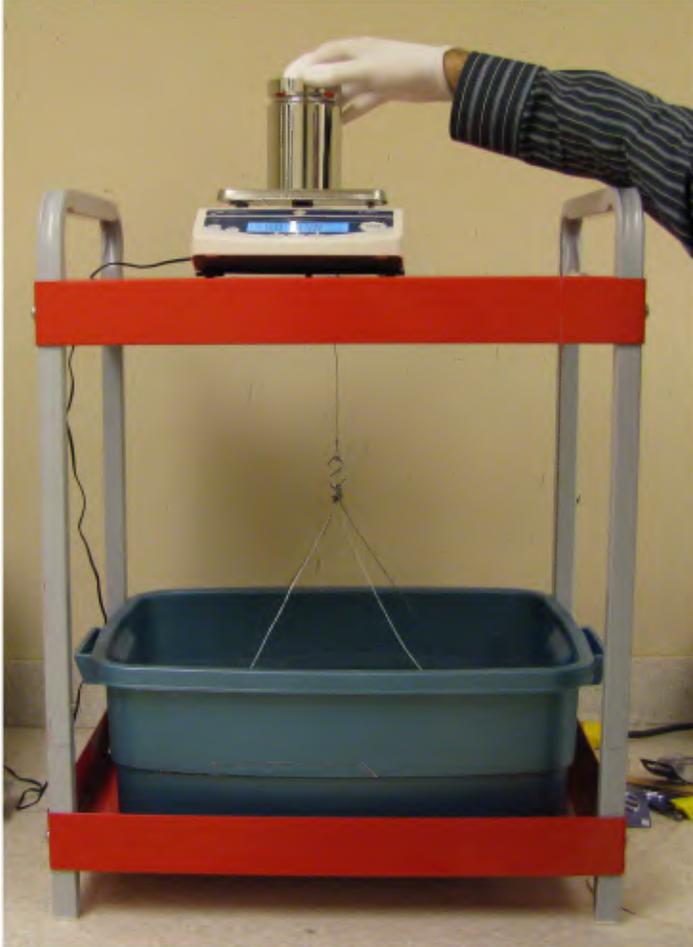
* Voir texte pour explication.

Tableau 8. Différence de moyennes par les deux méthodes de mesures (géochimie conventionnelle, analyseur XRF portatif) et facteurs de correction proposés pour les données de l'analyseur XRF portatif.

| Élément | Fe | Mn | Sr | Ti | Zn | Zr |
|---|-------|-------|----|-------|-------|-------|
| Différence sur les moyennes, valeur absolue | 32% | 20% | x | 34% | 63% | 11% |
| Facteur de correction | 0,758 | 1,246 | x | 0,748 | 0,612 | 1,119 |

ANNEXE

Système de mesure de densité des roches par immersion du LAMROC



Équipement

- Balance de précision Denver Instrument S6002 (précision 0,01 g, capacité 6 kg)
- Masse d'étalonnage Troemner de 5000 g (classe 3, certificat #591065)
- Thermomètre à l'alcool (résolution 1°C)
- Installation portable illustrée ci-contre

Méthode

Les échantillons de roche, incluant les carottes de forage, sont pesés successivement à sec puis dans l'eau. La température de l'eau est notée tous les quatre échantillons. Le calcul de densité est alors réalisé selon l'équation

$$\rho_r = \frac{m_a}{m_a - m_e} \rho_e$$

où ρ_r est la densité de la roche, m_a est la masse dans l'air de l'échantillon, m_e la masse dans l'eau et ρ_{eau} la densité de l'eau, qui varie selon sa température. Pour la densité de l'eau, on interpole entre les valeurs suivantes selon une équation polynomiale : 25°C = 0,9970479 g/cm³, 22°C = 0,9977735 g/cm³, 20°C = 0,9982071 g/cm³, 15°C = 0,9991026 g/cm³, 10°C = 0,9997026 g/cm³.

Calcul d'incertitude

Entre 2,00 et 4,00 g/cm³, l'incertitude – due à la balance seulement – sur les mesures de densité par immersion est de 0,01 g/cm³ ou moins pour des masses d'échantillons dans l'air de 36 à 6000 g. Si on multiplie par deux la précision de la balance fournie par le fabricant (à 0,02 g/cm³) pour plus de sûreté, la masse minimum dans l'air pour maintenir la même incertitude absolue est aussi doublée, à 72 g. D'autres facteurs vont affecter la précision du système de mesures, mais une détermination empirique de la précision n'a pas été réalisée pour l'instant.

