



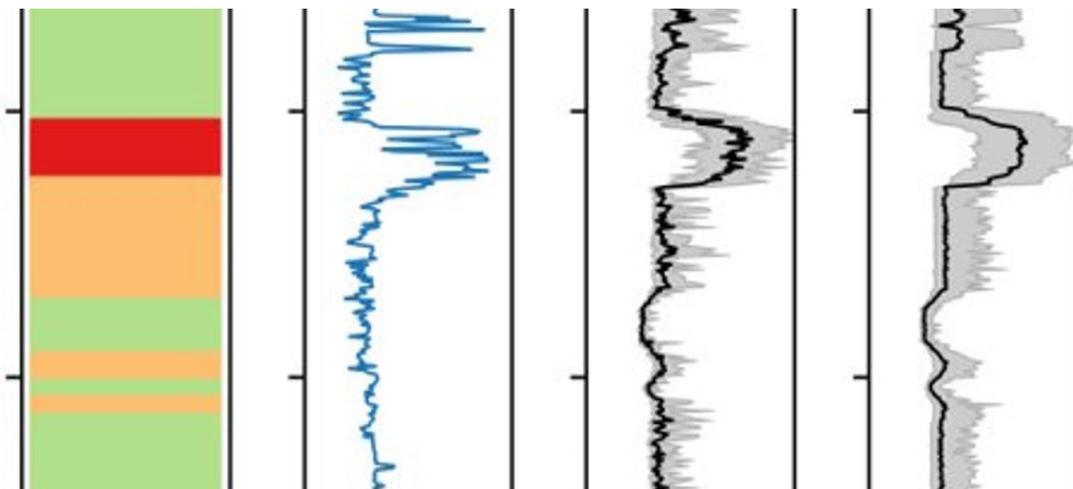
consorem

CONSORTIUM DE RECHERCHE EN EXPLORATION MINÉRALE

Valorisation des données de susceptibilité magnétique en exploration minérale

Par
Morgane Gigoux, Ph. D.

Avec la collaboration de
Valentin Peyrard
Charles Bérubé, Ph. D.
Sylvain Trépanier, géo., M. Sc. A.



Projet 2021-02

Avertissement

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration Minérale) rendus publics pour le bénéfice de l'ensemble de la communauté géoscientifique, ceci après la période de confidentialité prévue aux règlements généraux du CONSOREM.

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver et seul le CONSOREM en assume la responsabilité.

Le contenu du document demeure la propriété de son auteur et du CONSOREM et peut être reproduit en totalité ou en partie à des fins non commerciales en citant la référence suivante :

Gigoux, M., Peyrard, V., Bérubé, C., Trépanier, S. 2022. Valorisation des données de susceptibilité magnétique en exploration minérale. Rapport, Projet CONSOREM 2021-02, 41p.

Toutefois, la reproduction multiple de ce document, en tout ou en partie, pour diffusion à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite du CONSOREM.

CONSOREM

Université du Québec à Chicoutimi
555, boulevard de l'Université
Chicoutimi (Québec) G7H 2B1

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@uqac.ca

Site Web: www.consorem.ca



Table des matières

RÉSUMÉ	4
1- INTRODUCTION ET OBJECTIFS	6
2- DONNÉES UTILISÉES	9
3. VALORISATION DE K EN EXPLORATION	10
3.1 DÉTECTION DES POINTS DE RUPTURE	14
3.2 RÉOLUTION OPTIMALE	16
3.3 SENSIBILITÉ	17
3.4 PRÉDICTION DE K ET CLASSIFICATION DES LITHOLOGIES.....	18
4. AMÉLIORATION DES NORMES LITHOMODELEUR	21
4.1 INTÉGRATION DE K	22
4.2 INTÉGRATION DE LA PYRRHOTITE ET DU SOUFRE	27
5. CONCLUSION	30
6. REMERCIEMENTS	30
7. RÉFÉRENCES	31
ANNEXE 1	33
DÉTAIL SCHÉMATIQUE DES CYCLES DE CALCULS	33
ANNEXE 2	34
NOTES ET REMARQUES SUR LES PROTOCOLES DE PRISE DE MESURE	34
ANNEXE 3	38
ANALYSE DES VALEURS DE SUSCEPTIBILITÉ NÉGATIVES	38
ANNEXE 4	41
OPTIMISATION DE L'AUTO-ENCODEUR	41



Résumé

Un premier volet du projet a été consacré à valoriser les données de susceptibilité magnétique (K) en créant un outil numérique permettant quatre applications pratiques : 1) la détection de coupure, 2) la détermination de la résolution optimale des prises de mesures, 3) l'analyse de sensibilité du signal prédit aux lithologies et 4) la mise à l'épreuve de la prédiction de K à partir des lithologies et inversement. Au total, plus de 1 million de données publiques et privées ont été utilisées pour la réalisation de ce premier objectif.

Le second volet s'est concentré sur l'amélioration des estimations des proportions de magnétite et de pyrrhotite à partir d'analyses lithogéochimiques (roche totale) et du soufre dans LithoModèleur (Norme CIPW et CONSONORM BasGrade).

1) Valorisation des données de susceptibilité

Une collaboration a été initiée avec Charles Bérubé (professeur adjoint à Polytechnique Montréal) et Valentin Peyrard (étudiant à la maîtrise à Polytechnique Montréal) pour la réalisation de ce volet. Ils ont développé un modèle d'auto-encodeur qui représente parfaitement les caractéristiques discriminantes de K à partir de 3 forages représentatifs et minéralisés du camp de Matagami (banque de données LAMROC). Ce code de segmentation par apprentissage non supervisé est basé sur une architecture de réseau neuronal 1D. Il a pour avantage de générer un modèle qui tient compte non seulement des valeurs, mais aussi de la variabilité du signal. L'objectif n'était pas de reconstruire la lithologie du forage, mais de vérifier si l'auto-encodeur était capable d'identifier les caractéristiques discriminantes et les ruptures majeures dans le signal. Le résultat montre que le prototype d'auto-encodeur a la capacité de faire ressortir certaines variabilités au sein d'une lithologie en apparence homogène et d'identifier les principaux points de rupture. Ce modèle nécessitera d'être raffiné et renforcé dans une phase 2 qui se poursuit pour l'année 2022-2023.

L'entraînement et les répétitions de l'auto-encodeur pour différentes tailles de fenêtres ont permis de suggérer une résolution optimale dans la prise des mesures à partir des forages de Matagami (banques de données LAMROC et Glencore). Un espacement limite de 16,5 m pour une profondeur moyenne de forage de 560 m a été estimé. Le modèle a été utilisé dans un contexte métallogénique différent au Nunavik à partir de forage au sein de roches protérozoïques (BD Mine Raglan) : l'espacement maximal des mesures obtenu est d'environ 5 m pour une profondeur moyenne de forage de 350 m.

L'évaluation de la sensibilité de la prédiction du signal de K à la lithologie a permis de mettre en avant les lithologies qui avaient le plus d'effet sur l'amplitude du signal. Il s'agit sans grande surprise des sulfures massifs et semi-massifs à Matagami. Néanmoins, la même analyse au Nunavik suggère que les roches ultramafiques soient beaucoup plus sensibles que les sulfures massifs. Cela signifie que dans un tel contexte métallogénique dominé par ce type de lithologie, l'utilisation de la susceptibilité magnétique pour la détection de sulfures massifs n'est pas optimale.

Les tests de prédiction ont démontré qu'il était possible de prédire le signal de K à partir des lithologies, mais non l'inverse. En effet, le chevauchement des valeurs de K entre les lithologies et la grande variabilité qui existe au sein même d'une lithologie rendent la fiabilité de la prédiction impossible dans ce sens.

2) Amélioration des outils pour l'exploration

L'intégration de K, du soufre et de la pyrrhotite aux calculs des normes CIPW et à la CONSONORM BasGrade a été réalisée à partir du système d'équations du modèle minéralogique quantitatif des travaux d'Enkin *et al.*, 2020. Ce modèle permet d'estimer les proportions de minéraux à partir de la densité et de la susceptibilité des roches. Le modèle est également compatible avec le calcul de la norme CIPW des roches ignées à partir des analyses géochimiques. Avec la collaboration de



Sylvain Trépanier, ce modèle a été intégré au logiciel prototypage LithoModeleur du CONSOREM (version 4.3) puis validé à partir de bases de données lithogéochimiques intégrant les analyses en soufre (Glencore et Exploration Midland) et pétrographiques (Exploration Midland). Le diagramme de Henkel (1976), ainsi qu'une base de données de référence des valeurs moyennes de K et des valeurs de densité de minéraux et de roches en Abitibi, ont été intégrés également au logiciel.



1-Introduction et objectifs

La susceptibilité magnétique, dénotée K , est une propriété physique sans dimension dans le système international (SI) qui traduit la capacité de tout corps à acquérir une aimantation induite sous l'effet d'un champ magnétique. Elle se calcule assez simplement par le rapport du moment magnétique induit M dans ce corps sur le champ magnétique appliqué H . Les deux mesures sont en ampère par mètre; c'est la raison pour laquelle K est donc sans unité.

Dans les années 70–80, une excellente correspondance a été démontrée entre les valeurs de susceptibilité magnétique et le contenu volumétrique en magnétite par les travaux précurseurs de Zablocki (1974) sur des taconites du Minnesota. C'est depuis ces travaux qu'il est admis que le principal paramètre d'influence de la mesure est la quantité de magnétite dans la roche. Cette relation linéaire est particulièrement valable pour de grandes proportions de magnétite dans la roche. Elle est un peu moins évidente dans des roches pauvres en magnétite. On considère généralement qu'une roche qui contient plus de 1 % de magnétite est déjà riche en magnétite.

La magnétite fait partie de la famille des minéraux ferromagnétiques au sens large. Dans le détail, cette famille comprend les minéraux 1) ferrimagnétiques avec la magnétite et la pyrrhotite, 2) antiferromagnétiques et 3) ferromagnétiques avec les métaux de transition. On parle d'aimantation rémanente pour ces minéraux car ils conservent leur aimantation naturelle même après la suppression du champ magnétique induit. Cependant, cette aimantation rémanente peut disparaître si par exemple elle est exposée à des températures supérieures à 580 degrés, soit le point de Curie de la magnétite.

Il existe également deux autres familles de minéraux qui peuvent influencer la variabilité des mesures de susceptibilité : la famille diamagnétique (susceptibilité négative et faible, indépendante de la température) et la famille paramagnétique (susceptibilité positive et faible, inversement proportionnelle à la température).

Ces gammes de susceptibilité en fonction des lithologies et des minéraux ont été compilées dans la Figure 1 (Clark, 1997; modifié par Dentith et Mudge, 2014). Elles vont se répartir entre 10^{-5} à 100 SI pour les valeurs maximales associées à la magnétite qui est donc le minéral le plus magnétique sur terre. Étant donné la grande variabilité au sein même de certaines lithologies, les valeurs pour des lithologies différentes vont se chevaucher (p. ex. roches felsiques, Figure 1). Les lithologies de type skarns et formations de fer comptent parmi les plus magnétiques. Des roches de compositions différentes (gabbro, basalte, andésite, métasédiments) peuvent également montrer des niveaux de susceptibilités similaires. Néanmoins il est possible de faire ressortir deux tendances : 1) les roches sédimentaires ne contiennent peu ou pas de magnétite et 2) moins il y a de silice dans les roches ignées ou métamorphiques, plus le pourcentage de magnétite augmente (Allard et Bois, 1999).

Les propriétés physiques des roches dépendent de trois paramètres principaux : 1) la minéralogie, 2) les grains (proportions, taille et forme) et 3) la texture (agencement des grains, porosité). Mais il existe aussi de nombreux autres paramètres secondaires documentés dans la littérature qui peuvent également influencer la mesure comme l'orientation des axes cristallins des minéraux, l'anisotropie des minéraux, la chimie primaire ou secondaire liée à l'altération, la rémanence des minéraux (qui est remise en question à l'Archéen notamment), la calibration des appareils de mesures et aussi l'espacement de ces mesures.



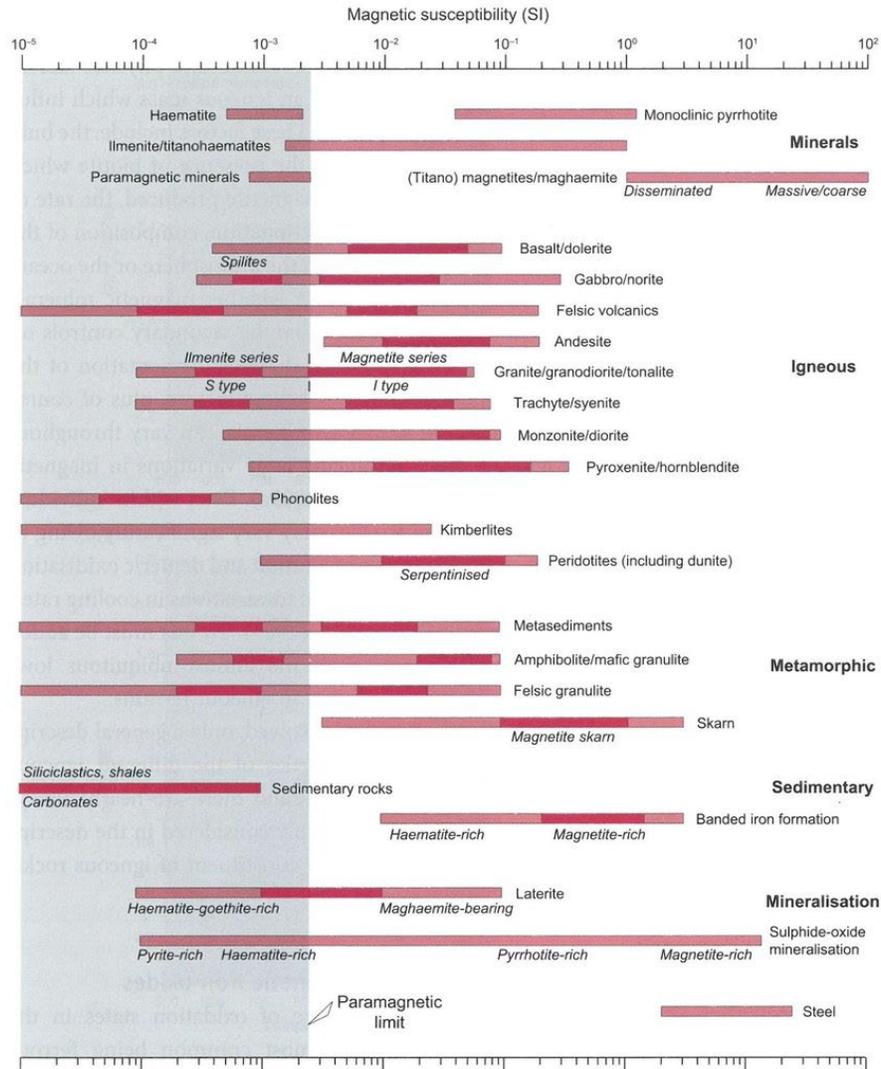


Figure 1. Distribution des gammes de susceptibilité en fonction des lithologies, modifié de Clark (1997) par Dentith et Mudge (2014).

L'utilisation de K en géologie remonte aux années 1930 et est documentée dans une revue des travaux géophysiques au Canada et aux États-Unis, *Studies of geophysical methods*, dans laquelle le lien entre le signal magnétique des roches, les propriétés physiques des roches et la géologie a commencé à être discuté. Les travaux précurseurs de Slichter (1929) et Stearn (1929) représentent les premières études sur les facteurs géologiques influençant les propriétés magnétiques des roches. Une des premières utilisations de la susceptibilité magnétique était la cartographie géologique avec l'attribution de lithologie en fonction des valeurs de susceptibilité (Silva et Hohmann, 1984). En réalité, on parle de niveau de susceptibilité plutôt que de valeurs, car les valeurs peuvent être très variables en fonction de la lithologie et même au sein d'une seule lithologie. Une des premières observations à l'époque était que les roches mafiques sont plus magnétiques que les roches felsiques. Puis, les différents types de granite ont aussi pu être différenciés de cette façon; les granites de type I sont dominés par la présence de magnétite et ceux de type S, par l'ilménite (Hroudá *et al.*, 2009). La variabilité de K peut aussi s'observer le long d'un forage. Ce sont les variations de susceptibilité dans ce cas qui vont permettre de distinguer des contacts lithologiques nets ou des variations de compositions en fonction de l'altération, ou

même d'identifier des niveaux minéralisés. En d'autres termes, les variations de susceptibilité sont plus représentatives qu'une moyenne ou une mesure ponctuelle.

En Europe du Nord, les Finlandais ont compris très tôt qu'en exploration, la caractérisation des propriétés pétrophysiques des roches est indispensable à l'interprétation des levés aéromagnétiques et permet de cibler les secteurs d'intérêt pour l'exploration. Ils ont instauré un protocole systématique de prise de mesure de susceptibilité depuis les années 2000 qu'ils ont couplé à d'autres variables. Ils ont ainsi accumulé et compilé une base de données pétrophysiques répartie sur tout le territoire (Airo et Säävuori, 2013).

Quand on parle de variabilité des mesures et de leur interprétation, plusieurs phénomènes géologiques sont à considérer comme l'influence de l'altération, du métamorphisme et des variations redox. En effet, la cristallisation de la magnétite est possible dans un environnement où il y a un équilibre relatif entre Fe^{2+} et Fe^{3+} . Un déséquilibre des conditions redox peut entraîner une destruction de la magnétite ou la formation d'autres minéraux qui ne sont pas nécessairement ferromagnétiques (Figure 2). Il est également très bien documenté dans la littérature que le phénomène de serpentinisation de l'olivine et des pyroxènes au cours du métamorphisme a un grand impact sur les valeurs de K (Figure 3). K est jusqu'à 10 fois plus élevé dans une roche 100% serpentinisée. Il peut aussi y avoir d'autres phénomènes comme la libération du fer de la magnétite et sa migration vers des carbonates de fer, ou encore la formation de magnétite secondaire et de pyrrhotite lors de la déformation ou recristallisation des roches qui auront une influence sur la variabilité des mesures de K et leur interprétation.

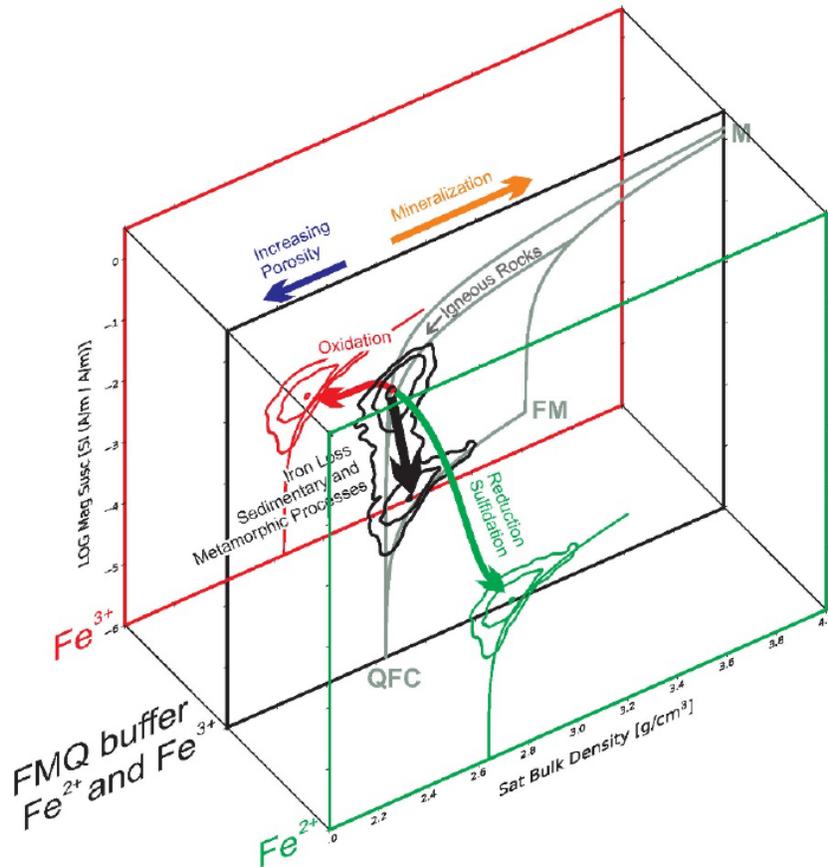


Figure 2. Diagramme 3D schématisant la distribution des valeurs de susceptibilité et de densité des roches en fonction de l'évolution des processus pétrophysiques et de l'état REDOX (Enkin, 2018).

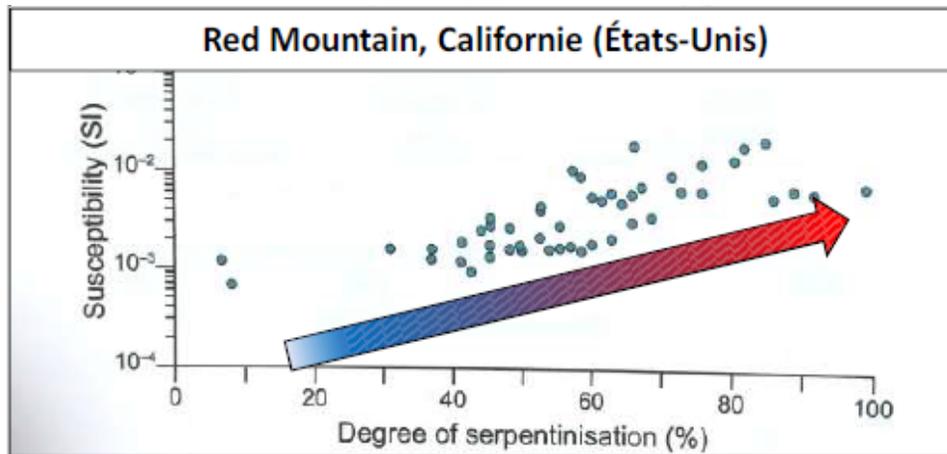


Figure 3. Évolution de K en fonction du degré de serpentinisation de la roche (Dentith et Mudge, 2014).

2-Données utilisées

Un total de plus de 1 million de données a été intégré pour la réalisation du projet. Un tableau synthétique des caractéristiques des données publiques et privées utilisées est présenté à la Figure 4.

Les bases de données publiques des caractéristiques pétrophysiques des roches précambriennes de Finlande et du Canada ont permis d'avoir une vue d'ensemble sur plusieurs propriétés physiques des roches et de se familiariser avec ce genre de données dans différents diagrammes en fonction de l'âge des roches.

Les bases de données publique de l'INRS (LAMROC) et privée de Glencore sur le camp de Matagami ont été utilisées pour le volet valorisation des données de susceptibilité. L'avantage de ces données est qu'elles sont des mesures très régulières au 0,2 et 1,5 m le long de plusieurs forages. La base de données de Raglan a été utile pour valider le modèle entraîné à Matagami sur un autre secteur au Nunavik dans un contexte métallogénique différent.

L'amélioration des normes LithoModeleur a pu être testée et vérifiée à partir des bases de données privées de Glencore et d'Exploration Midland-BHP. Cette dernière nous a notamment permis d'avoir accès à des descriptions pétrographiques détaillées, à des quantifications modales (%) des proportions minéralogiques par lames minces, aux valeurs de K associées et aux analyses en soufre (lithogéochimie).

	 GTK	 BRITISH COLUMBIA Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources	 INRS Institut national de la recherche scientifique	GLENCORE	 MIDLAND 156-1100	MINE RAGLAN
Description	Roches précambriennes Finlande	Roches précambriennes à quaternaire (CRPPD) Canada	Roches archéennes Québec, Abitibi Matagami	Roches archéennes Québec, Abitibi Matagami	Roches protérozoïques Nunavik	Roches protérozoïques Nunavik
Nbre échantillon	n=130555	n=18276	n=2275 (XRF) n=10475 (K,d)	n=36 934 (K only) n=579 (avec géochimie)	n=34	n > 1 000 000
Variables	K, d, Q-ratio Lithologie	K, d, NRM, resistivité, porosité, lithologie	K, d, XRF, lithologie, altération	K, géochimie, lithologie, altération, minéralisation	K, géochimie, pétrographie	K, d, litho
Type de mesure	ponctuelles	ponctuelles	en continue (au 0,2m)	régulière au 1,5 m	ponctuelles	en continue (au 0,6 m)
Matériel	collection d'échantillon, plug de carotte	diversité d'échantillon	Forages	Forages	Affleurements ou blocs	Forages
Appareils de mesure	K-3A mesure de densité air/ saturation en eau mesure de rémanence par R2	compilation plusieurs méthodes	LAMROC MS2C et MS Densité gamma XRF Delta Premium	KT-10 et KT-20	KT-10 Midland (sur échantillons) VanPetro (sur plaques minces)	BMP-06 (IFG Corporation)

Figure 4. Tableau synthétique des données publiques et privées compilées dans ce projet.

3. Valorisation de K en exploration

Trois bases de données ont été utiles pour valoriser les données de susceptibilité magnétique en exploration :

- 1) 1) la base de données publique du LAMROC (Ross *et al.*, 2012), avec 3 forages détaillés du camp de Matagami pour lesquels un grand nombre de variables ont été étudiées (dont d=densité des échantillons).
- 2) 2) la base de données privée de Glencore qui regroupe 111 forages provenant d'une campagne d'exploration à l'échelle du camp de Matagami;
- 3) 3) la base de données privée de Mine Raglan avec plus d'un million de données de susceptibilité réparties dans 386 forages.

Le tableau 1 résume les caractéristiques des trois bases de données utilisées.

Tableau 1. Caractéristiques des bases de données de susceptibilité magnétique de LAMROC, Glencore et Mine Raglan.

Campagne	LAMROC	Glencore	Mine Raglan
Variables étudiées	K, d et codes lithologiques	K et codes lithologiques	K et codes lithologiques
Forages	3	111	386
Données récupérées	10 475	36 934	1 228 481
Données utilisées	10 459	36 700	1 146 662
Espacement des mesures	0,2 m	1,5 m	0,6 m (en moyenne)

Pour ces trois bases de données, deux variables ont été considérées afin de répondre à l'objectif : les signaux de susceptibilité magnétique et les descriptions lithologiques. La base de données du LAMROC fut la première utilisée, en amont de l'emploi des bases de données privées; elle a servi à mettre en place la structure de notre outil principal : l'auto-encodeur, afin d'avoir un cadre pour les résultats à produire.

Les bases de données privées de Glencore et Mine Raglan ont permis d'augmenter progressivement le nombre de forages utilisés et par conséquent la quantité de données à traiter (tableau 1). Cela a permis une amélioration des modèles d'outils utilisés lors du projet.

Cependant, il a été nécessaire de procéder à une préparation stricte des données recueillies. Une première vérification des bases de données a permis de retirer les données aberrantes. Par la suite, des tests ont été réalisés pour déterminer les distributions statistiques des valeurs de susceptibilité magnétique. Cette étape a permis de comprendre et d'interpréter les valeurs négatives, afin de pouvoir les inclure à la base de données dépendamment des distributions après filtrage des données (révélant si elles étaient fausses ou concordantes, voir Annexe 3).

Une simplification des codes s'est avérée nécessaire pour faciliter le traitement et l'interprétation des descriptions lithologiques. Un regroupement a donc été effectué en fonction des grands groupes lithologiques et des comptes de données (nombre d'échantillons) par lithologie. Les codes lithologiques simplifiés retenus pour le camp de Matagami sont donnés dans le tableau 2 et sont identiques à ceux utilisés dans le SIGÉOM (MRNF). Les lithologies retenues pour les données de Mine Raglan sont détaillées dans le Tableau 3.

Tableau 2. Description des codes lithologiques simplifiés utilisés pour la valorisation des données du LAMROC et de Glencore.

Code	Lithologie	Nombre d'échantillons
I1	Granite, tonalite, autre roche intrusive felsique	435
I2	Diorite, autre roche intrusive intermédiaire	2429
I3	Gabbro, gabbro à quartz, autre roche intrusive mafique	11 027
KT	Tuffite clé	13
M27	Shale	17
MGT	Magnétite massive	302
PIPE	Pipe d'altération	1296
S	Roche sédimentaire	43
SM	Sulfures massifs (>75%)	445
SSM	Sulfures semi-massifs (50-75%)	277
T	Tuffite	73
T1	Tuf felsique	57
T2	Tuf intermédiaire	236
T3	Tuf mafique	536
V1	Rhyolite, rhyodacite, dacite, autre volcanite felsique	4192
V2	Andésite, autre volcanite intermédiaire	3804
V3	Basalte, autre volcanite mafique	11 392

Tableau 3. Description des codes lithologiques simplifiés utilisés pour la valorisation des données de Mine Raglan.

Code	Lithologies	Nombre d'échantillons
10	Roche ultramafique	683 443
9	Roche intrusive mafique	180 444
6	Roche volcanique mafique	179 857
4	Méta sédiments	118 054
MS	Sulfures massifs	28 349
SHMS	Sulfures semi-massifs	792



Auto-encodeur variationnel conditionnel

La valorisation de K dans ce projet est basée sur le développement d'un outil de type auto-encodeur. Il s'agit d'un outil reposant sur l'apprentissage automatique non supervisé. Les auto-encodeurs sont des réseaux de neurones couramment utilisés pour réduire la dimension des données en identifiant leurs caractéristiques discriminantes (Hinton et Salakhutdinov, 2006). Les auto-encodeurs sont constitués d'un module d'encodage (encodeur), d'une représentation cachée des caractéristiques discriminantes du signal (code) et d'un module de décodage (décodeur), comme l'illustre la Figure 5A.

Le fonctionnement d'un auto-encodeur peut se résumer de la façon suivante : un signal d'origine (ici la susceptibilité magnétique) est traité par un module d'encodage, le but du module d'encodage étant de réduire la dimension du signal vers une représentation abstraite de ses caractéristiques discriminantes (code). Le module d'encodage est constitué de transformations linéaires et de fonctions d'activations non linéaires. Cette combinaison de transformations permet de décomposer la susceptibilité magnétique selon des relations arbitrairement complexes. Ensuite, le but du module de décodage est de reconstruire le signal d'entrée à partir des caractéristiques discriminantes identifiées. Le décodeur est constitué des mêmes combinaisons de fonctions que l'encodeur, mais son architecture est symétrique par rapport à ce dernier.

Les auto-encodeurs doivent être entraînés sur une grande quantité de données pour optimiser les paramètres des fonctions constituant les modules d'encodage et de décodage. L'entraînement est un processus d'optimisation qui vise à minimiser l'erreur de reconstruction des signaux sortants. L'entraînement permet donc à l'auto-encodeur d'identifier les représentations des caractéristiques discriminantes du signal. En résultat, le code appris contient toute l'information nécessaire pour décrire le signal. Cet entraînement est réitéré un grand nombre de fois afin de réduire les écarts entre le signal d'origine et celui prédit lors de la reconstruction, affinant le modèle à chaque itération (voir Annexe 4). Comme illustré à la Figure 5A, la version reconstruite des données est une excellente représentation de la version originale des données, mais celle-ci n'est pas parfaite à cause d'une légère perte d'information dans le code.

L'architecture détaillée de l'auto-encodeur variationnel développé pour valoriser les données de susceptibilité magnétique est schématisée à la Figure 5B. Les modules d'encodage puis de décodage qui sont constitués de trois couches cachées de transformations linéaires avec connexions pleines ($f^{(1)}$ à $f^{(3)}$ dans l'encodeur et $g^{(1)}$ à $g^{(3)}$ dans le décodeur, Figure 2). Une fonction d'activation de type ReLU est appliquée sur le résultat de chaque couche de transformation. Le code recherché par l'auto-encodeur est remplacé par les paramètres d'une loi normale (Kingma et Welling, 2014) pour modéliser le bruit dans les données, puisque les signaux de susceptibilité magnétique sont généralement bruités. De plus, les descriptions lithologiques sont utilisées pour conditionner la loi normale optimisée par l'auto-encodeur (Sohn *et al.*, 2015). L'optimisation de l'auto-encodeur est accomplie avec l'algorithme du gradient stochastique Adam (Kingma et Ba, 2014).

Il est nécessaire de prétraiter les données de susceptibilité magnétique avant de les utiliser pour entraîner l'auto-encodeur. D'abord, le signal d'entrée de la susceptibilité magnétique est subdivisé en fenêtres de tailles fixes (Figure 6). La taille des fenêtres est une variable fixée par l'utilisateur selon la résolution souhaitée. Cet ensemble de fenêtres contenant chacune une portion du signal complet correspond donc aux exemples de signal d'entrée qui sont utilisés pour entraîner l'auto-encodeur.



Deuxièmement, une ou plusieurs lithologies sont associées à chaque fenêtre. Les fenêtres étant mobiles sur l'intégralité du signal, des lithologies différentes peuvent donc se retrouver au sein d'une même fenêtre. Une transformation logarithmique des données de susceptibilité magnétique doit ensuite être appliquée afin de traiter des valeurs de grandeur comparables, car la susceptibilité magnétique est une quantité qui peut varier sur plusieurs ordres de grandeur.

Troisièmement, l'auto-encodeur produit des fenêtres reconstruites en maximisant la ressemblance entre les fenêtres originales et celles reconstruites, l'optimisation revient ici à minimiser l'erreur engendrée lors de la reconstruction.

Enfin, les codes qui décrivent des caractéristiques discriminantes du signal sont extraits.

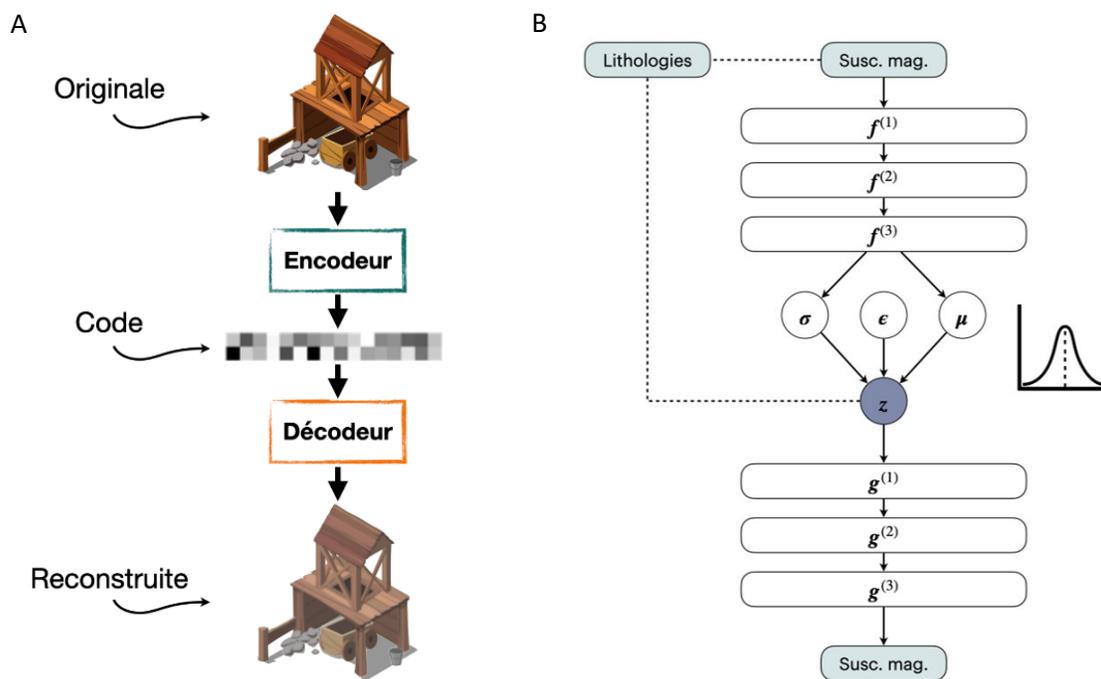


Figure 5. A) Schéma simplifié du fonctionnement d'un auto-encodeur; B) Architecture de l'auto-encodeur variationnel conditionnel. Les fonctions f et g indiquent des couches successives de transformations linéaires avec des fonctions d'activation de type ReLU. La moyenne et l'écart-type de la distribution normale au centre de l'auto-encodeur variationnel sont indiqués par les variables μ et σ , respectivement. La variable ϵ est une valeur tirée aléatoirement dans une distribution normale standard pour chaque réalisation. Les caractéristiques discriminantes du signal (le code) correspondent à la variable z . Les lithologies, lorsque disponibles, sont concaténées au signal d'entrée et au code pour conditionner l'auto-encodeur pendant le processus d'entraînement.

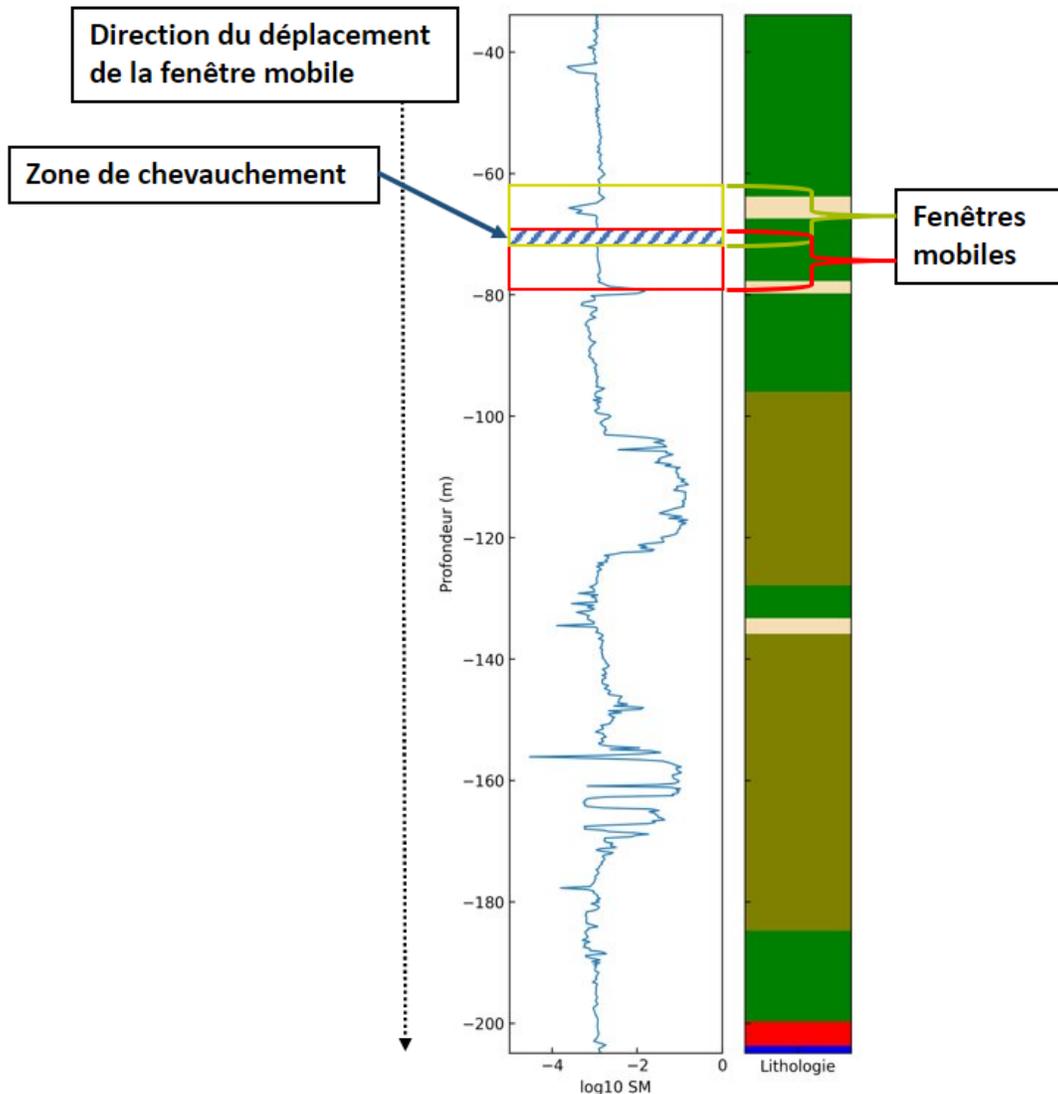


Figure 6. Illustration de la décomposition du signal mesuré le long d'un forage en fenêtres mobiles pour l'auto-encodeur. Les fenêtres ont des dimensions et des zones de chevauchement prédéfinies.

3.1 Détection des points de rupture

En utilisant les codes des diverses fenêtres consécutives extraits de l'auto-encodeur, il est donc possible de distinguer des points de rupture que l'on peut rapprocher et comparer aux frontières entre certaines couches des logs lithologiques.

En appliquant notre prototype d'auto-encodeur à la base de données du LAMROC, nous avons pu extraire certaines des caractéristiques du signal de susceptibilité magnétique.

Sachant que la susceptibilité magnétique pouvait être approchée par un certain nombre de caractéristiques, le réseau devait apprendre et trouver les attributs nécessaires afin de créer un code et permettre la meilleure reconstruction possible. Le code central qui en ressort est donc fait de ces différentes caractéristiques. En procédant à une différence des valeurs du code pour chaque fenêtre consecutive, on peut donc mettre en valeur les grandes variations dans le code.

La Figure 7 présente un exemple de détection des points de rupture du signal de susceptibilité dans le forage BRC-08-72 de la base du LAMROC. Toutes les coupures qui devraient être présentes aux frontières lithologiques ne sont pas détectées. Ici il n'est pas question de la reconstruction d'une description lithologique complète mais d'un gain d'information en passant par le signal de susceptibilité magnétique : des intervalles lithologiques qui semblent homogènes peuvent présenter des susceptibilités variables et être mis en valeur lors de ce traitement.

Comme explicité plus haut, le modèle d'auto-encodeur utilisé pour produire les résultats suivants était le premier prototype. De plus, la base de données utilisée ne dispose que de peu de forages. Il s'agit donc d'un point principal d'amélioration afin de vérifier s'il est possible de mettre en place un traitement plus efficace et systématique du signal de susceptibilité magnétique, ce qui permettrait de disposer de coupures ayant plus de sens. Pour améliorer cette application, des tests seront effectués pour comprendre si l'erreur de reconstruction de chaque fenêtre peut être utilisée pour détecter les anomalies dans le signal. En effet, les fenêtres de susceptibilité qui sont plus difficiles à reconstruire par auto-encodage correspondent généralement aux variations abruptes dans le signal.

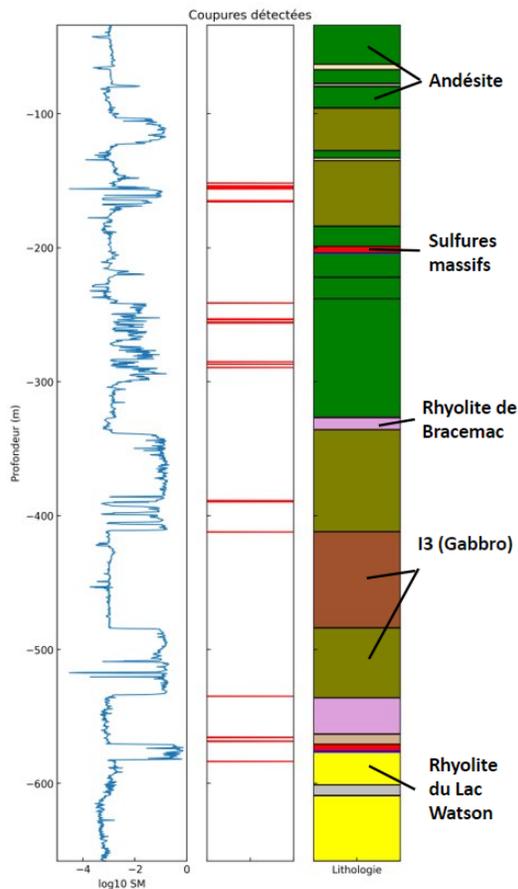


Figure 7. Exemple de détection des ruptures dans le signal à partir du calcul de la différence des caractéristiques discriminantes du signal de susceptibilité magnétique d'une fenêtre à la suivante

3.2 Résolution optimale

Lors de la prise de mesures, il est impératif de choisir des paramètres adaptés afin de répondre à l'objectif visé par la prise des mesures de susceptibilité. Un de ces paramètres est la distance entre deux points de mesure consécutifs le long d'un forage, ce qui correspond à la résolution spatiale du signal. Par exemple, si l'objectif est d'identifier les unités lithologiques, une résolution idéale implique que les mesures sont suffisamment rapprochées pour que les contrastes de susceptibilité magnétique entre différentes unités lithologiques soient bien définis, tout en étant assez éloignées pour éviter une surabondance de détails ou de bruit. Le même principe s'applique si l'objectif est de caractériser des zones d'altération bien définies par une augmentation ou une baisse de susceptibilité magnétique au sein d'une seule lithologie, par exemple.

À titre d'exemple, la Figure 8A montre le signal de susceptibilité magnétique mesuré dans le forage BRC-08-72 avec différentes résolutions. Plus la résolution est faible, plus le bruit est atténué et moins les contrastes de susceptibilité magnétique sont francs. À l'inverse, plus la résolution est élevée, plus les variations à haute fréquence (bruit) sont visibles. Il faut donc trouver l'équilibre idéal entre une résolution trop fine et trop grossière. En d'autres mots, en dessous de quel espacement les données se révèlent-elles difficiles à traiter et au-dessus de quel espacement le traitement ne devient-il pas plus efficace ?

Pour trouver la résolution optimale, l'auto-encodeur est entraîné avec différentes tailles de fenêtres de susceptibilité magnétique afin de simuler différentes résolutions du signal. Puis, l'erreur de reconstruction moyenne entre les signaux entrants et sortants est évaluée. De cette manière, on obtient une courbe mettant en relation la taille des fenêtres et l'erreur de reconstruction (Figure 8B). L'incertitude sur l'erreur de reconstruction moyenne est obtenue en répétant l'expérience 10 fois.

Les valeurs idéales de la taille des fenêtres se situent donc entre les fenêtres pour lesquelles l'erreur stagne autour de zéro (pas de gain d'information malgré des données plus proches) et les fenêtres plus grandes pour lesquelles l'erreur augmente très rapidement (Figure 8B). À partir de ces espacements, il n'est pas possible de produire une reconstruction fidèle ni d'extraire efficacement les attributs intrinsèques de la susceptibilité magnétique.

Pour les bases de données utilisées, les résultats sont les suivants:

- Pour le camp de Matagami : la profondeur moyenne mesurée des forages de la campagne étant de 560 m, il serait préférable de prendre les mesures avec un espacement limite se situant aux alentours de 16,5 m.
- Pour la Mine Raglan : la profondeur moyenne mesurée des forages de la campagne étant de 350 m, il serait préférable de prendre les mesures avec un espacement limite se situant aux alentours de 5 m.

Cependant, quelques nuances doivent être notées. Il est en effet ici question de différents contextes métallogéniques avec des roches d'âges différents (Archéen à Matagami et Protérozoïque à Raglan). De ce fait, la résolution ne peut pas être la même pour les deux camps; pour deux contextes géologiques distincts, il paraît donc préférable de choisir deux résolutions optimales différentes. On peut ainsi relativiser les deux résultats produits pour les campagnes de forages et base de données utilisées : les tailles moyennes des forages sont certes différentes, mais les épaisseurs de couches lithologiques (plus courtes ou au contraire très épaisses) peuvent nécessiter des espacements plus spécifiques; de manière inverse, la présence de bruit peut entraîner un besoin de plus grands espacements afin de le disjoindre des mesures (dans le cas de phénomènes d'altération ponctuels ou d'échantillons fracturés par exemple).



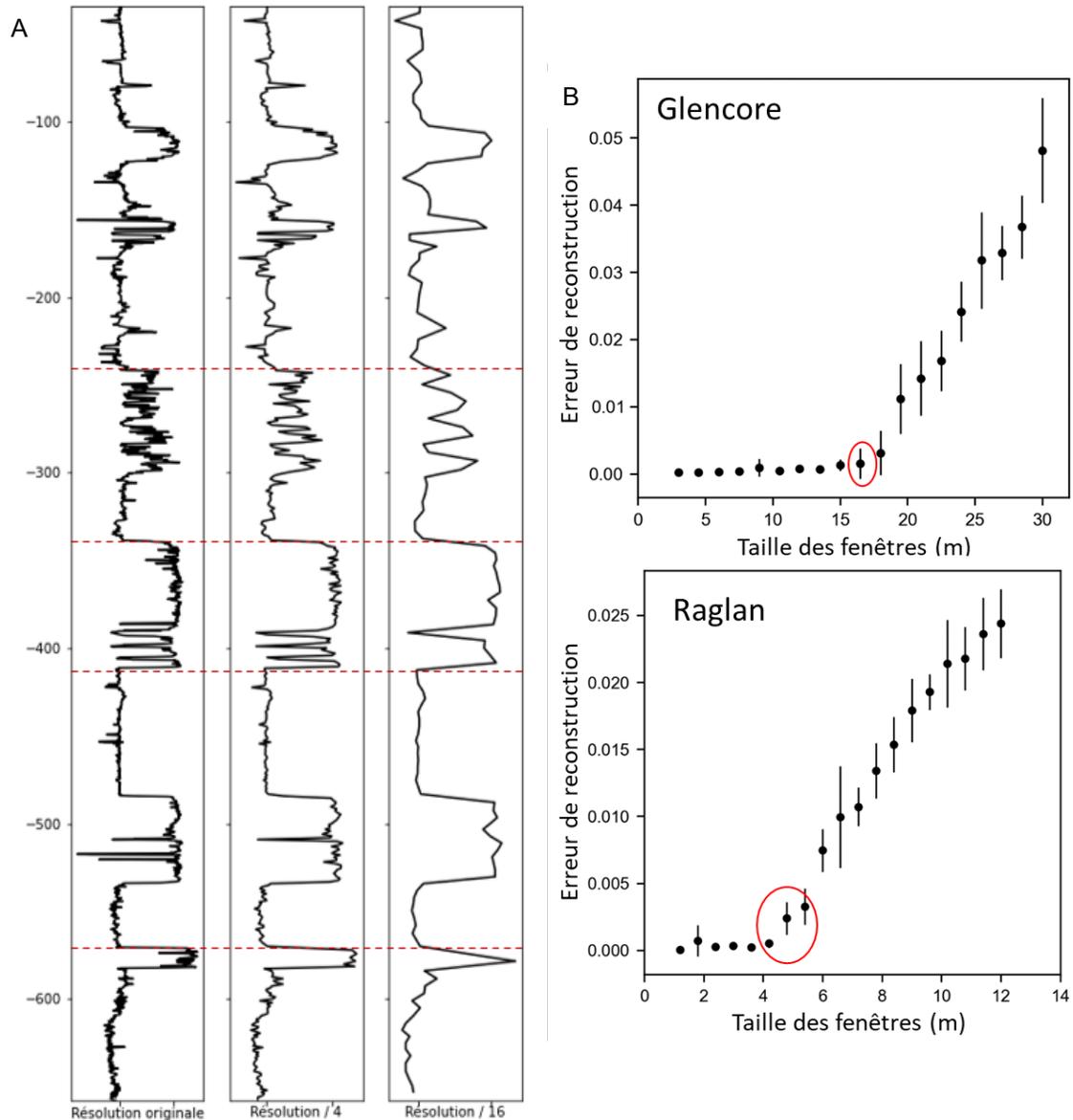


Figure 8. A) Signal de susceptibilité magnétique mesuré dans le forage BRC-08-7, et sa représentation avec une résolution divisée par 4 puis par 16; B) Relation entre l'erreur de reconstitution et la taille des fenêtres de susceptibilité magnétique utilisées pour entraîner l'auto-encodeur variationnel avec les bases de données de Glencore et de Raglan.

3.3 Sensibilité

Sans un contexte de valorisation des données, il est intéressant d'évaluer l'importance relative de la lithologie sur les valeurs de susceptibilité magnétique mesurées en forage. Nous nous sommes donc concentrés sur les liens existants entre les diverses lithologies et le signal ainsi que les propensions de ces dernières à l'influencer. La sensibilité est définie comme le gradient de l'erreur de reconstruction par rapport aux variables catégoriques que sont les lithologies. Ce gradient est calculé automatique pendant l'entraînement de l'auto-encodeur variationnel lorsque celui-ci est conditionné avec les lithologies. La sensibilité relative peut être utilisée pour produire une hiérarchie

des lithologies vis-à-vis de leur importance pour la reconstruction du signal de susceptibilité magnétique. Les résultats obtenus à partir des données de Matagami (LAMROC et Glencore) et du Nunavik (Mine Raglan) sont illustrés respectivement en Figure 9A et B.

La magnétite massive (MGT), les sulfures massifs et semi-massifs (SM et SSM) sont les lithologies qui induisent les plus grandes sensibilités de K dans le camp de Matagami (Figure 9A). Une grande sensibilité pour une lithologie donnée indique que les valeurs de susceptibilité mesurées sont caractéristiques de cette lithologie. À l'inverse, une faible sensibilité pour un type de roche donné indique qu'il n'y a peu ou pas de lien entre les valeurs de susceptibilité mesurées et la lithologie en question. Dans le cas de la tuffite clé (KT) ou encore des pipes d'altération (PIPE), les sensibilités sont faibles et elles seraient donc moins importantes en ce qui concerne la susceptibilité magnétique. La tuffite clé est un niveau repère stratégique pour l'exploration à l'échelle du camp de Matagami, mais elle ne se distingue pas à travers le test de sensibilité réalisé. Concernant les pipes d'altération, le protolithe n'étant pas identifiable (puisque trop altéré), aucun code lithologique en particulier n'est reconnu lors du test. On note encore ici la nécessité de combiner les connaissances géologiques avec celles géophysiques afin d'interpréter au mieux les résultats.

Pour le camp de Mine Raglan, les lithologies qui induisent les plus grandes sensibilités de K sont très largement les roches ultramafiques (Figure 9B). De plus, malgré un compte ne dépassant pas le millier d'échantillons (Tableau 3), la formation de fer présente une sensibilité notable. À l'inverse du camp de Matagami, les sulfures massifs sont ici les lithologies qui présentent les sensibilités les plus faibles; dans le cadre de ces deux contextes métallogéniques différents, les lithologies prédominantes pour l'un sont secondaires pour l'autre. Il est donc nécessaire d'élargir les conditions utilisées dans ce cas, K n'étant pas un paramètre pertinent à utiliser seul ici.

3.4 Prédiction de K et classification des lithologies

La dernière question qui est traitée est celle de la prédiction du signal de susceptibilité magnétique à partir de descriptions lithologiques. Une réponse est aussi apportée pour la question inverse : celle de la prédiction des lithologies à partir de K.

Une fois entraîné, il est possible d'utiliser l'auto-encodeur pour prédire un signal de susceptibilité magnétique à partir des forages où les descriptions lithologiques sont disponibles. Puisque les diverses couches lithologiques ont été reliées à des tendances, des moyennes, des cassures de K, nous pouvons appliquer une coupe géologique (contenant des unités connues par l'auto-encodeur) en entrée de la phase de reconstruction de l'auto-encodeur afin que ce dernier produise une courbe représentant le signal de susceptibilité magnétique prédit pour la coupe.

La distribution statistique trouvée par l'auto-encodeur permet ainsi de générer des données artificielles et de les comparer à des données observées (Figure 10). Le processus étant stochastique, chaque réalisation s'avère légèrement différente. Bien que le résultat ne soit pas parfait, l'erreur relative des réalisations se situe en moyenne autour de 15%. On note aussi que des résultats moyennés sur un grand nombre de réalisations produisent un signal plus lisse, où seules les variations principales sont visibles (Figure 10).

Il est donc possible de prédire un signal de susceptibilité magnétique à partir des lithologies. Deux types de réalisations sont à la disponibilité de l'utilisateur :

- 1) un signal plus réaliste, bien que bruité (p. ex. une seule réalisation),
- 2) un signal moins réaliste, mais où le bruit est éliminé (p. ex. la moyenne de plusieurs réalisations).



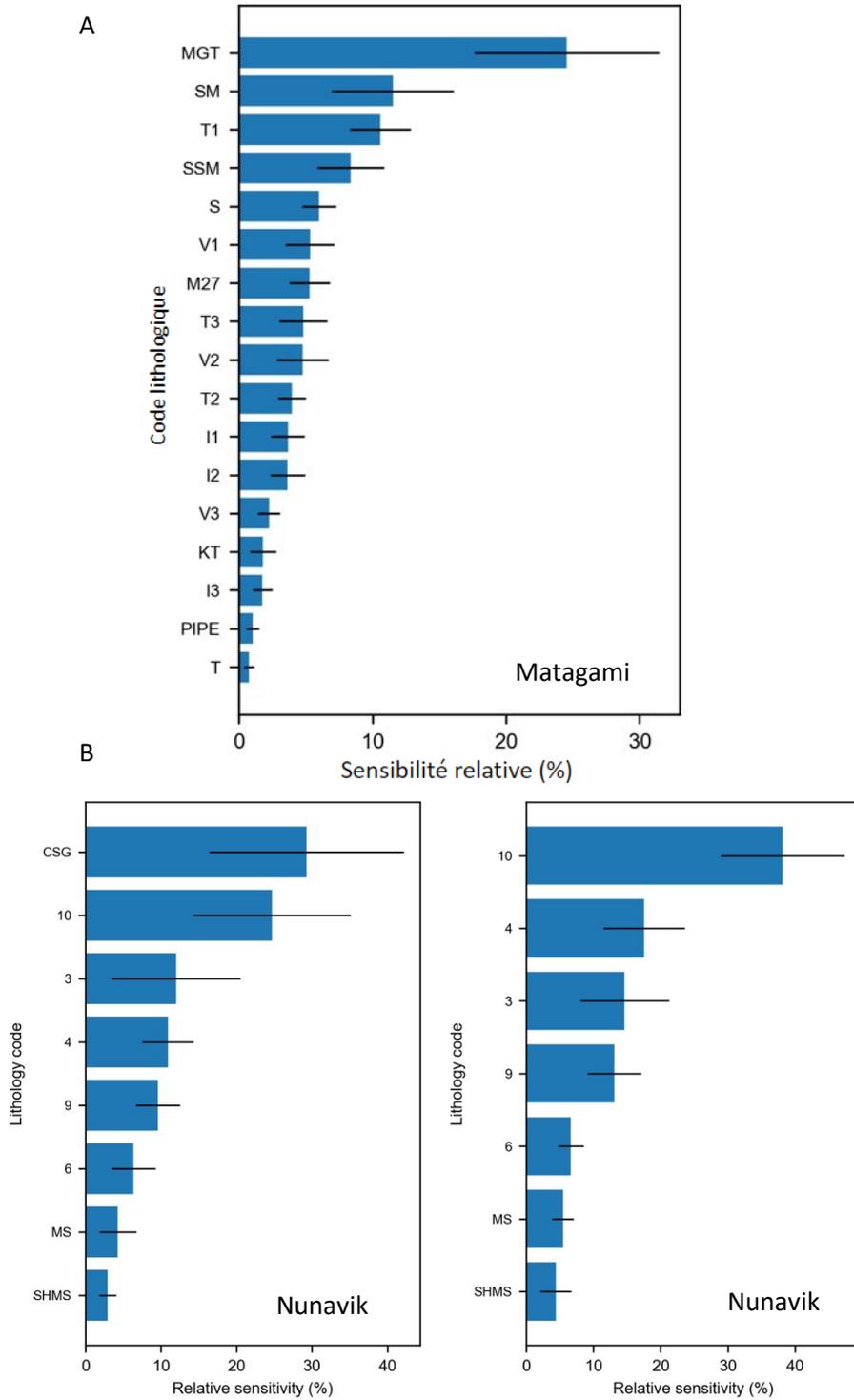


Figure 9. A) Sensibilité relative de la susceptibilité magnétique aux différentes lithologies observées dans le camp de Matagami; B) Sensibilité relative de la susceptibilité magnétique aux différentes lithologies observées au Nunavik à partir des données de Mine Raglan, en considérant le casing ou collet de forage (CSG) à gauche et sans le casing à droite.

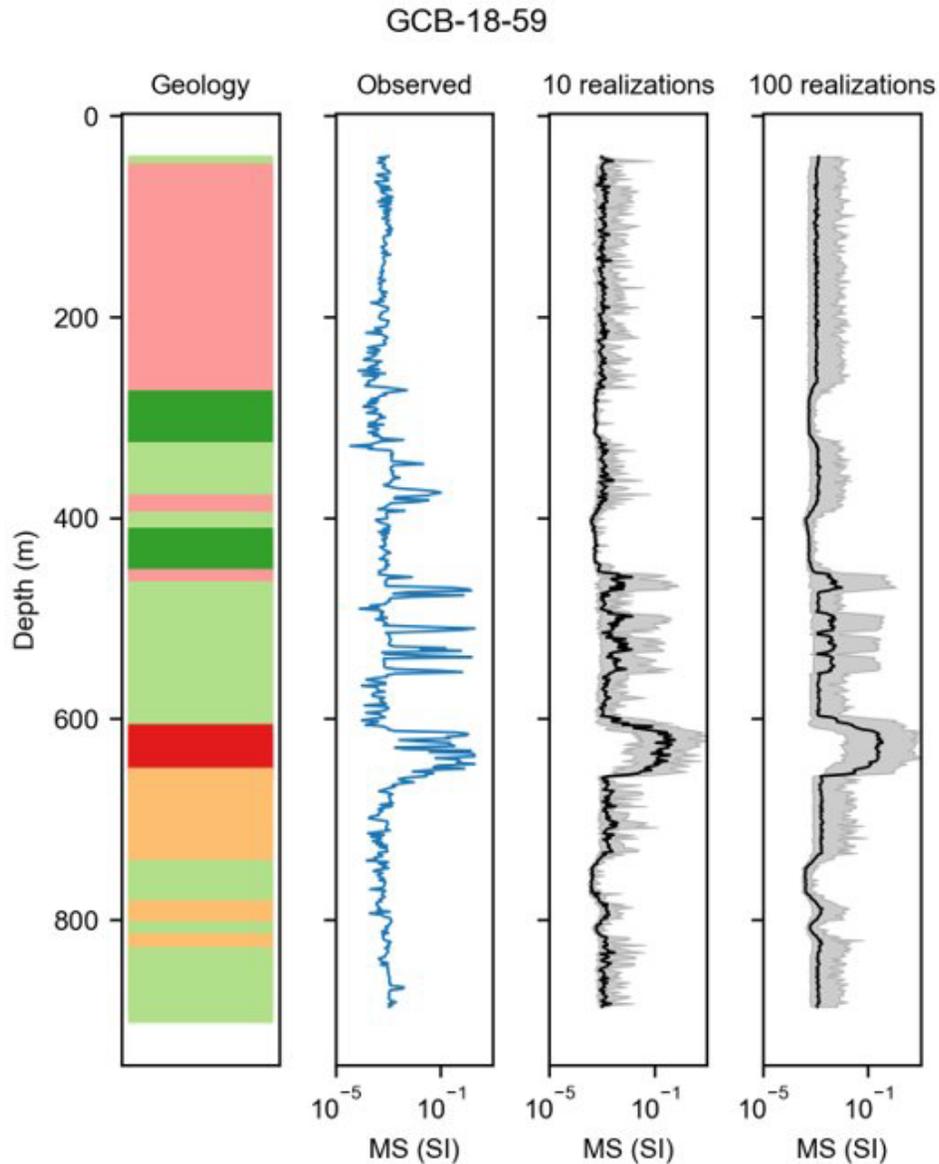


Figure 10. Modélisation conditionnelle de la susceptibilité d'après les descriptions lithologiques pour le forage GCB-18-59 (Matagami). De gauche à droite : la description lithologique; le signal de susceptibilité magnétique mesuré; la moyenne et l'écart-type de 10 réalisations du signal de susceptibilité magnétique prédit selon la lithologie; la moyenne et l'écart-type de 100 réalisations du signal prédit.

La prédiction de la susceptibilité magnétique à partir des lithologies aurait des applications importantes en modélisation géophysique. En effet, grâce à l'auto-encodeur entraîné, il serait possible de générer des modèles 3D de la susceptibilité magnétique des roches lorsqu'un modèle 3D de la lithologie est disponible. De plus, grâce à la nature stochastique de l'auto-encodeur, plusieurs réalisations d'un modèle peuvent être générées pour estimer son incertitude. Un tel modèle 3D de la susceptibilité magnétique servirait à interpréter et à simuler des données aéromagnétiques au meilleur des connaissances à propos des lithologies observées dans une région donnée.

Prédire les lithologies à partir du seul signal de susceptibilité magnétique s'avère être une tâche plus difficile, voire non applicable en pratique. En effet, les lithologies ont des gammes de susceptibilité qui se chevauchent (Figure 1), d'autant plus que pour des besoins méthodologiques, les lithologies ont été simplifiées, ce qui augmente la variabilité du signal au sein même d'une seule lithologie (p. ex. les roches felsiques I1). Comme montré à la Figure 11, seules les volcanites mafiques, les tuffites felsiques, les roches intrusives mafiques et les sulfures massifs sont à peine dissociables tandis que le reste des lithologies sont indissociables du point de vue de la susceptibilité.

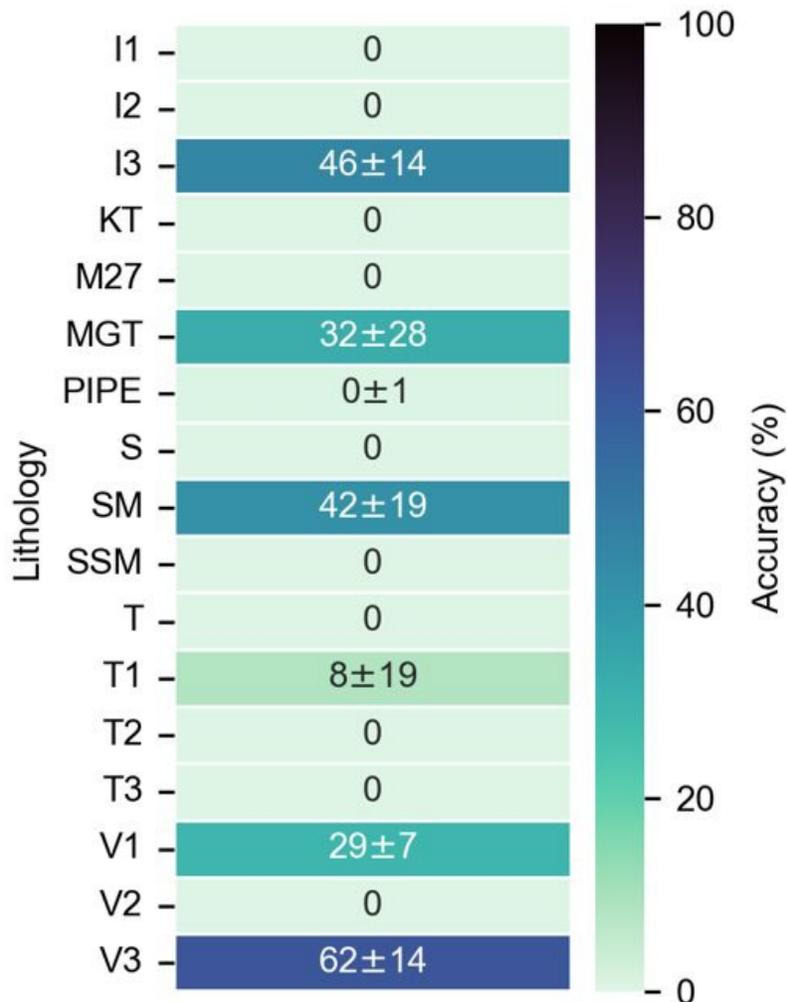


Figure 11. Scores d'exactitude pour la classification des lithologies à partir du signal de susceptibilité magnétique dans le camp de Matagami.

4. Amélioration des normes LithoModeleur

L'objectif de ce volet est de contraindre les options de calcul sur le fer grâce à la susceptibilité magnétique et d'améliorer les estimations des proportions calculées de magnétite et de sulfures par la norme CIPW et La CONSONORM BasGrade.

4.1 Intégration de K

Pour l'intégration de la variable K dans LithoModeleur, nous sommes repartis des travaux d'Enkin *et al.*, (2020). Ils ont établi un modèle minéralogique quantitatif à partir de la base de données des caractéristiques pétrophysiques des roches au Canada (Canadian Rock Physical Property Database, CRPPD). Ce modèle se base essentiellement sur les données de susceptibilité et de la densité des roches. Il va impliquer 3 composantes: 1) la composante QFC (quartz-feldspath-calcite), qui représente la famille des minéraux diamagnétiques; 2) les minéraux ferromagnésiens FM qui sont les silicates de la famille paramagnétique, et 3) M pour la magnétite représentant la famille ferromagnétique.

À partir de ces trois composantes, ils proposent 3 équations à 3 inconnues impliquant la minéralogie, la densité (d) des roches et leur susceptibilité (s). Le modèle permet ainsi d'estimer les proportions de minéraux à partir de la densité et de la susceptibilité (Figure 12). Ils démontrent dans leurs travaux que ce modèle est compatible avec le calcul de la norme CIPW des roches ignées à partir des analyses lithogéochimiques.

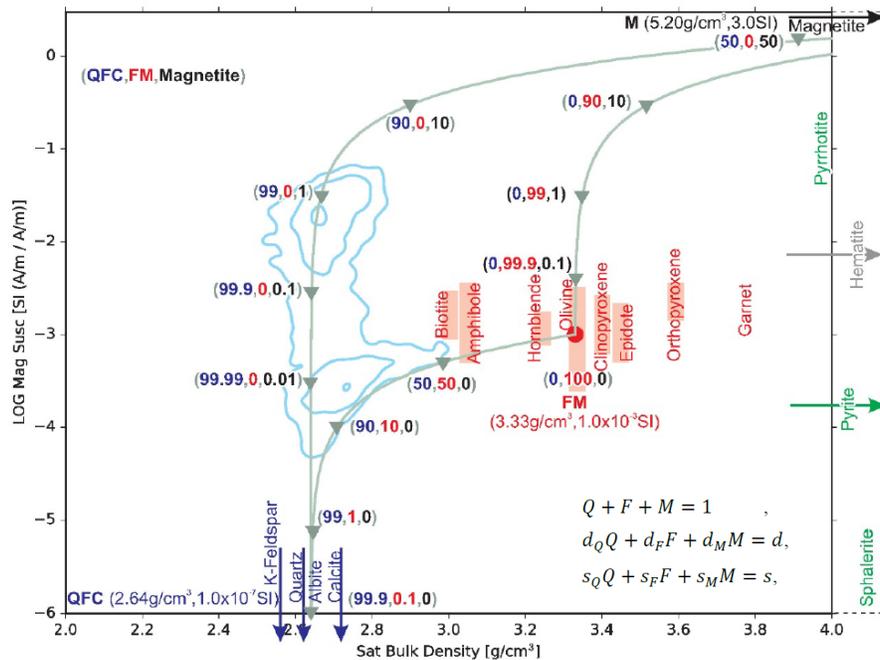


Figure 12. Modèle minéralogique quantitatif basé sur LOG K (SI) et la densité des roches, élaboré par Enkin *et al.*, (2020) à partir de la CRPPD (Enkin, 2018).

Ces travaux sont en parfait accord avec l'objectif à atteindre. C'est la raison pour laquelle nous sommes repartis de leur système d'équations pour améliorer les calculs normatifs. Ainsi, le système d'équations a été intégré à la nouvelle version de LithoModeleur 4.3.0. Le détail des cycles de calculs de la norme modifiée pour intégrer la susceptibilité magnétique est illustré en Annexe 1.

La nouvelle interface de configuration des données est illustrée en Figure 13A, et concerne l'étape 5 *autres données chimiques (isotopes, etc.)*. Il est nécessaire de formater les données en entrée avec une colonne dédiée aux valeurs de susceptibilité en unité SI. Cette colonne pourra être ajoutée à partir du menu déroulant disponible. Il est également possible d'y ajouter des mesures

de densités mesurées en parallèle. Les valeurs de K doivent être entrées en format numérique en unité SI. Il est également important de faire attention aux appareils de mesures utilisés (p. ex. KT-10, KT-20, SM-30), et de ne pas mélanger les données entre elles.

Pour la CONSONORM BasGrade, la nouveauté concerne le calcul du fer 3 où il est possible désormais de choisir l'option de calcul par susceptibilité magnétique (Figure 13B). Le choix du contexte redox est important à sélectionner, réduit ou oxydé. Il va évidemment influencer les estimations Fer 2+ et Fer 3+. Dans l'option « réduit », le fer restant après la formation de la magnétite est en Fe 2+, alors que dans l'option « oxydé », le fer restant sera en Fe 3+. Le modèle oxydé tend ainsi à former beaucoup d'hématite aux dépens des silicates ferromagnésiens. Par défaut le contexte réduit est sélectionné; ce modèle est le plus approprié pour la grande majorité des roches. À noter que la valeur de K pour la pyrrhotite est un paramètre modifiable, la valeur de 0,45 SI est attribuée par défaut à partir du travail réalisé sur la base de données géochimiques et pétrographiques d'Exploration Midland.

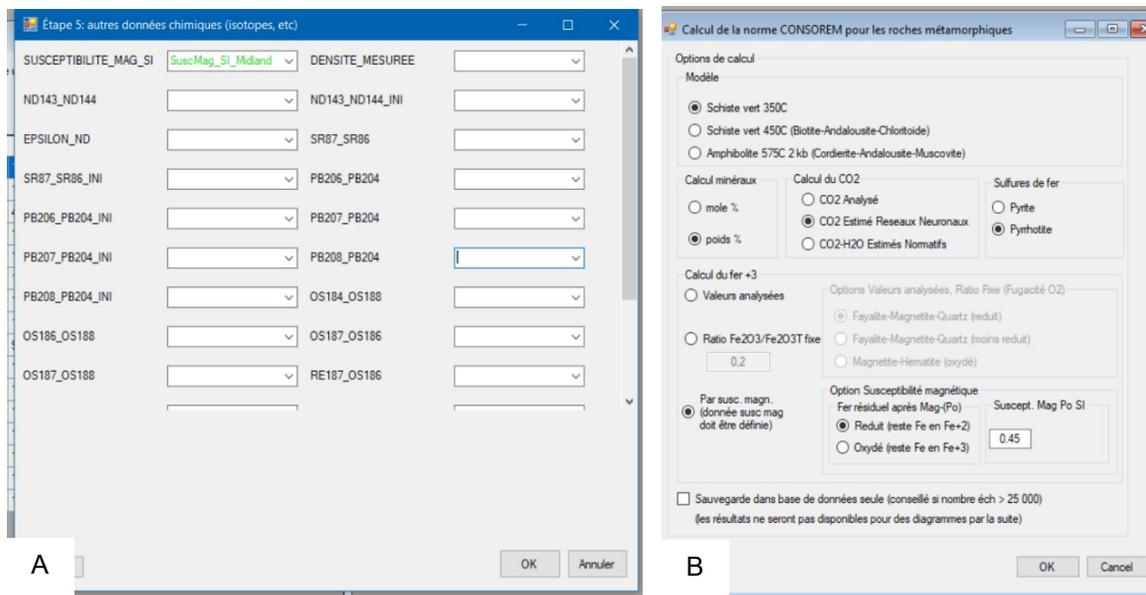


Figure 13 : A) nouvelle interface à l'étape 5 de configuration des données dans LithoModeleur 4.3.0; B) nouvelle interface de calcul du fer 3 dans la CONSONORM BasGrade.

L'intégration des équations d'Enkin *et al.*, (2020) dans LithoModeleur a été validée à partir du diagramme binaire illustré en Figure 14. L'excellente corrélation entre les proportions empiriques de magnétite et celles estimées par la norme SV350 démontre la validité et la fiabilité du travail effectué. La distribution des données de Glencore valide également les calculs de la norme au SV350 (Figure 15).

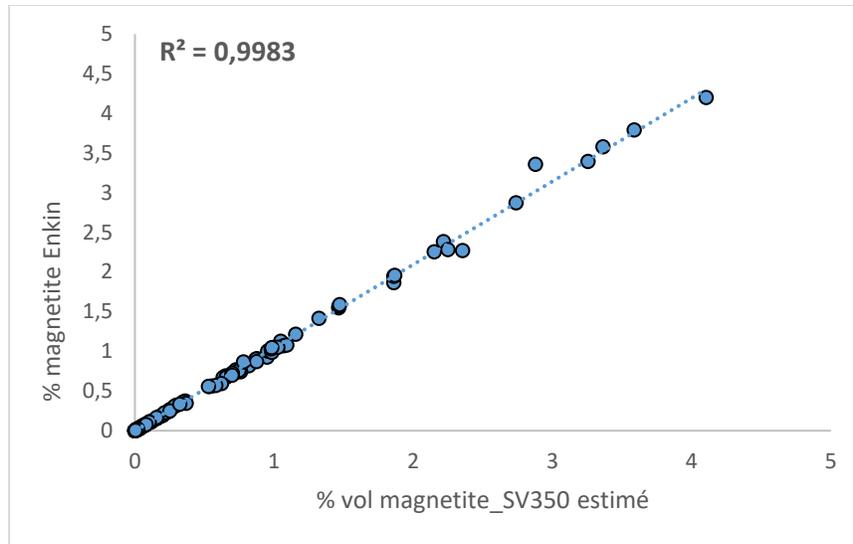


Figure 14. Diagramme binaire des % de magnétite empiriques calculés à partir de l'équation d'Enkin et al., (2020) en ordonnée en fonction des % volumiques de magnétite estimés par la CONSONORM BasGrade SV350 après avoir intégré les équations dans LithoModeleur.

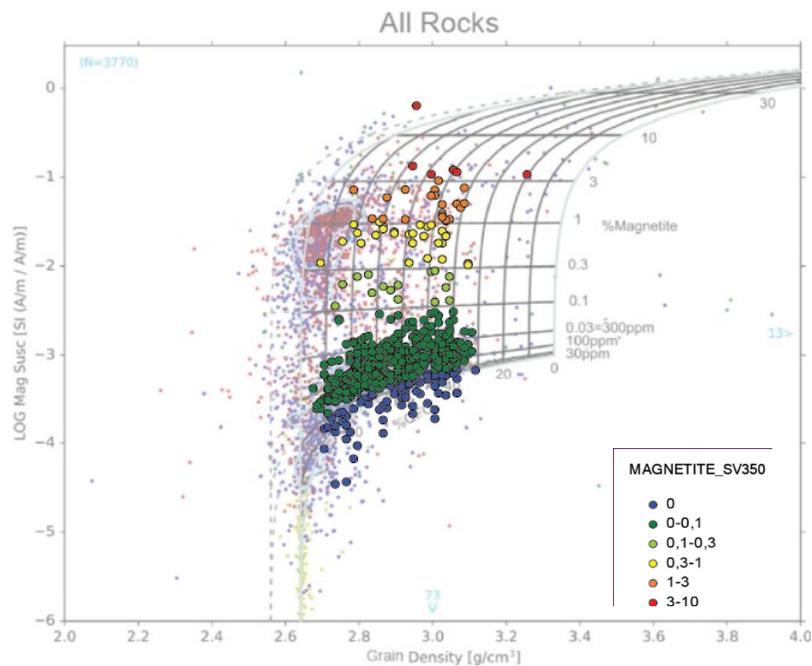


Figure 15. Distribution des données privées de Glencore (n=579) dans le diagramme d'Enkin et al., (2020). Les proportions de magnétite ont été converties en % volumique afin que cela soit cohérent avec les proportions de magnétite en arrière-plan calculées par Enkin et al., (2020) sur le diagramme.

Il est intéressant de voir qu'en omettant de considérer la susceptibilité en entrée pour contraindre le calcul des proportions de magnétite, les proportions sont systématiquement surestimées par la

norme SV350 (Figure 16). Les proportions atteignent jusqu'à 10 % pour un échantillon qui, une fois la susceptibilité considérée, en contiendrait autour de 3,5 % soit approximativement 3 fois moins. L'utilisation de la susceptibilité permet de se rapprocher d'une réalité géologique plus fiable en tenant compte de la propriété magnétique de la roche.

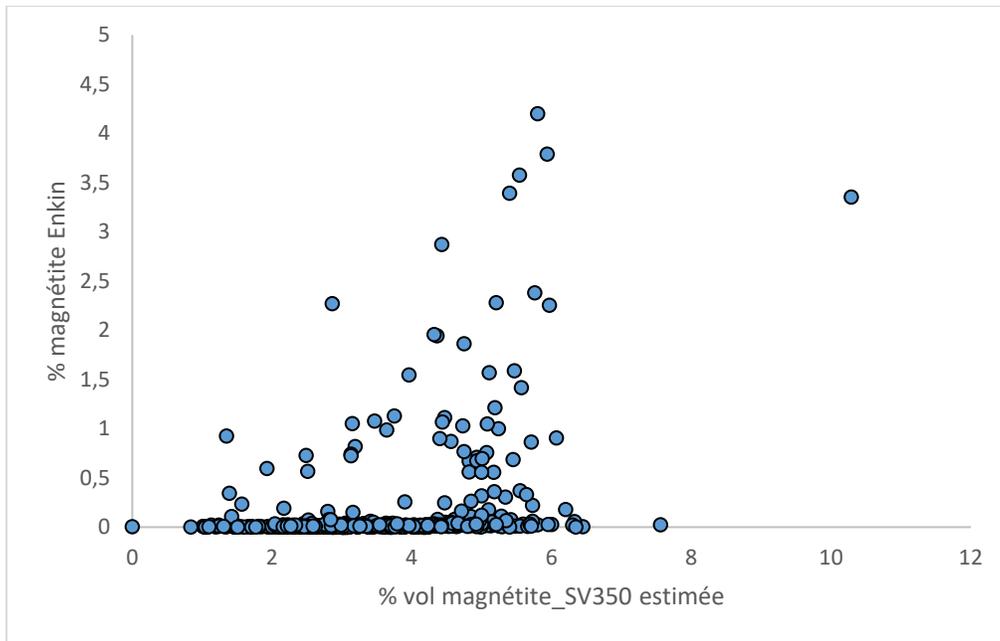


Figure 16. Diagramme binaire des % de magnétite empiriques calculés à partir de l'équation d'Enkin et al., (2020) en ordonnée en fonction des % volumiques de magnétite estimés par la CONSONORM BasGrade SV350 en utilisant l'option de calcul du ratio fixe Fe_2O_3/Fe_2O_3T .

Les modifications de calcul pour la norme CIPW sont basées sur le même système d'équations. La nouvelle interface est visible en Figure 17 ci-dessous. Les proportions estimées par la norme CIPW et celles obtenues par la CONSONORM BasGrade ont été comparées. Il existe une excellente correspondance entre les deux méthodes (Figure 18). Au-delà d'un certain faciès métamorphique (amphibolite et plus), les proportions pourraient différer dépendamment du type de roche et du contexte P-T de mise en place. Il existe d'ailleurs, dans certains cas, des différences entre les densités estimées par la norme CIPW et la CONSONORM BasGrade. Les densités peuvent être plus élevées en passant par la CIPW. Une des raisons est que les proportions de silicates ferromagnésiens assez denses sont calculées par la CIPW. L'autre explication est que les sulfures sont considérés comme absents de la roche si l'analyse en soufre n'est pas disponible pour estimer leurs proportions dans la CONSONORM BasGrade. La densité finale estimée de la roche sera donc moindre sans les sulfures et les silicates ferromagnésiens estimés.

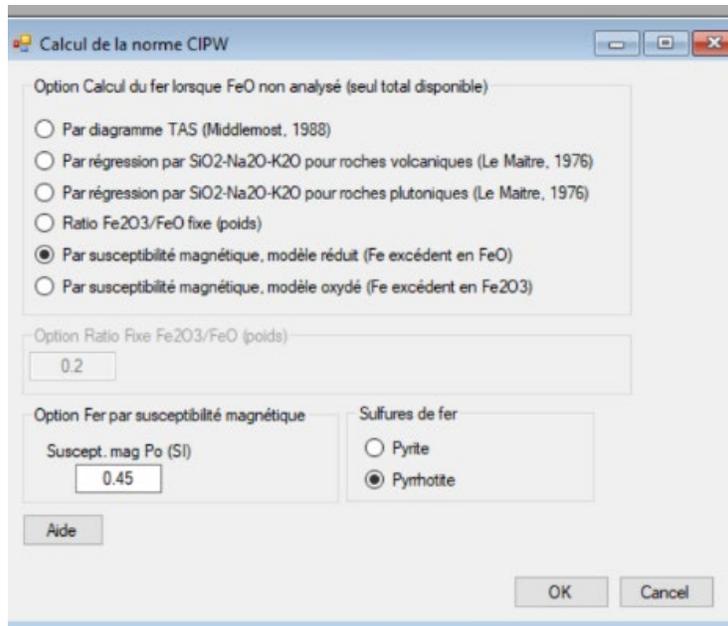


Figure 17. Nouvelle interface de calcul pour la norme CIPW intégrant la susceptibilité magnétique dans LithoModeleur 4.3.0.

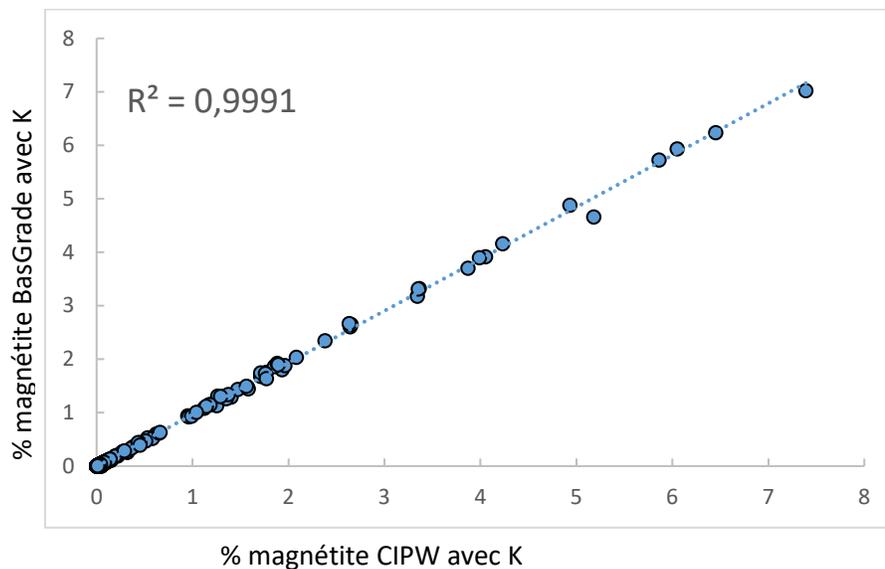


Figure 18. Diagramme binaire mettant en relation les % de magnétite estimés par la CONSONORM BasGrade et ceux estimés par la CIPW, en intégrant la variable K dans les deux méthodes

Le diagramme de Henkel (1976) utilisé par Enkin *et al.*, (2020) a été intégré dans LithoModeleur 4.3.0. Il est disponible parmi les diagrammes prédéfinis en 5 versions en fonction des données utilisées en entrée (densité mesurée, CIPW, SV350, SV450, SV575). Il est très utile pour visualiser la distribution d'une base de données par rapport aux grandes tendances ferromagnétiques et paramagnétiques et aux proportions théoriques de magnétite (% vol.). Une base de données de référence des moyennes de susceptibilité magnétique et de densité a également été ajoutée pour les principaux minéraux (Telford *et al.*, 1990; Hunt *et al.*, 1995; Hrouda *et al.*, 2009) et les roches archéennes d'Abitibi (Eshaghi *et al.*, 2019). Il est possible d'importer directement ces données dans

le diagramme de Henkel (1976) et ainsi comparer leurs signatures avec celles d'une base de données publique ou privée (Figure 19).

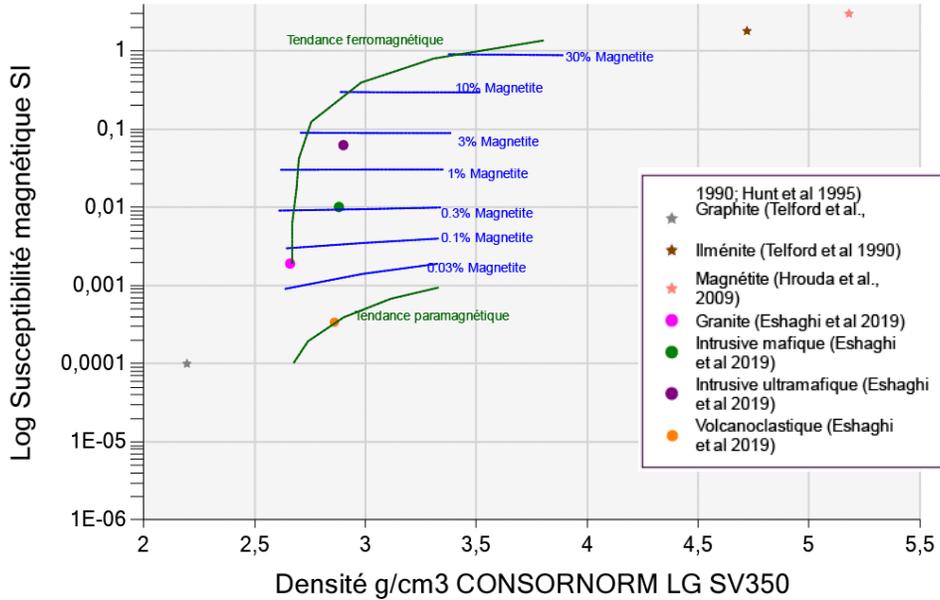


Figure 19. Diagramme de Henkel (1976) dans LithoModeleur 4.3.0 et exemple de signature moyenne K-d de minéraux et de roches archéennes en Abitibi.

4.2 Intégration de la pyrrhotite et du soufre

L'intégration de la pyrrhotite et du soufre a été réalisée à partir du système d'équations d'Enkin *et al.*, (2020). Ce système a été transformé en un système à 4 équations 4 inconnues, la quatrième composante étant noté P pour la pyrrhotite, comme illustré ci-dessous. La nouvelle variable qui s'ajoute à la susceptibilité (s) et la densité (d) est notée (sf) et correspond au poids de soufre dans la pyrrhotite. L'exemple ci-dessous montre le système d'équations pour une valeur de susceptibilité magnétique de la pyrrhotite à 0,14 SI. Les coefficients de la dernière colonne de la matrice seront différents si l'on utilise une valeur de susceptibilité magnétique différente pour la pyrrhotite. Par défaut une valeur de susceptibilité de 0,45 est utilisée pour la pyrrhotite dans LithoModeleur.

~~Système à 3 équations, 3 inconnues~~ ➔ **Système à 4 équations, 4 inconnues**

$$\begin{array}{l}
 \cancel{Q + F + M = 1, \quad [eq. 3]} \\
 \cancel{d_Q Q + d_F F + d_M M = d, \quad [eq. 4]} \\
 \cancel{s_Q Q + s_F F + s_M M = s, \quad [eq. 5]}
 \end{array}
 \quad \left\{ \begin{array}{l}
 Q + F + M + P \\
 d_Q Q + d_F F + d_M M + d_{sf} P \\
 s_Q Q + s_F F + s_M M + s_{sf} P \\
 sf_Q Q + sf_F F + sf_M M + sf_P P
 \end{array} \right.$$

$$\begin{pmatrix} Q \\ F \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.8295 & -1.4506 & 0.90450 & 1,03143430 \\ -3.8308 & 1.4511 & -1.2382 & -1,59892539 \\ 1,2768 \cdot 10^{-3} & -4,8364 \cdot 10^{-4} & 0.33375 & -0,02722026 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ d \\ s \end{pmatrix}$$

$$(P) = (\quad 0 \quad \quad 0 \quad \quad 0 \quad \quad 0,59471135) \quad (sf)$$

(P) = pyrrhotite

(sf) = poids de soufre en g par cm³ de roche ou de minéral

d_{pyrrhotite} = 4,61 g/cm³



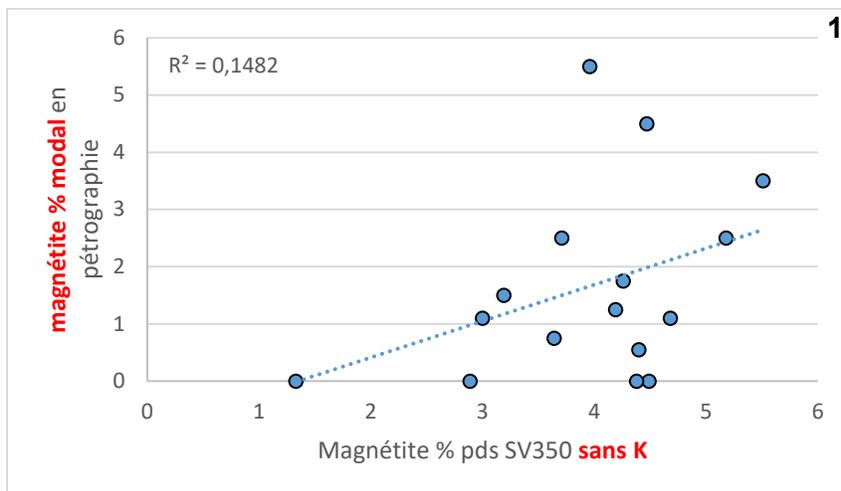
Grâce à ces modifications, le calcul des proportions de pyrrhotite est désormais possible à partir de la CONSONORM BasGrade. Une application a été réalisée à partir de la base de données géochimique et pétrographique d'Exploration Midland-BHP. Parmi l'ensemble des échantillons analysés, 16 d'entre eux contenaient de la pyrrhotite dont 12 avec de la magnétite également.

À partir de ces échantillons sélectionnés, une comparaison a été faite entre les estimations de magnétite calculées en fonction de 3 scénarios: 1) en ne considérant ni K ni le soufre comme variable d'entrée pour le calcul de la magnétite; 2) en considérant K mais sans le soufre pour le calcul de la pyrrhotite; et 3) en considérant K et le soufre afin d'estimer les proportions de pyrrhotite et de magnétite au sein d'un même échantillon. Ces trois cas sont illustrés à la Figure 20 sous la forme de diagramme binaire mettant en relation les proportions modales de magnétite observées en pétrographie et celles estimées par LithoModeleur au SV350 dépendamment des variables considérées ou non.

Une des premières remarques est que la corrélation entre les observations pétrographiques et les calculs est bien meilleure si on considère K et S dans le calcul (voir le cas 3). Il y a ainsi une meilleure cohérence entre la chimie et la réalité géologique.

Ensuite, le second scénario montre que les proportions de magnétite sont largement surestimées si la présence de pyrrhotite dans la roche n'est pas considérée. Le signal de K est alors uniquement attribué au seul minéral ferrimagnétique présent, la magnétite. En effet sans le soufre dans l'équation, le calcul de la norme considère l'absence de sulfure dans l'échantillon. Enfin, en considérant le calcul des proportions de la pyrrhotite dans le cas 3, un des échantillons qui contient le plus de magnétite en a environ 3 fois moins dans le cas 2.

Il est toujours très délicat de faire correspondre exactement les observations réalisées en pétrographie avec les quantifications des analyses lithogéochimiques. La lame représente seulement une partie de la roche, et la quantification visuelle est relativement subjective en fonction du géologue. Ce déphasage se voit très bien dans le cas 4 (Figure 20), avec les calculs des proportions de pyrrhotite estimées par la norme en fonction de la pétrographie. Il n'existe pas de correspondance. Lorsqu'une population de minéraux est suffisamment représentative sur une lame, l'abondance relative de surface est équivalente à l'abondance relative volumétrique. Dans notre cas, la quantification n'est pas assez précise pour réaliser la conversion d'unité surface (évalué à l'œil) à volumique à partir d'une seule lame par échantillon de roche. Malgré ce biais, il est désormais possible d'attribuer la signature de K à la présence de pyrrhotite dans certains échantillons et non exclusivement à la magnétite. Lorsque les deux minéraux ferrimagnétiques sont présents dans la roche, les proportions relatives entre la pyrrhotite et la magnétite peuvent être ainsi déterminées.



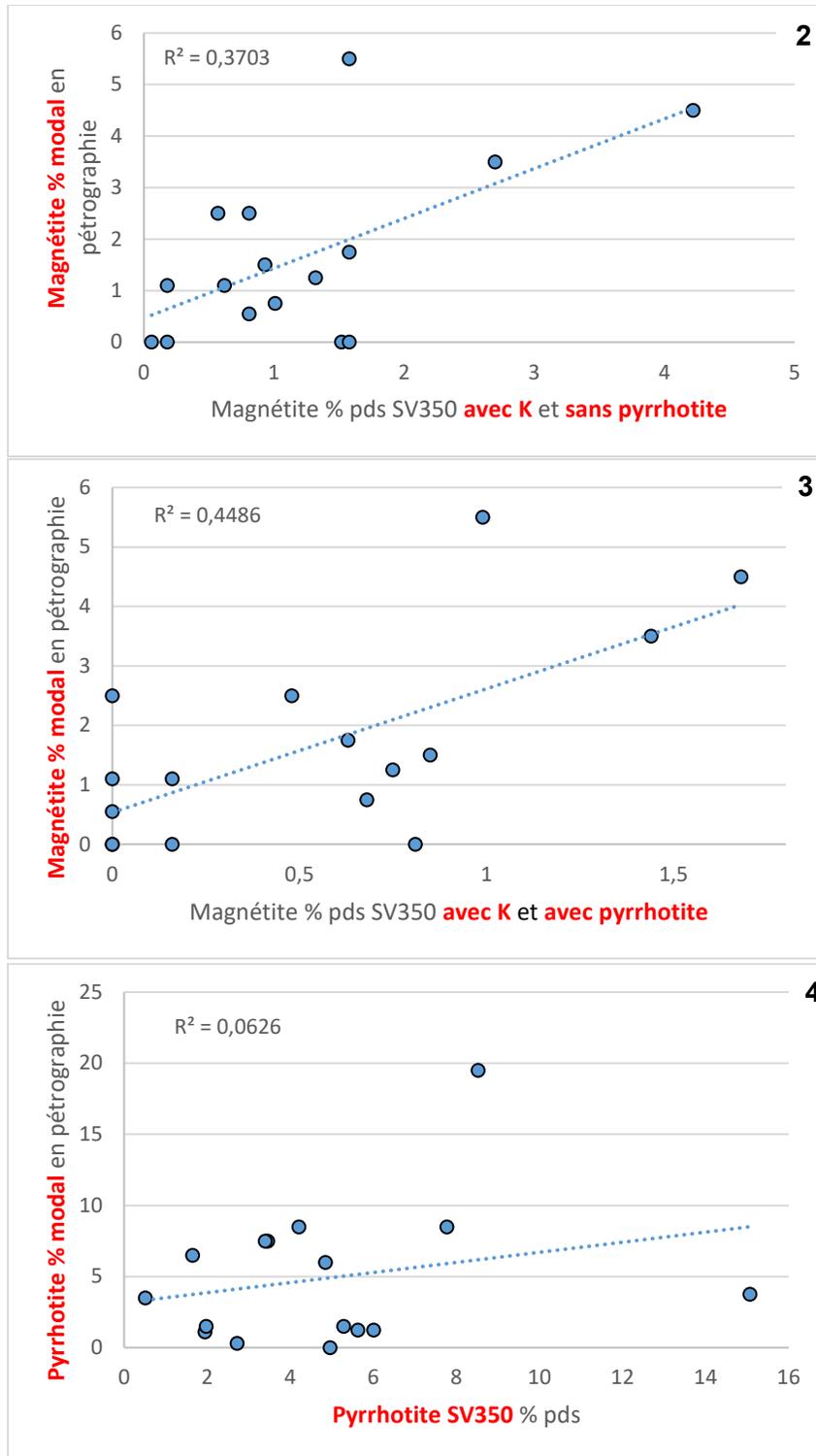


Figure 20. Comparaison entre les observations pétrographiques et les estimations normatives (SV350) de magnétite dans les échantillons protérozoïques à magnétite et sulfures (Nunavik, Exploration Midland-BHP). Cas 1 : estimations sans considérer la susceptibilité; Cas 2 : estimations en considérant la susceptibilité mais sans considérer les analyses de soufre, donc la présence de sulfure; Cas 3 : estimations en considérant la susceptibilité et les analyses de soufre; Cas 4 : estimations des proportions normatives de pyrrhotite comparées aux observations pétrographiques (% modal).

5. CONCLUSION

Ce projet a permis la réalisation de deux grands objectifs : 1) celui de valoriser les données de susceptibilités magnétiques en forage ou sur échantillon, et 2) celui d'améliorer deux outils de calculs normatifs dans LithoModeleur grâce aux propriétés magnétiques et géochimiques des roches. Un autre point crucial dans ce travail a été la validation des résultats grâce aux connaissances complémentaires du géologue et du géophysicien, un partenariat essentiel à ce projet collaboratif.

Un outil numérique basé sur les auto-encodeurs a été développé pour diverses applications (détection de coupure, résolution optimale des mesures, analyse de sensibilité et prédiction). Cet outil doit encore être finalisé lorsque les essais sur la détection des anomalies détaillés dans la section 3.1 seront complétés. Dès que l'auto-encodeur sera finalisé, le code et sa documentation seront publiés en *open access* sur la plateforme GitHub et l'adresse Web du projet sera transmise au CONSOREM. L'auto-encodeur pourrait ainsi être intégré à un logiciel de traitement des données de susceptibilité magnétique, ou encore sous la forme d'une extension Python GX dans le logiciel Oasis Montaj (Geosoft).

En parallèle, une estimation optimisée des proportions de magnétite et de pyrrhotite est possible grâce aux données de susceptibilité magnétique et d'analyse lithogéochimique du soufre. Ces calculs complexes sont désormais à la portée de tous, grâce à l'utilisation des outils normatifs améliorés dans la nouvelle version de LithoModeleur 4.3.0.

Une seconde phase du projet va être amorcée pour l'année 2022-2023 afin de renforcer et d'appliquer ce qui a été développé ici pour l'optimisation des inversions 3D en géophysique. Les résultats de ce projet ouvrent ainsi sur un potentiel de développement et d'innovation d'intérêt pour l'industrie minière.

6. REMERCIEMENTS

Valentin Peyrard reconnaît la contribution financière de l'Initiative géoscientifique ciblée de Ressources Naturelles Canada pour ses études de maîtrise via le projet « *Unlocking deep learning capabilities for mineral prospectivity mapping with novel geoscience data augmentation techniques* ».

Merci à Michel Allard et Jean Goutier pour leur contribution et les discussions constructives tout au long du projet. Et enfin merci à Valentin, Charles et Sylvain pour leur travail et leur implication dans la réalisation de ce projet.



7. RÉFÉRENCES

- Allard, M., Bois, M. (1999). La géophysique appliquée à l'exploration minérale. Publié par le Centre Collégial de Développement de Matériel Didactique (CCDMD), p352.
- Airo, M.L., Säävuori, H. (2013). Petrophysical characteristics of Finnish bedrock – Concise handbook on the physical parameters of bedrock. Geological Survey of Finland, Report of Investigation, 205, p. 33.
- Clark, D. A. (1997). Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, 17, 83-104.
- Dentith, M., Mudge, S.T. (2014). Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist. Cambridge University Press.
- Enkin, R.J., (2018). The Canadian Rock Physical Property Database: first public release. Geological Survey of Canada, Open File 8460, 68p.
- Enkin, R.J., Hamilton, T.S., Morris, W.A. (2020). The Henkel Petrophysical Plot: Mineralogy and lithology from physical properties. Geochemistry, geophysics, Geosystems, 21, 1, article id. e08818.
- Eshaghi, E., Smith, R.S., Ayer, J. (2019). Petrophysical characterisation (i.e., density and magnetic susceptibility) of major rock units within the Abitibi Greenstone Belt. Laurentian University Mineral Exploration Research Centre, MERC-ME-2019-144.
- Henkel, H. (1976). Studies of density and magnetics properties of rocks from northern Sweden. Pure and Applied Geophysics, 114, 235-249.
- Hinton, G. E., et Salakhutdinov, R. R. (2006). Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks. *Science* 313 (5786), 504-507.
- Hrouda, F., Chlupacova, M., Chadima, M. (2009). The use of magnetic susceptibility of rock in geological exploration. Rapport Terraplus, p. 27.
- Hunt, C.P., Moskowitz, B.M., Banerjee, S.K. (1995). Magnetic properties of rocks and Minerals. Rock Physics and Phase Relations : A handbook of physical constants, Vol. 3. American Geophysical Union, Washington DC, 189-204.
- Kingma, D.P., Welling, M. (2014). Auto-Encoding Variational Bayes. 2nd International Conference on Learning Representations, ICLR 2014, Banff, AB, Canada, April 14-16, 2014, Conference Track Proceedings.
- Kingma, D.P., Ba, J. (2014). Adam: a method for stochastic optimization. ArXiv preprint, 1414, 6980.
- Ross P-S., Bourke, A., Fresia, B., Debreil, J-A. (2012). Analyse mutliparamétrique à haute résolution de carottes de forage dans la région de Matagami 2010-2012. Rapport final, INRS, LAMROC, GM 66441, p128.
- Silva, J.B.C., Hohmann, G.W. (1984). Airborne magnetic susceptibility mapping. Exploration Geophysics, 15, 1-13.

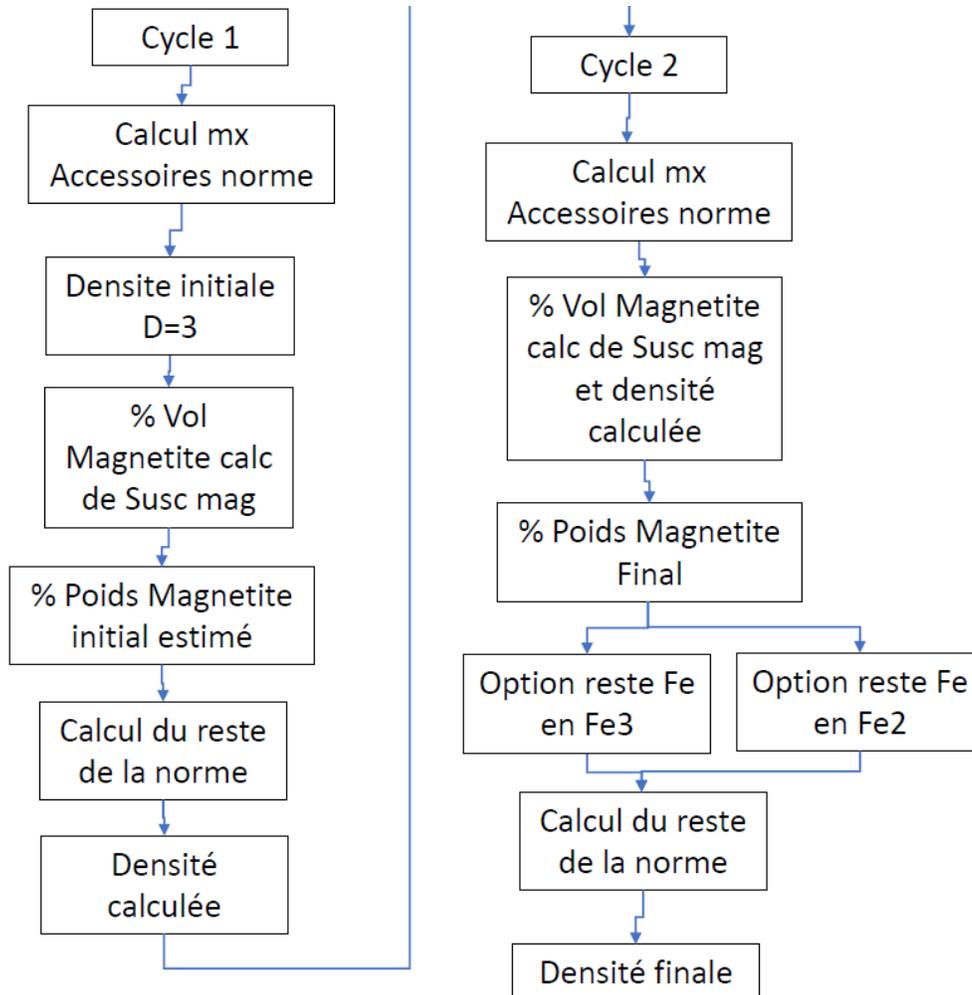


- Sohn, K., Honglak L., et Xinchun Y. (2015). Learning Structured Output Representation using Deep Conditional Generative Models. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 28.
- Slichter, L.B. (1929). Certain aspects of magnetic surveying. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 81, 238-260.
- Stearn, N.H. (1929). A background for the application of geomagnetics to exploration. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 81, 315-345.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics*. 2^e édition, p770.
- Zablocki, C.J. (1974). Magnetite assays from magnetic susceptibility measurements in taconite production blast holes, northern Minnesota. *Geophysics*, 39, 174-189.



ANNEXE 1

Détail schématique des cycles de calculs



Détail schématique des deux cycles de calculs réalisés pour arriver au % poids magnétite final et à la densité finale à partir de K et de la lithogéochimie. Le premier cycle va permettre de passer du % volumique au poids à partir de la densité (d) attribuée de façon arbitraire. En effet dans les équations de Enkin *et al.*, (2020), les quantités de magnétite sont en % volumique. Dans cet exemple nous avons considéré d=3 mais d'autres calculs ont été effectués en faisant varier la valeur de d (de 2,7 à 3,1) afin d'évaluer son influence sur le résultat final. Cette densité attribuée de façon arbitraire n'a aucune influence sur le calcul final.

La susceptibilité K est directement utilisée pour calculer les proportions de magnétite initiales estimées, puis la densité calculée. Cette même densité va être réutilisée dans le cycle 2 de calcul afin de refaire un calcul plus précis du % poids final de magnétite en fonction de l'état redox, si on attribue le reste du fer au Fer 3+ ou bien au Fer 2+.

Remarque : la conversion du poids en volume correspond approximativement à un facteur de 1,8 qui représente grosso modo la différence de densité entre la magnétite et la roche.

ANNEXE 2

Notes et remarques sur les protocoles de prise de mesure

Les compagnies utilisent généralement trois types d'appareils de mesure, le SM-30, le KT-10 et le KT-20. La plupart des mesures sont effectuées sur forages. Le MRNF utilise régulièrement le KT-10 sur affleurement.

Exemples d'utilisation documentés au cours du projet chez les membres du CONSOREM :

Exemple 1

Sur affleurement, protocole suggéré par le MRNF : les appareils sont sensibles et peuvent donner des valeurs variables s'ils sont mal utilisés. L'utilisation des standards ou blocs de référence permet de pratiquer la manipulation et la constance des prises de mesures.

La première étape consiste à trouver deux blocs de référence de susceptibilité magnétique : l'un de faible susceptibilité (5 à 25×10^{-3} SI) et l'autre de moyenne susceptibilité (50 à 80×10^{-3} SI). Ces blocs doivent être homogènes, aussi larges que l'appareil et d'une épaisseur d'au moins 3,5 cm. Une fois ces blocs trouvés, il est important de faire vingt mesures sur chacun des blocs et de faire la moyenne qui servira de valeur de référence. La différence entre les mesures pour le bloc de faible susceptibilité (5 à 25×10^{-3} SI) ne devrait pas dépasser $\pm 0,6$ et de $\pm 1,0$ pour le bloc de moyenne susceptibilité (50 à 80×10^{-3} SI). Par la suite, une série de trois mesures sur chaque bloc doit être effectuée au début de chaque série de mesures pour pratiquer la manipulation et vérifier la qualité de l'appareil. La moyenne de ces trois mesures est comparée à la valeur moyenne des blocs et ne devrait pas dépasser $\pm 0,6$ de différence (faible susceptibilité) et de $\pm 1,0$ (moyenne susceptibilité). Il est bon de pratiquer en prenant plus de mesures sur les blocs de référence pour développer une constance dans la manipulation. Par exemple avec un KT-10, on obtient des variations de -0,08 à 0,15 des mesures d'un bloc de référence à $26,2 \times 10^{-3}$ SI et de 0,3 à 0,7 des mesures d'un bloc de référence à $77,6 \times 10^{-3}$ SI.

L'endroit où l'on effectue les mesures peut avoir un impact sur les valeurs. La proximité de métal, d'un ordinateur ou de fils électriques est à éviter dans un rayon d'un mètre. La prise de mesure dans les airs permet de vérifier l'influence de ces éléments. Cette étape de trois mesures dans les airs doit être effectuée à chaque nouvelle série de mesures et devrait donner des valeurs de 0,000, -0,000 ou $0,001 \times 10^{-3}$ SI.

Avec un KT-10, il ne faut pas être près de l'échantillon pour commencer. On appuie et au premier son, on colle l'appareil sur la surface. Ensuite, on appuie sur le bouton lorsque le curseur noir arrive à la troisième barre noire. Attendre trop longtemps avant d'appuyer générera un message d'erreur. L'appareil ne donne pas de valeur plus grande que celle de l'échantillon. Si vous avez une valeur plus basse par rapport à vos autres mesures, alors simplement reprendre cette mesure.

Il est essentiel de bien connaître les caractéristiques de l'appareil et de sélectionner le bon mode de mesures (échantillon-affleurement ou carotte de forage). Idéalement, un minimum de trois mesures sur trois faces d'un échantillon (donc 9 mesures) devraient être prises. Sur un affleurement, une série de neuf mesures dans une portion de 2 m^2 à 4 m^2 permet de voir si la roche est homogène. Il n'est pas rare d'observer des variations importantes sur un affleurement dans une même lithologie. L'idée est d'obtenir une valeur moyenne en excluant les valeurs trop différentes, mais de le noter.



Exemple 2

Sur forage : le mode d'interpolation est utilisé (une mesure en l'air, puis une sur la carotte, puis une en l'air = lecture finale). La mesure finale est entrée dans Géotic Log, dans une colonne séparée pour chaque appareil. Il n'y a pas de calibration avec des standards; on utilisera plutôt des échantillons de roche de faible, moyenne et forte susceptibilité relative pour vérifier que les mesures sont pertinentes. Les appareils SM-30 et KT-10 donnent des mesures avec un même ordre de grandeur, mais semblent différer d'un facteur de ± 1.8 .

Exemple 3

Sur forage : utilisation d'un standard avant et après la prise de mesures avec le KT-10 et le KT-20 le long d'un même forage de 400 m au 1,5 m. L'expérience a montré que le KT-10 était beaucoup plus stable dans le temps au fil des prises de mesures, et que les valeurs obtenues sur le standard avant (moy. = $54,2 \pm 1,2$) et après la mesure (moy. = $55,3 \pm 0,5$) étaient très proches de la valeur de référence ($52,4 \cdot 10^{-3}$ SI). Le KT-20 a montré une grande variabilité dans les mesures et les écarts-types par rapport au standard (moy. = $64,7 \pm 14,8$ et $85,9 \pm 10,4$ SI). Une des précautions à avoir est de s'assurer que le technicien soit bien formé à utiliser le KT-20 et de réaliser des tests en amont avant la première utilisation. Le KT-20 possède plusieurs paramètres (mode affleurement, NQ, BQ, PQ, etc.), et il est nécessaire de bien le paramétrer à la forme de l'échantillon (p. ex. passer d'un échantillon à une carotte sciée ou non). Le KT-10 a une vis en son centre qui aide à cibler la zone à analyser et les techniciens sont très familiers avec cet appareil.

Exemple 4

Protocole préconisé par Christian Dupuis (Université Laval) pour optimiser la prise de mesure

- 1) Délimiter un espace de 30 cm par 30 cm sur une épaisseur minimum de 3 cm
- 2) Avoir une surface avec aucun objet magnétique qui pourrait influencer la mesure.
Exemple : ordinateur, échantillons, etc. IMPORTANT : Vérifier en dessous de la zone.
- 3) La surface doit être plane
- 4) Dessiner une croix au centre de l'emplacement
- 5) Allumer l'instrument de mesure : prendre des mesures dans les airs jusqu'à ce que trois mesures de suite aient une valeur de 0.0 ± 0.2 SI
- 6) Pointer le capteur vers le plafond
- 7) Garder la même position entre les mesures
- 8) Installer la pastille (standard ou pastille de plâtre) au centre du périmètre, sur la croix (Figure 21)



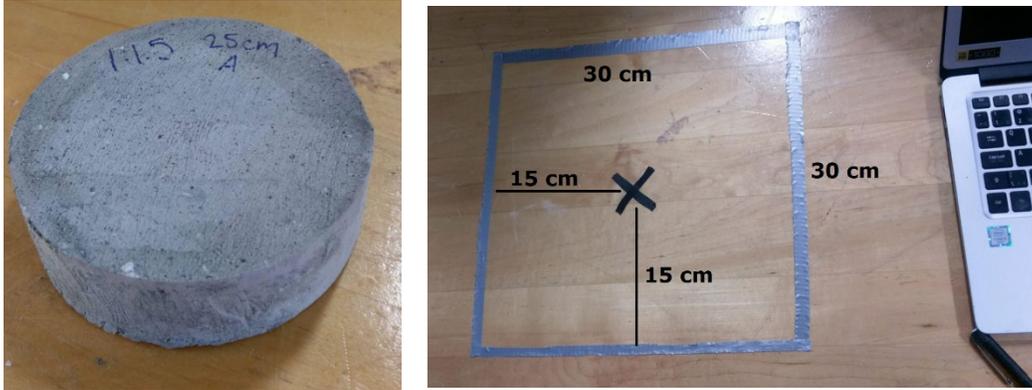


Figure 21. À gauche, un exemple d'une pastille de plâtre utilisée et à droite, espace idéal délimité pour la prise de mesure sur échantillon isolé.

- 9) Mesurer la susceptibilité magnétique sur la pastille : prendre un minimum de 6 mesures et ne pas considérer la première mesure
- 10) S'assurer que les valeurs de susceptibilité magnétique mesurées ont une variation de ± 0.6 SI au maximum. Si les valeurs ont une plus grande variation : 1) agrandir le périmètre en éloignant les objets qui pourraient influencer le champ magnétique ou 2) changer d'emplacement

Astuce : mettre du ruban adhésif autour de l'emplacement délimité. Cela permet d'utiliser le même emplacement entre les différentes mesures.



Figure 22. À gauche, mauvaise surface pour la prise de mesure, à droite surface plane idéale pour le protocole de mesures.

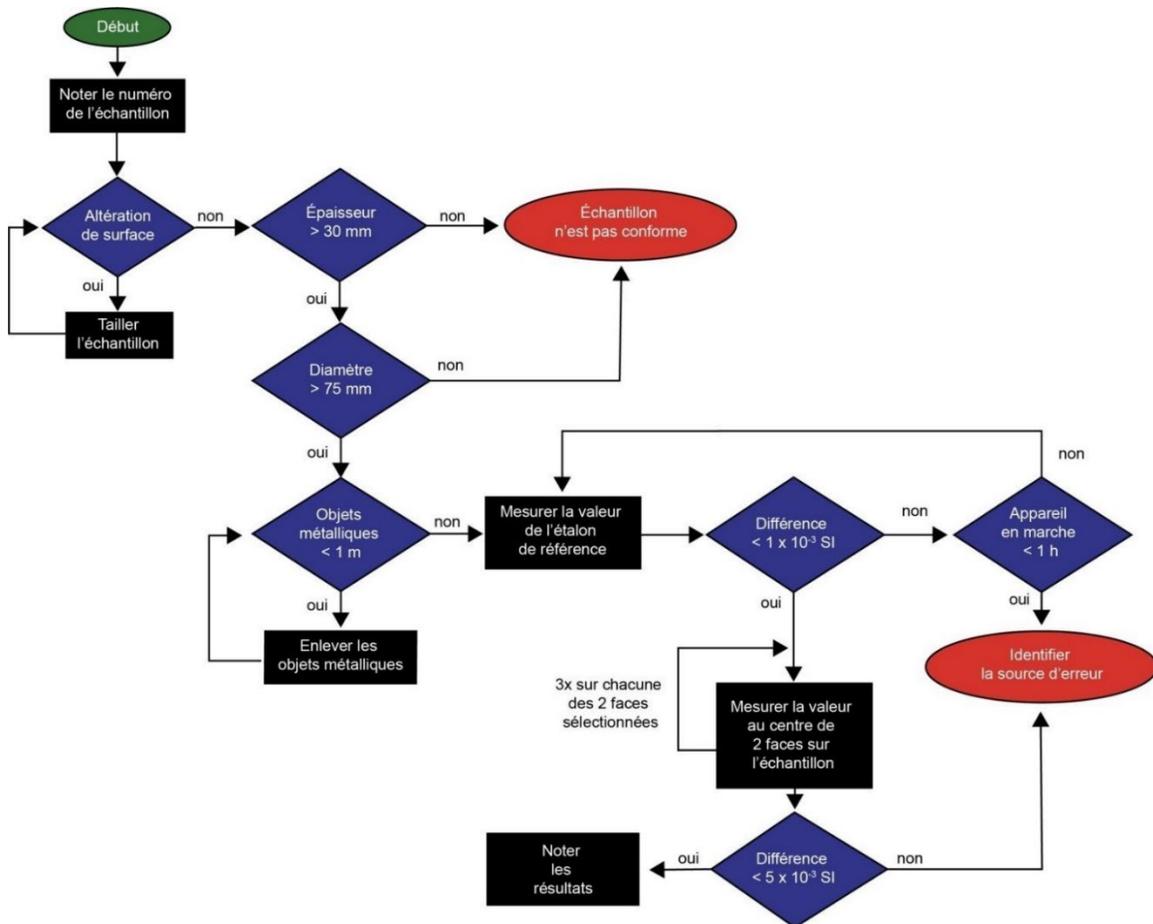


Figure 23. Synthèse du protocole de mesure de susceptibilité magnétique sur échantillon (Projet Lac Parent, 2019, par Christian Dupuis, Université Laval).

Conseils d'utilisation

Le KT-20 a des senseurs de différentes fréquences (10 MHz, 1000 MHz, etc.), il est donc nécessaire d'utiliser toujours la même fréquence si on souhaite comparer le niveau de susceptibilité d'un forage à un autre. De manière générale, les techniciens sont plus familiers avec le KT-10 et sa calibration. Le KT-20 est plus récent sur le marché, il est donc impératif de faire attention au paramètre d'entrée de la grosseur/forme du type d'échantillon que l'on souhaite mesurer. L'idéal est de vérifier la prise de mesure avec un standard dont on connaît la valeur de susceptibilité avant et après la mesure. La plupart des compagnies de service proposent l'option de deux standards de calibration à l'achat de l'appareil de mesure (p. ex. Terraplus, Geomatrix Earth Science, etc.).

Le niveau de sensibilité des appareils de mesures est généralement de 10^{-7} SI pour le KT-10 et jusqu'à 10^{-8} SI pour le KT-20.

Allard et Bois, 1999

Sur affleurements, le conseil est de prendre une dizaine de mesures dans un diamètre de 10 à 20 m pour obtenir une valeur représentative. Il faut éviter les zones où la foudre est tombée et ceux où la roche superficielle est très altérée. La médiane des valeurs est plus représentative que la moyenne.



Annexe 3

Analyse des valeurs de susceptibilité négatives

La première courbe (Figure 24) permet de visualiser l'intégralité des données en présence (soit près de 37 000 lignes de données), valeurs nulles et négatives comprises, afin d'observer la tendance de l'ensemble de données. Le graphique suivant (Figure 25) présente les histogrammes de compte des valeurs positives et « négatives » (valeurs aberrantes en dessous de la limite de détection qu'il s'agisse de valeurs nulles, négatives ou en dessous de 10^{-6}).

Au vu de la limite de détection des appareils, les valeurs nulles de susceptibilité magnétique sont ramenées à la limite de 10^{-6} . Enfin, le ratio observé grâce à l'histogramme (Figure 25) est immensément en faveur des valeurs positives; toutes les valeurs négatives sont considérées comme positives pour la suite des traitements et entraînements.

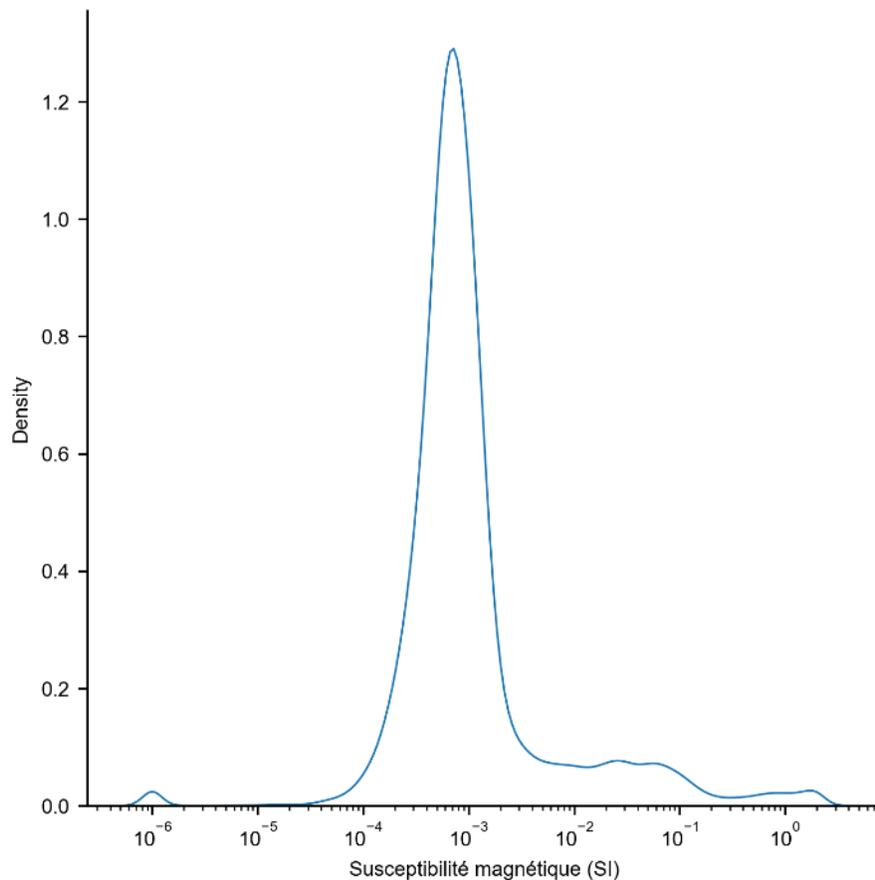


Figure 24. Courbes de densité des données de susceptibilité magnétique de la base de données Glencore.

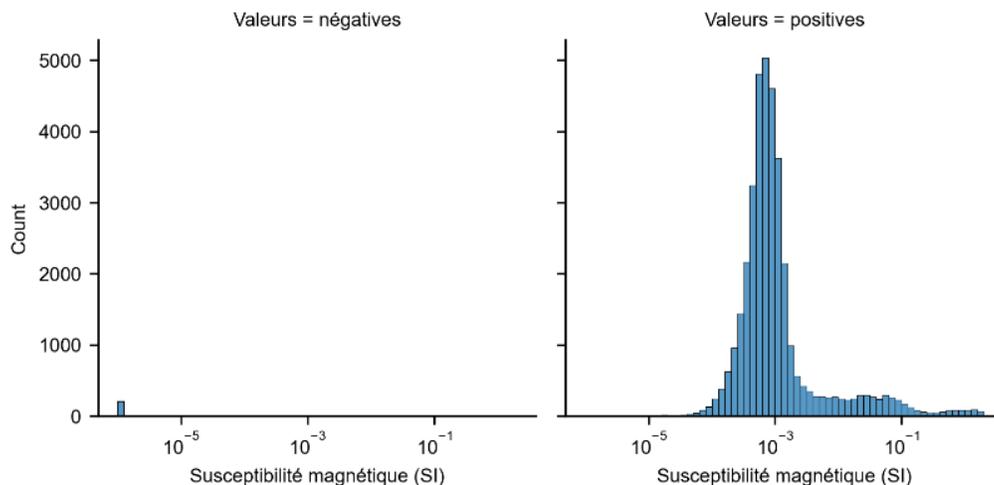


Figure 25. Histogramme des données de susceptibilité magnétique de la base de données Glencore.

Sur la Figure 26, la première courbe permet de visualiser l'intégralité des données en présence (soit plus d'un million de lignes de données), valeurs nulles et négatives comprises, afin d'observer la tendance de l'ensemble de données. Les deux graphiques suivants présentent respectivement les courbes de densité et les histogrammes de compte des valeurs négatives et positives (Figure 27 et Figure 28).

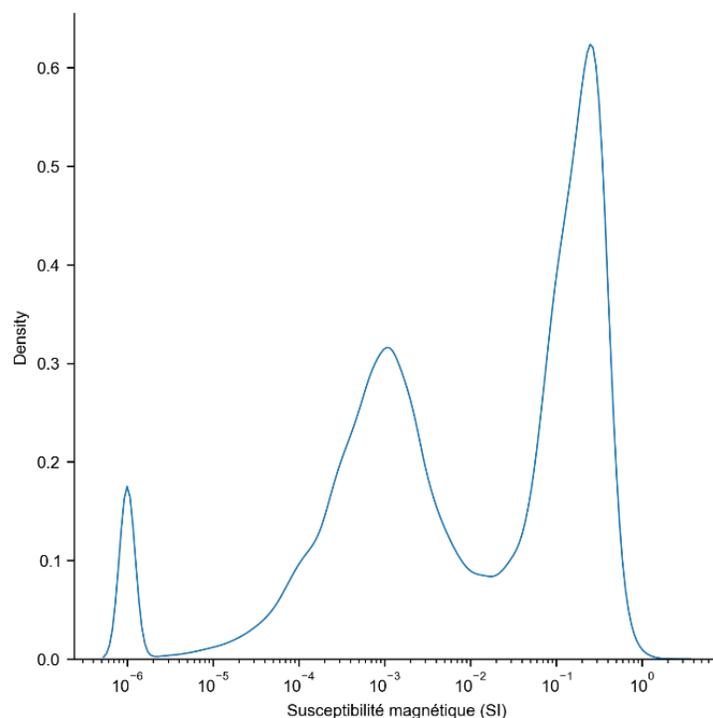


Figure 26. Courbe de densité des données de susceptibilité magnétique de la base de données Mine Raglan.

Au vu de la limite de détection des appareils, les valeurs nulles de susceptibilité magnétique sont ramenées à la limite de 10^{-6} . Cependant, les proportions de valeurs nulles et négatives vis-à-vis de celles positives sont plus importantes pour cette base de données. Un ratio d'une valeur aberrante pour quatre valeurs positives est observé; l'histogramme (Figure 28) souligne les similarités entre les distributions des valeurs positives et négatives, ce qui permet une fois de plus de considérer les valeurs négatives comme étant de mauvais signe mais des données pertinentes.

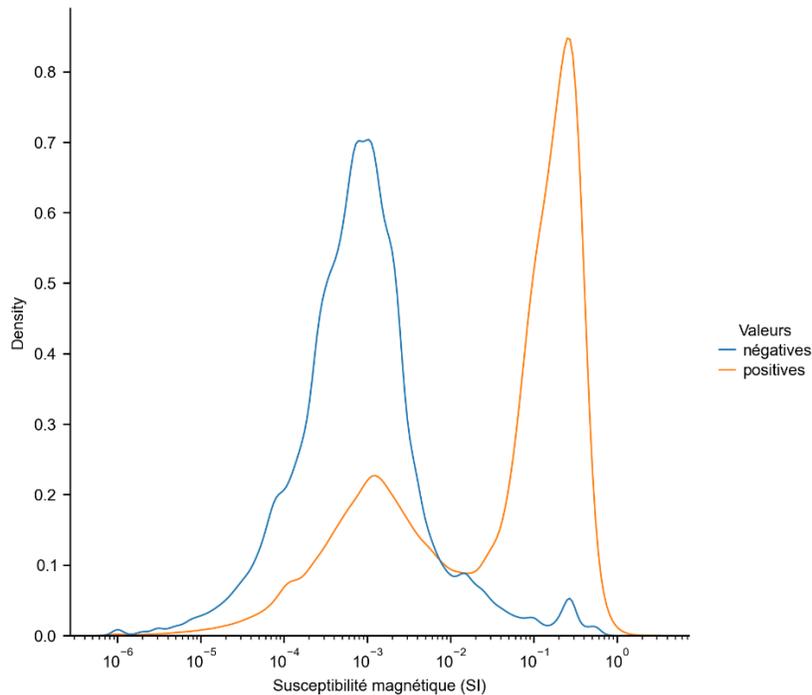


Figure 27. Courbes de densité des données positives et négatives (sans valeurs nulles) de susceptibilité magnétique de la base de données Mine Raglan.

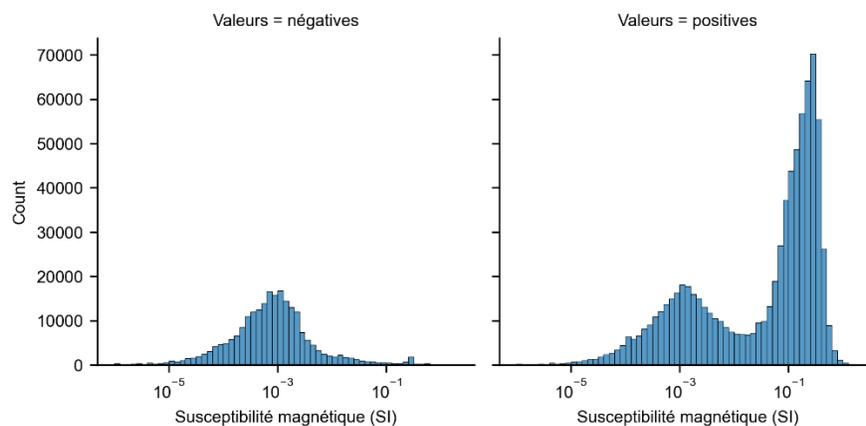


Figure 28. Histogramme des données de susceptibilité magnétique de la base de données Mine Raglan.

Annexe 4

Optimisation de l'auto-encodeur

La Figure 29 montre la courbe d'apprentissages de l'auto-encodeur lors de 100 époques d'entraînement utilisant la base de données de Glencore à Matagami. Cette courbe illustre la diminution progressive puis la stabilisation de l'erreur de reconstruction au fur et à mesure de la progression de l'entraînement du modèle.

Cette diminution reste l'objectif pour les courbes d'apprentissages de chaque base de données; elles sont de ce fait très semblables et présentent toutes une progression similaire de la fonction objective (loss) sur 100 époques d'entraînement.

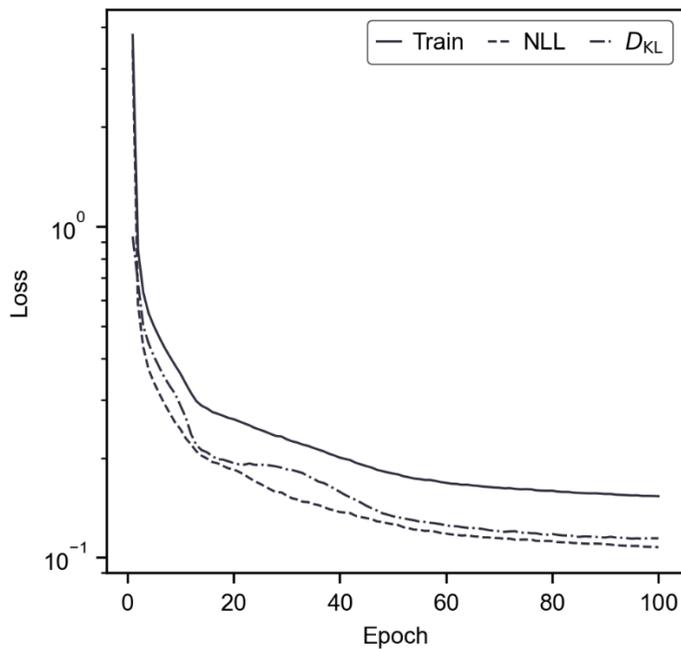


Figure 29 : Courbes d'apprentissage de l'auto-encodeur entraîné sur la base de données Glencore. Loss : fonction objective. Epoch : époques d'entraînement. Train : fonction objectif totale. NLL : Negative log-likelihood (erreur de reconstruction). D_{KL} : Divergence de Kullback-Leibler (terme de régularisation).