

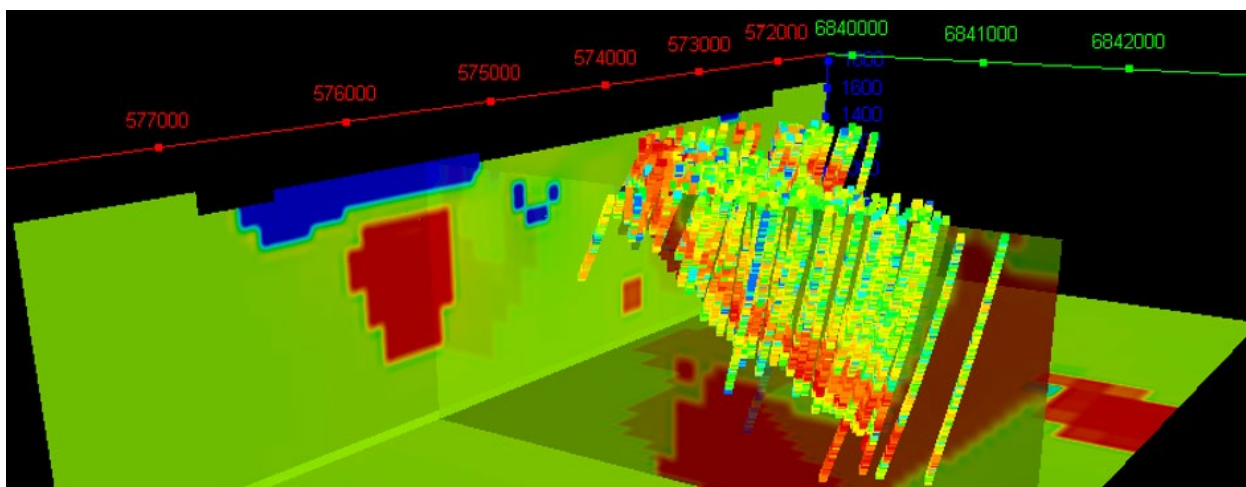
Valorisation des données de susceptibilité magnétique en exploration minérale – phase 2 : approche 3D

Morgane Gigoux, Ph. D.

Avec la collaboration de :

Charles L. Bérubé, Ph. D.

Francine Fallara, M. Sc. A.



Projet 2022-02

Avertissement

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minérale) rendus publics au 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 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., Bérubé, C., Fallara, F. 2023. Valorisation des données de susceptibilité magnétique en exploration minérale – phase 2. Rapport, Projet CONSOREM 2022-02, 22p.

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 de CONSOREM.



Université du Québec à Chicoutimi
555, boulevard de l'Université
Chicoutimi, QC, G7H 2B1
Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@ugac.ca

Site Web : www.consorem.ca



Résumé

Ce projet s'inscrit dans le cadre de la convention CONSOREM-MRNF pour le développement d'outils géotechnologiques pour l'exploration des métaux précieux, usuels et des minéraux critiques et stratégiques au Québec. Dans la première phase du projet (Gigoux *et al.*, 2022, projet CONSOREM 2021-02), 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 vérification 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. En parallèle, un second volet a été dédié à améliorer les estimations des proportions de magnétite et de pyrrhotite à partir d'analyses lithogéochimiques (roche totale) et du soufre dans LithoModeleur (Norme CIPW et CONSONORM BasGrade).

Cette seconde phase a permis de renforcer et de valoriser les outils développés précédemment pour l'optimisation des inversions 3D en géophysique. Pour atteindre les objectifs, plusieurs étapes ont dû être réalisées successivement : 1) bâtir un modèle lithologique de la zone d'étude ; 2) associer des valeurs de susceptibilité magnétique à chacune des cellules du modèle ; 3) simuler la carte de l'anomalie magnétique mesurée au-dessus du modèle géologique à partir du modèle de référence ; 4) procéder à la modélisation inverse sans aucune contrainte initiale ; 5) ajouter des contraintes globales puis augmenter progressivement la densité de contraintes ponctuelles ; 6) analyser l'impact des contraintes sur les solutions des inversions en comparant avec le modèle des étapes 1 et 2.

La zone 5-8 de Mine Raglan, dont les données ont été utilisées au cours du projet 2021-02, a été choisie pour cette seconde phase. La collaboration de Francine Fallara (Glencore) a permis de travailler à partir d'un modèle lithologique 3D simplifié de la zone d'étude (environ 12 millions de cellules et cinq unités lithologiques). Les étapes d'inversion géophysique ont été réalisées à partir du logiciel Geoscience ANALYST (Mira Geosciences) avec le module Pro Geophysics. Les résultats obtenus par Charles Bérubé, spécialisé dans les inversions de données magnétiques, démontrent l'utilité d'ajouter des contraintes ponctuelles pour diminuer de moitié l'erreur obtenue sur les inversions. Aussi, les différents tests d'inversion réalisés mettent en évidence que peu importe la densité de contraintes utilisées, la carte magnétique obtenue par inversion (contrainte ou non contrainte) est toujours similaire à la carte magnétique associée au modèle de référence, même si le modèle 3D de susceptibilité sous-jacent est complètement différent. Ce résultat souligne clairement les limites de la méthodologie inverse en géophysique, sa complexité et le danger des interprétations hâtives en profondeur en exploration minérale.



Table des matières

1-INTRODUCTION ET OBJECTIFS	5
2-SECTEUR D'ÉTUDE ET DONNÉES UTILISÉES	5
2.1 MODÉLISATION GÉO-INTÉGRÉE HYBRIDE-3D	7
3-LE PROBLÈME INVERSE	9
3.1 QU'EST-CE QU'UN PROBLÈME INVERSE ?	9
3.2 COMMENT RÉSOUDRE UN PROBLÈME INVERSE ?	10
4-VALORISATION DE K POUR L'OPTIMISATION DES INVERSIONS 3D	13
4.1 MÉTHODOLOGIE	13
4.2 INVERSIONS GÉOPHYSIQUES	13
4.3 RÉSULTATS - BÂTIR UN MODÈLE LITHOLOGIQUE 3D	13
4.4 RÉSULTATS - ASSOCIATION DES VALEURS DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE	14
4.5 RÉSULTATS - SIMULATION DE L'ANOMALIE MAGNÉTIQUE AU-DESSUS DE LA ZONE 5-8	15
4.6 RÉSULTATS - MAILLAGE POUR LA MODÉLISATION INVERSE	16
4.7 RÉSULTATS - INVERSION NON CONTRAINTÉ	16
4.8 RÉSULTATS - INVERSION AVEC CONTRAINTES GLOBALES	17
4.9 RÉSULTATS - INVERSION AVEC CONTRAINTES PONCTUELLES D'APRÈS LES FORAGES	18
4.10 RÉSULTATS - SOMMAIRE DES EXPÉRIENCES DE MODÉLISATION INVERSE	19
5-CONCLUSIONS	20
6-REMERCIEMENTS	21
7-RÉFÉRENCES	21



1-Introduction et objectifs

Pour donner suite au projet 2021-02 portant sur la valorisation des données de susceptibilité magnétique en exploration minérale, une seconde phase a été suggérée pour en étudier l'application dans les inversions géophysiques en trois dimensions (3D). Le but de cette phase du projet est d'utiliser et de valoriser la quantité de données ponctuelles de susceptibilité (K) en forages qui ont été compilées et accumulées depuis plusieurs années par les compagnies minières. Ces données sont très souvent sous-utilisées alors qu'elles pourraient être un apport non négligeable à l'optimisation d'une inversion géophysique et entraîner des répercussions sur les interprétations ultérieures. Ainsi, elles peuvent ultimement représenter un atout pour l'amélioration des interprétations géologiques d'un modèle géo-intégré.

En ce sens, les deux grands objectifs de ce projet sont : 1) de vulgariser et transférer les connaissances sur les méthodologies d'inversions et de familiariser les non-géophysiciens aux principes d'inversions géophysiques non contraintes et contraintes et 2) d'analyser l'impact de la densité de données de K (SI) et des types de contraintes sur les résultats des inversions. Ce travail a pour but également de formuler des mises en garde concernant l'utilisation des résultats d'inversions et de démontrer la complexité et l'ambiguïté de ces modélisations en exploration minérale.

Mais que cherche-t-on réellement en prenant la décision de réaliser une inversion ? Cette question fondamentale demeure souvent sans réponse au sein des compagnies n'ayant pas de spécialiste à l'interne. Est-ce l'estimation de la profondeur d'un corps minéralisé ? Est-ce le pendage d'une faille ? Est-ce l'estimation d'un volume ou d'une épaisseur ? Selon la question posée initialement, plusieurs approches mathématiques peuvent être privilégiées pour la réalisation des inversions. Ces approches seront synthétisées dans ce rapport (Section 3 – Le problème inverse). Aussi, il a été démontré que le type, la qualité et la densité des données utilisées en entrée ont un impact non négligeable sur les résultats d'une inversion. Il est nécessaire d'avoir un certain contrôle sur l'ensemble des paramètres et des approches impliqués dans la réalisation des inversions pour optimiser les solutions de l'inversion et les interprétations qui en découlent.

De manière plus générale, le projet 2021-02 (phase 1) a permis de faire le lien entre la géologie (lithologie) et les données pétrophysiques (susceptibilité magnétique). La phase 2 a quant à elle permis de faire un lien direct entre les données pétrophysiques et la géophysique. Les deux phases réunies font ainsi le pont entre la géologie et la géophysique, un lien indispensable à l'élaboration d'un modèle géo-intégré robuste pour guider l'exploration minérale.

2-Secteur d'étude et données utilisées

Afin de poursuivre le travail effectué dans la phase 1 (Gigoux *et al.*, 2022), la base de données de Mine Raglan (Glencore) totalisant plus de 1 million de données de K en continu en forage a été réutilisée. L'outil d'auto-encodeur, expliqué dans la phase 1 du projet, a été entraîné sur ces données associées à un contexte lithologique spécifique (présence de roches ultramafiques très susceptible) et métallogénique spécifique (Ni-Cu-EGP). Puisque ce projet nécessitait la participation active de ressources spécialisées, une collaboration a été initiée avec Francine Fallara (Glencore). Spécialisée dans les modélisations 3D et les inversions géophysiques, avec une excellente connaissance du secteur d'étude choisi, sa participation au projet a permis l'élaboration d'un modèle simplifié réaliste en accord avec les données géologiques intégrées.

La zone 5-8 de la portion centrale de la ceinture de Cape Smith a été choisie (Figure 1A). La zone est caractérisée par un complexe ultramafique intercalé avec des métasédiments riches en sulfures ou avec des gabbros qui est recouvert de basaltes (McKevitt *et al.*, 2021 ; Figure 1A et 2). Les roches ultramafiques ressortent très clairement sur le levé magnétique (Figure 1B, Osmond et



Watts, 2002). Le complexe ultramafique de la zone 5-8 a été nommé en fonction des indices historiques en surface 5 à 8. Les roches ultramafiques s'étendent sur 3 km de long, à environ 4 km à l'est du concentrateur de Kattiniq. Elles affleurent en surface sous forme de deux branches de roches ultramafiques distinctes composées des lentilles de la série 5 à l'ouest et des séries 7 et 8 à l'est. Le complexe plonge faiblement à fortement vers le nord et, selon l'interprétation la plus acceptée, semble se connecter en profondeur (> 800 mètres vertical) avec le complexe ultramafique de Kattiniq à l'ouest et celui de la zone 13-14 à l'est (Figure 1A).

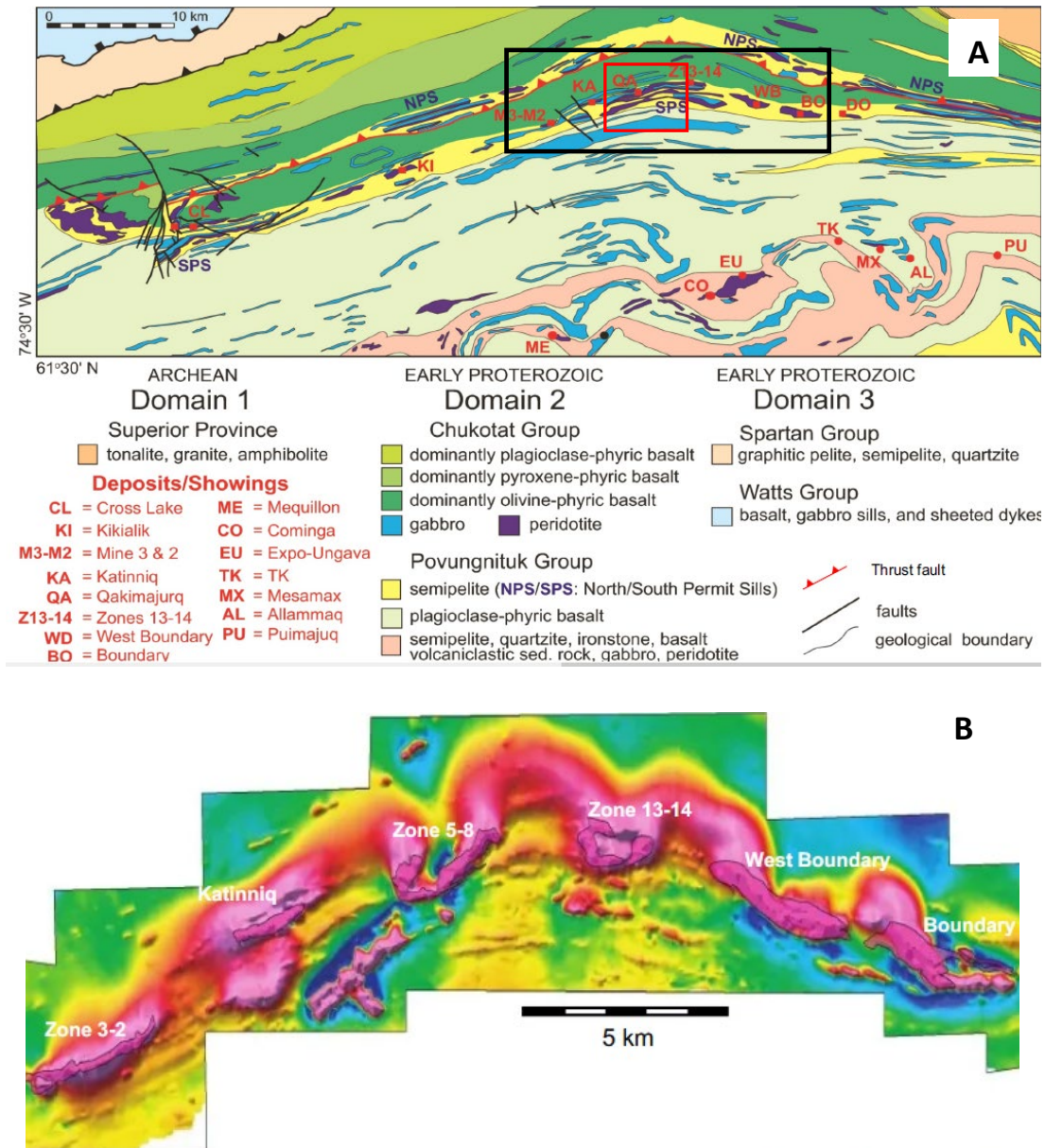


Figure 1. A) carte géologique détaillée du secteur d'étude (McKevitt *et al.*, 2021). Le rectangle rouge représente la zone 5-8 et le rectangle noir représente les limites du levé magnétique. B) carte magnétique de la portion centrale de la ceinture de Cape Smith (Osmond et Watts, 1999).

Les roches ultramafiques de la zone 5-8 ont une épaisseur variant de 200 à 400 mètres (mais localement dépassent les 800 mètres) et sont intercalées avec des métasédiments riches en



sulfures ou avec des gabbros et sont recouvertes de basalte (Figure 2). Les deux branches de roches ultramafiques sont formées de sous-unités d'épaisseurs variées de 10 à 100 mètres. Les sous-unités sont zonées de pyroxénite, pyroxénite à olivine à péridotite vers le centre. Dans une stratigraphie préservée, les contacts entre les sous-unités sont graduels sur une échelle centimétrique à décimétrique alors que les unités majeures présentent des contacts transgressifs, intrusifs ou structuraux.

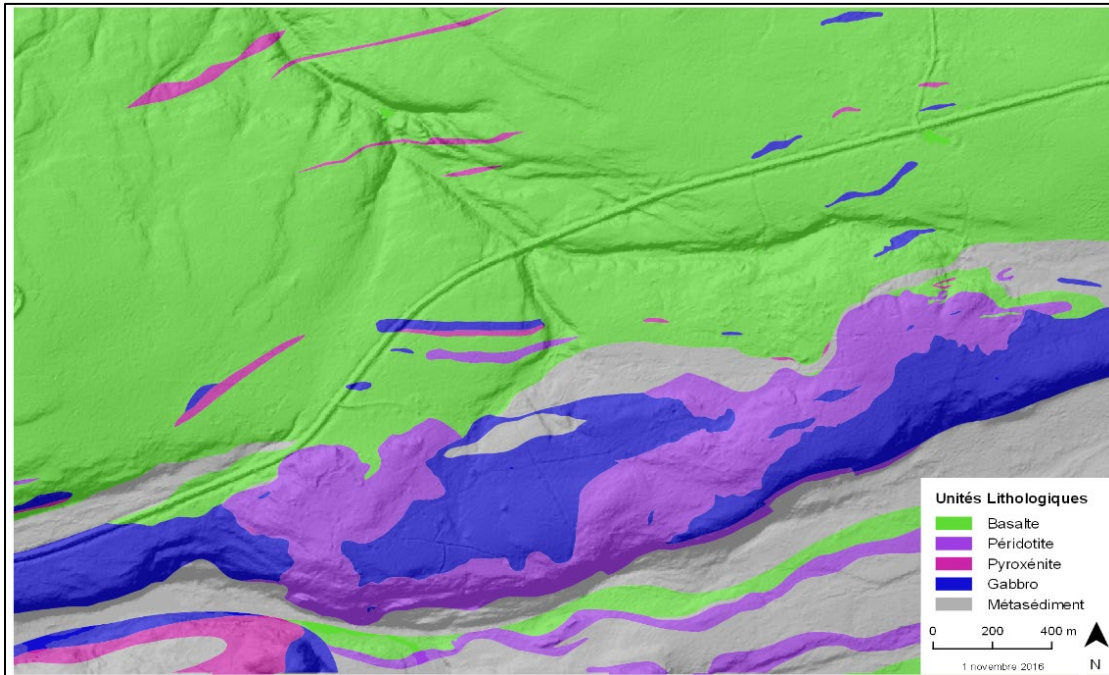


Figure 2. Vue en plan de la zone 5-8, illustrant la géologie en surface

La minéralisation de la zone 5-8 est divisée en 3 séries de lentilles distinctes soient 5, 7 et 8 :

- La série 5, située à l'ouest du complexe 5-8, est composée de lentilles de sulfures disséminés à texture en treillis avec une mince base de sulfures massifs. L'épaisseur des lentilles varie de 3 à 19 mètres avec un pourcentage en nickel variant d'environ 1,7% à 3%.
- Les lentilles de la série 7 (atypiques à la Mine Raglan) sont formées par injection de sulfures massifs dans les sédiments. La minéralisation de sulfures massifs anastomosés varie d'une épaisseur de 1 mètre en marge à plus de 15 mètres vers le centre des lentilles. Ces lentilles sont les plus riches de Mine Raglan et contiennent de 5% à 6,5% Ni.
- Les lentilles de la série 8 sont formées par déposition à la base des roches ultramafiques. Les lentilles sont composées de sulfures disséminés à textures en treillis avec une base de sulfures massifs. Le secteur 8 contient les plus larges lentilles de Mine Raglan variant de 3 à 51 mètres d'épaisseur avec un pourcentage en nickel variant d'environ 1,7% à 5,5%.

2.1 Modélisation géo-intégrée hybride-3D

La géologie des roches hôtes des gisements minéralisés de la zone 5-8 est le résultat d'une modélisation hybride-3D combinant la modélisation implicite et explicite. Dans le logiciel Leapfrog, la méthode hybride-3D est automatisée pour prioriser les données de forages (c.-à-d. la modélisation implicite) tout en intégrant les diverses données cartographiques comme guides (c.-à-d. modélisation explicite) pour les secteurs sans forages (Figure 3).

La modélisation hybride-3D utilise prioritairement les données de forages et les points de cartographie souterrains, en utilisant les autres données (lignes et points) uniquement comme guide. Cette méthode permet d'obtenir des contacts qui respectent les données d'observations tout en intégrant les données compilées pour produire des contacts plus lisses et réalistes sans créer d'artéfacts en forme de dents de scie.

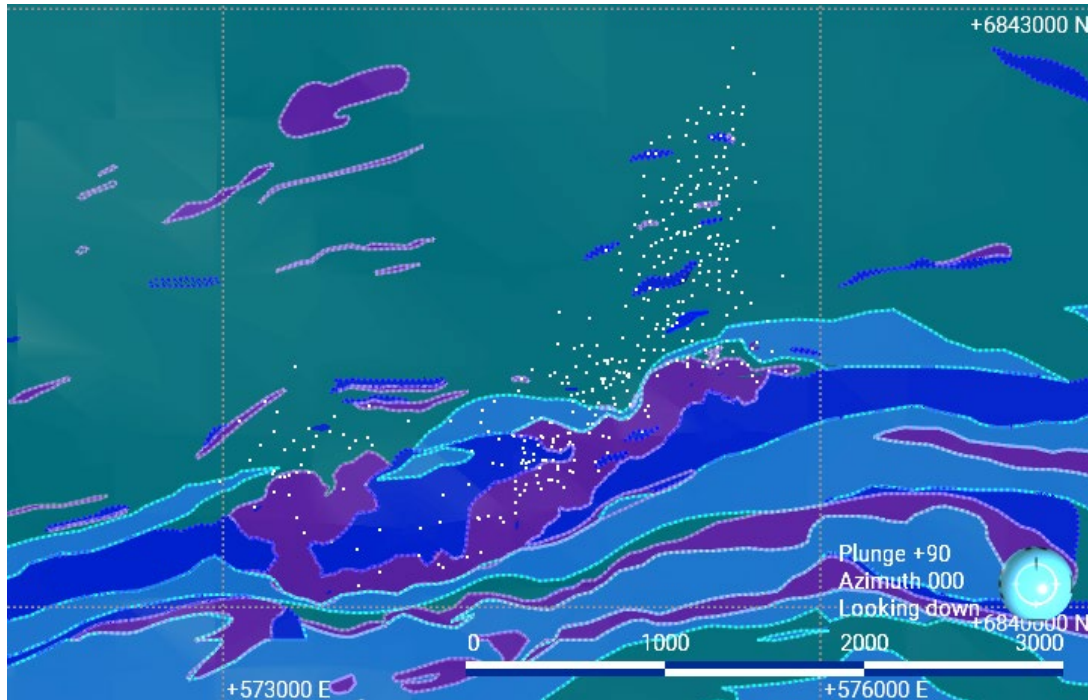


Figure 3. Vue en plan des contacts géologiques avec la distribution des forages (n = 388) pour la modélisation hybride-3D de la zone 5-8 (réalisée par F. Fallara).

Cette méthodologie harmonise les données de forages, les contacts lithologiques interprétés de surface (validés par la géophysique) et les données de cartographie souterraine. La plupart des données structurales planaires mesurées proviennent des données de surfaces cartographiées et de mesures structurales souterraines. De plus, des surfaces régionales provenant du modèle 3D de la CGS (De Kemp *et al.*, 2007) ont servi pour l'interpolation de données structurales estimées de Raglan. Ce modèle provient de l'interprétation structurale régionale basée sur les travaux de cartographie de la ceinture de Cape-Smith (St-Onge *et al.*, 2007) qui ont été effectués sur une dizaine de sections N-S et un longitudinale E-W.

Dans Leapfrog, les « *Form Interpolants* », des surfaces planaires interpolées, résultent d'une fonction qui estime les orientations d'un ensemble de données structurales ponctuelles (azimut et pendage). Celles-ci sont plus précises qu'une orientation structurale moyenne constante car elles reflètent de façon plus réaliste les grandes tendances structurales en 3D. Les « *Form Interpolants* » définissent à leur tour la tendance structurale. La tendance structurale est le meilleur outil pour « guider » un modèle géologique puisqu'il est créé dynamiquement à partir des « *Form Interpolants* » pour contrôler l'anisotropie (R1 et R2 des ellipses structurales) interpolant chaque domaine pour créer la tendance structurale.

Dans le logiciel GOCAD®, l'interpolation 3D des attributs dans les cellules du Voxet (grille volumétrique) de la zone 5-8 a été réalisée selon l'approche basée sur les données (*data-driven*) sans appliquer de biais (Figures 4 et 5). L'algorithme de distance inverse a été utilisé avec l'aide d'un ellipsoïde de recherche sphérique pour ne pas appliquer de biais. Plusieurs dimensions de 50

à 500 m ont été testées. La distance de 100 m a été retenue pour l'interpolation puisque c'est celle qui reflétait le mieux la distribution des données.

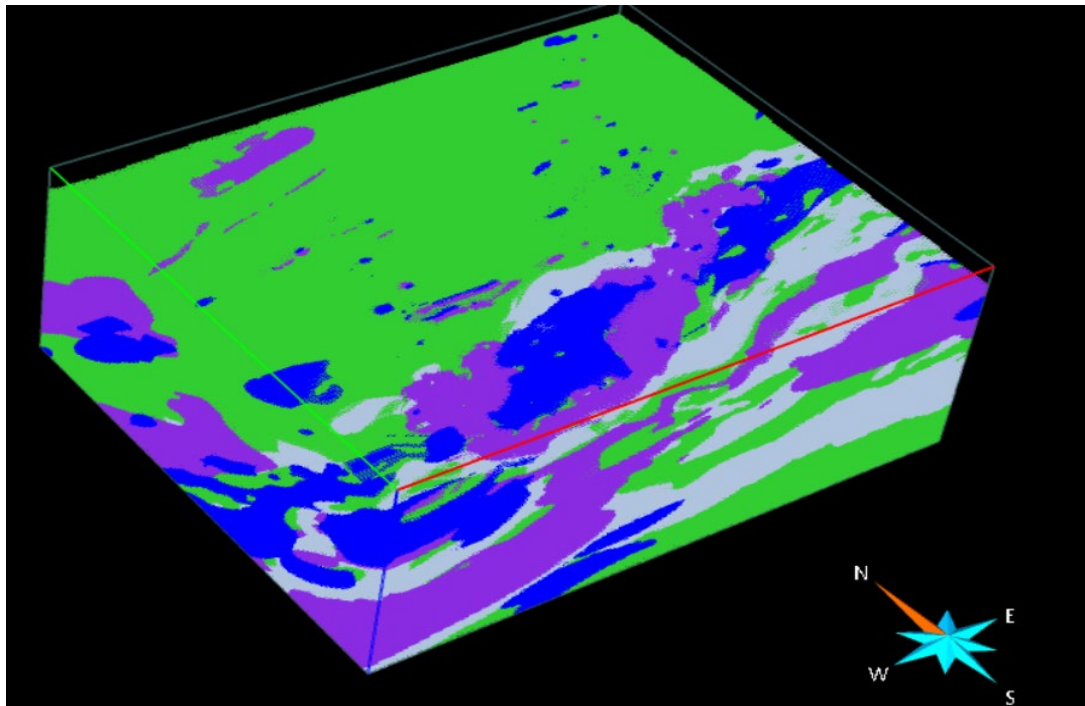


Figure 4. Modélisation hybride-3D de la zone 5-8 (réalisée par F. Fallara).

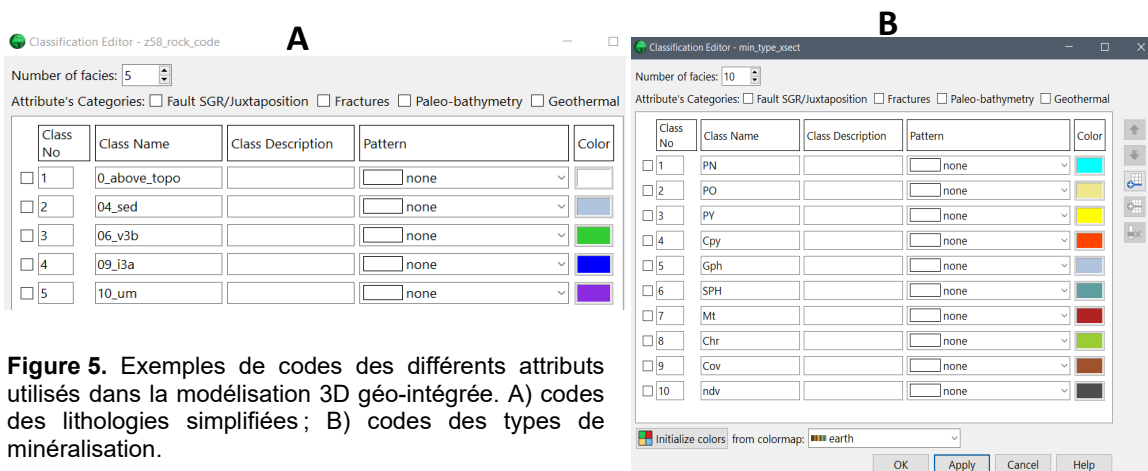


Figure 5. Exemples de codes des différents attributs utilisés dans la modélisation 3D géo-intégrée. A) codes des lithologies simplifiées; B) codes des types de minéralisation.

3-Le problème inverse

3.1 Qu'est-ce qu'un problème inverse ?

Le problème inverse est une approche mathématique utilisée dans plusieurs domaines notamment en imagerie médicale (échographie ou détection de tumeur), mais aussi en géophysique pour l'imagerie sismique, gravimétrique, ou magnétique par exemple. Dans un problème inverse, on tente de déterminer les causes d'un phénomène à partir des observations expérimentales de ses



effets. En fait, on étudie ce qui n'est pas directement observable. En prenant l'exemple de l'imagerie médicale, l'image 3D d'un scanner n'est pas directement obtenue par une mesure physique mais elle est créée par un ordinateur à l'aide d'algorithmes mathématiques à partir d'une collection de radiographies de la tête du patient prise sous des angles différents à partir de mesures d'absorption des rayons X (Le Pennec, 2014). Les problèmes inverses font partie intégrante de nos vies puisque notre cerveau résout en permanence ce genre de problème. Il est capable de déduire des informations à partir d'une multitude de signaux reçus (p. ex. la lumière, les sons, les odeurs). Par exemple, pour un même son émis, l'interprétation qui peut être faite quant à la source du son peut être différente d'une personne à l'autre. En d'autres termes, cela signifie en mathématique que les mêmes effets peuvent provenir de causes différentes. Et c'est aussi une des caractéristiques des problèmes inverses. Il existe à ce sujet deux ouvrages incontournables sur la théorie des problèmes inverses, celui de Albert Tarantola (2005) et celui de Michel Kern (2016), ce dernier étant un complément au travail de son prédécesseur.

3.2 Comment résoudre un problème inverse ?

Il existe un principe simple qui est à la source de la plupart des méthodes modernes pour résoudre les problèmes inverses, le principe du rasoir d'Occam aussi appelé principe de parcimonie. Guillaume Occam (ou Ockham) était un moine philosophe anglais qui cite cette phrase (initialement en latin) : « La multiplicité ne devrait pas être postulée sans nécessité. » (Biard, 1997). En d'autres termes, il s'agit d'un principe de bon sens qui consiste mathématiquement à optimiser le modèle prédit le plus cohérent possible et le moins complexe possible avec les mesures observées du modèle vrai.

De manière générale, en mathématique, pour résoudre un problème, il faut en premier lieu déterminer si ce problème est bien posé. Selon le mathématicien Jacques Hadamard, un problème est bien posé s'il satisfait trois conditions (Hadamard, 1902) :

- 1) Il existe une solution
- 2) La solution est unique
- 3) La solution dépend des données du problème de façon continue, c'est-à-dire que dans le cas où les données initiales varient légèrement, la solution au problème devrait suivre cette variation et être également légèrement modifiée.

Dans le cas des problèmes inverses, il est très rare que ces conditions soient réunies et satisfaites. Le problème inverse est donc un problème particulièrement complexe à résoudre et ambigu.

Il existe diverses applications des problèmes inverses dans plusieurs domaines des géosciences : 1) dans le domaine pétrolier (détection des niveaux de perméabilité), 2) en hydrogéologie (identification des perméabilités hydrauliques), 3) en acoustique sous-marine et radar (détermination de la norme d'un obstacle) et bien d'autres. Les inversions se réalisent régulièrement à partir de données géophysiques et vont aider à obtenir le modèle géologique intégré le plus robuste possible qui combine géophysique, géologie et pétrophysique. Pour ce faire, l'utilisation de logiciels de modélisation 3D est nécessaire afin de réaliser des modèles de type Voxel, soit la contraction de pixel et de volume, qui est subdivisée en cellules 3D contenant l'information numérique.

Pour la réalisation de modélisations géophysiques, il y a différentes possibilités : 1) passer par une modélisation dite directe permettant de simuler les observations géophysiques, par exemple une carte de l'anomalie du champ magnétique mesurée dans les airs ou au sol, à partir d'un modèle 3D des propriétés physiques des roches (susceptibilité magnétique); d'après les lois mathématiques, il va alors exister une seule solution à la modélisation directe puisqu'il s'agit d'un problème bien posé en mathématique ou 2) utiliser la modélisation inverse qui viserait par exemple à estimer la distribution des contrastes de propriétés physiques des roches à partir des



observations géophysiques ; le problème va être dans ce cas sous-déterminé avec l'existence d'une infinité de solutions possibles. L'inversion des données magnétiques permettra de produire un modèle 3D pouvant expliquer l'ensemble des anomalies magnétiques mesurées lors d'un levé de surface ou aéroporté.

Il existe différentes approches mathématiques et décisionnelles qui peuvent être considérées pour la réalisation des inversions en géosciences ; ces approches sont résumées ci-dessous :

1) Approche paramétrique ou généralisée

L'approche paramétrique vise l'aspect géométrique du problème qui va être simplifié. Par exemple, on va présumer d'une forme sphérique pour un corps minéralisé et l'objectif est d'estimer son volume ou sa profondeur.

L'approche généralisée vise à discrétiser en cellules le sous-sol dont le volume est prédéterminé et l'objectif est d'estimer les propriétés physiques pour chaque cellule. On ne fait généralement pas d'hypothèses par rapport à la géométrie du sous-sol.

2) Approche mathématique déterministe ou probabiliste

L'approche déterministe est une approche qui consiste à minimiser l'erreur entre les données modélisées et les données observées avec des algorithmes déterministes. Cette approche réduit le temps de calcul, mais nécessite un modèle de départ et l'optimisation est locale autour de ce modèle.

L'approche probabiliste est basée sur la minimisation de l'erreur entre les données modélisées et observées, ce qui peut être accompli par un processus d'échantillonnage (style Monte Carlo). Cette approche est beaucoup plus coûteuse en temps de calcul, mais l'optimisation est plus globale et permet d'identifier la distribution des solutions possibles ainsi que la propagation des erreurs de mesures vers le modèle final. Elle offre ainsi une meilleure gestion des risques qu'une approche déterministe.

3) Choix d'inversions contraintes ou non contraintes

Avec les inversions contraintes, le nombre de solutions possibles au problème inverse peut être réduit avec des contraintes dites globales (par exemple avec les valeurs minimums et le maximum de susceptibilité magnétique attendues selon le contexte géologique) ou avec des contraintes dites ponctuelles (par exemple avec des données de susceptibilité magnétique obtenues en forage ou sur des affleurements).

Avec les inversions non contraintes, l'approche est dite « naïve ». C'est une approche qui ne limite pas vraiment le nombre de solutions possibles au problème inverse.

Pour illustrer la complexité des inversions en géologie, les deux illustrations ci-dessous montrent l'ambiguïté des modélisations inverses en géologie et la non-unicité du problème (Boschetti *et al.*, 1998). Ces modélisations ont été réalisées à partir de données de gravimétrie mais s'appliquent de la même manière aux données magnétiques.

La Figure 6 montre une section 2D d'un modèle de contraste de densité généré à partir du profil de gravité obtenu en modélisant la distribution des contrastes de densité à partir de données gravimétriques. En réalisant une inversion du même modèle vrai en entrée, il est possible d'obtenir quatre solutions différentes en sortie qui satisfont toutes les données d'entrée utilisées. Par contre, l'interprétation de la profondeur du corps identifié à partir du contraste de densité est totalement différente.



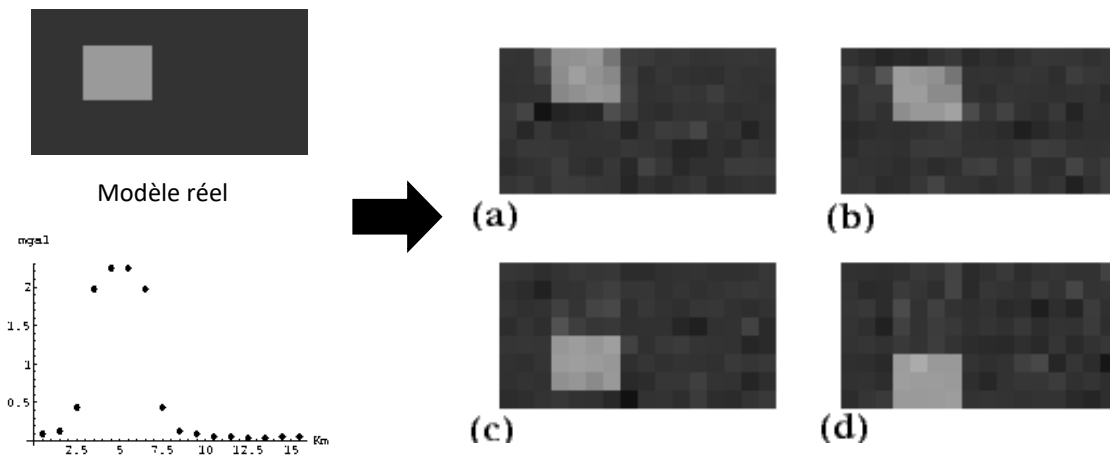


Figure 6. Étude de cas démontrant qu'un même modèle théorique de départ peut générer une multitude de solutions possibles (Boschetti *et al.*, 1998).

La Figure 7 montre trois modèles réels différents en entrée avec des géométries variables : la présence d'une faille à fort pendage à gauche, une couche plissée au centre et un corps isolé à une certaine profondeur à droite. Pour chaque profil, une inversion a été réalisée afin que la solution se rapproche le plus possible d'un corps minéralisé en forme de Mickey Mouse. Cette démonstration par l'absurde permet de valider que peu importe le modèle d'entrée, il est toujours possible de trouver la solution recherchée. Dans ce cas précis, il est présumé que le corps minéralisé se présente sous la forme de Mickey Mouse. La solution désirée est imposée par les données d'entrée. Cet exemple sert à démontrer la complexité et de l'ambiguïté des inversions qui sont associées à une multitude de solutions possibles au problème en exploration.

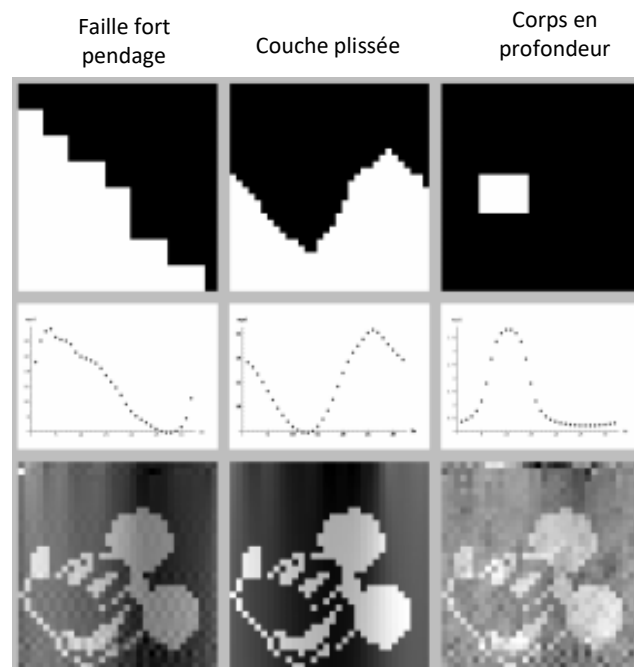


Figure 7. Étude de cas (démonstration par l'absurde) démontrant qu'une même solution peut satisfaire des modèles géologiques théoriques différents (Boschetti *et al.*, 1998).

4-Valorisation de K pour l'optimisation des inversions 3D

4.1 Méthodologie

Les étapes suivies pour la réalisation du projet sont les suivantes :

Élaboration d'un modèle vrai de référence :

- 1- Bâtir un modèle lithologique 3D de la zone d'étude
- 2- Associer des valeurs de susceptibilité magnétique à chaque cellule du modèle lithologique

Réalisation de la modélisation directe à partir du modèle vrai précédent :

- 3- Simuler la carte de l'anomalie magnétique mesurée au-dessus du modèle géologique

Réalisation de modélisations inverses :

- 4- Procéder à la modélisation inverse des observations « réelles » pour retrouver le modèle lithologique, **sans aucune contrainte initiale**
- 5- **Ajouter des contraintes globales** et répéter la modélisation inverse
- 6- **Augmenter progressivement la densité des contraintes ponctuelles** et répéter la modélisation inverse

L'étape finale est d'analyser l'impact des contraintes appliquées sur le résultat de la modélisation inverse en comparant le modèle obtenu avec le modèle produit aux étapes 1 et 2. L'objectif est de se rapprocher d'un modèle qui est le moins complexe possible et le plus cohérent avec le modèle vrai de référence, tout en respectant le principe de parcimonie (Biard, 1997).

Pour réaliser toutes ces étapes, il a fallu faire un choix parmi les approches mathématiques disponibles. Parmi celles présentées dans la section précédente, l'approche généralisée sera privilégiée dans ce projet, couplée à une approche mathématique déterministe et à une densité variable de contraintes afin de tester les effets sur les solutions du modèle. L'approche déterministe est une méthode de calcul rapide et moins coûteuse avec des algorithmes bien reconnus dans la littérature (Cockett *et al.*, 2015).

4.2 Inversions géophysiques

Le prolongement de la collaboration avec Charles Bérubé, géophysicien à Polytechnique Montréal et spécialiste des inversions de données magnétiques, a permis la production des résultats d'inversions suivants, à partir de l'utilisation de la version du logiciel Geoscience ANALYST Pro Geophysics, développé chez Mira Geosciences. L'interface du logiciel est très intuitive et intègre une librairie d'algorithmes d'inversion libres (*open-source*) en format Python. Cette interface a facilité l'intégration de l'auto-encodeur, créé sous format Python ainsi que l'automatisation de certaines tâches de pré- et post-traitement réalisées par Charles Bérubé.

4.3 Résultats - Bâtir un modèle lithologique 3D

La Figure 8 montre le modèle géologique 3D de la zone 5-8. Ce modèle géo-intégré a été réalisé par modélisation implicite en conciliant 388 forages, la carte géologique de surface et la tendance structurale régionale (détaillée dans la Section 2 - Secteur d'étude et données utilisées). Le modèle en blocs, qui contient 11 934 351 cellules cubiques dont les côtés mesurent 10 m, a été revu et amélioré par Francine Fallara. La dernière mise à jour remonte à février 2023. Finalement, les dimensions du modèle sont 3510 x 2810 x 1210 m dans les directions E-O, N-S, et en profondeur, respectivement. Il est important de noter que la plupart des forages sont situés au cœur du modèle, et qu'il y a peu de forages disponibles près des bordures (Figure 8).



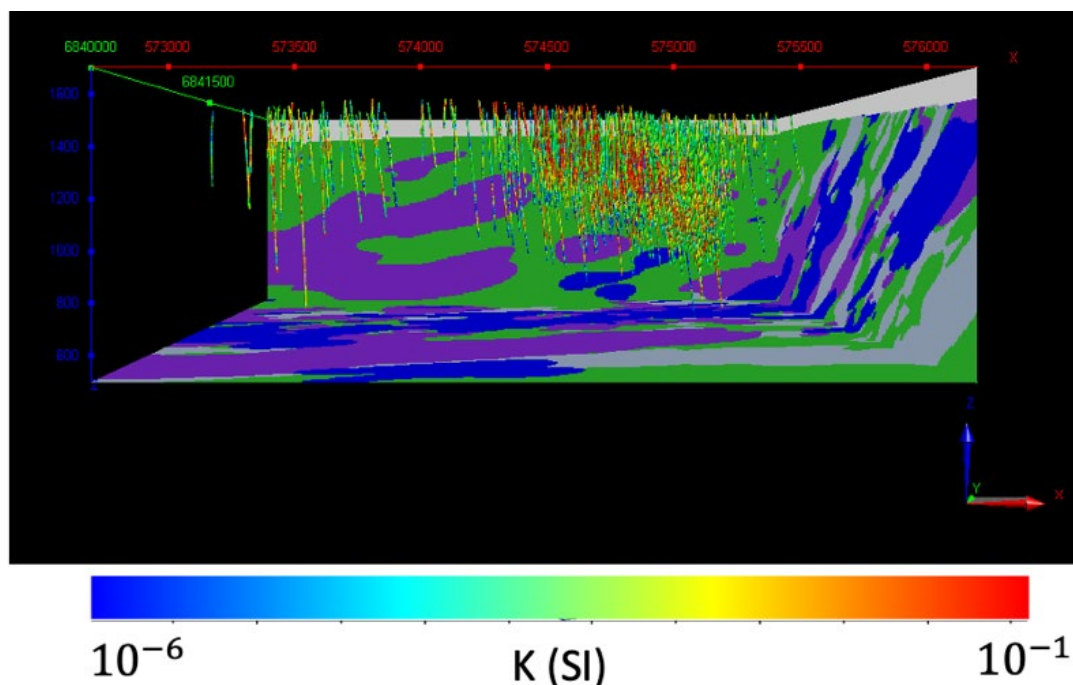


Figure 8. Modèle lithologique 3D montrant les quatre unités principales observées dans la zone 5-8, incluant des roches sédimentaires, des basaltes, des gabbros et des unités ultramafiques.

4.4 Résultats - Association des valeurs de susceptibilité magnétique

Au total, 199 427 mesures de susceptibilité magnétique distribuées approximativement au 0,6 m le long de 388 forages sont disponibles. La Figure 9 illustre l'emplacement et les valeurs de susceptibilité magnétique au cœur du modèle lithologique 3D de la zone 5-8.

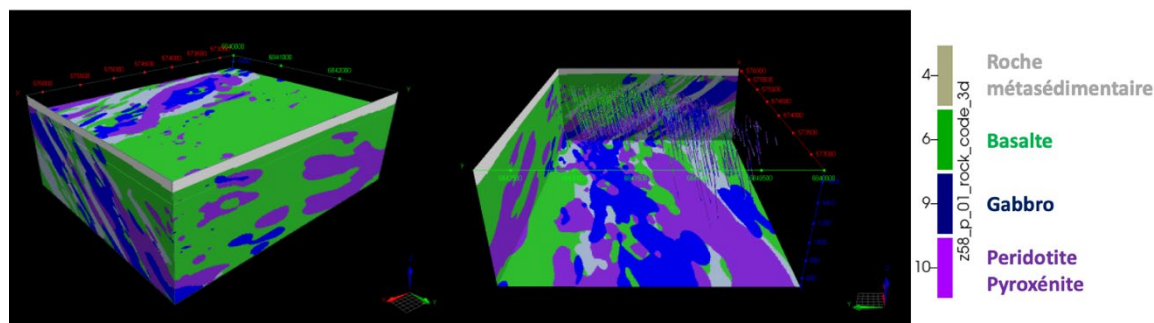


Figure 9. Emplacement des forages et valeurs de susceptibilité magnétique mesurées au cœur du modèle lithologique de la zone 5-8.

Une approche par auto-encodage développée lors de la phase 1 du projet (Gigoux *et al.*, 2022) a été utilisée dans le but d'associer une valeur de susceptibilité magnétique à chaque cellule du modèle. L'algorithme d'auto-encodeur a d'abord été entraîné à modéliser la distribution statistique de la susceptibilité magnétique qui caractérise chaque unité lithologique le long des trous de forages disponibles. Ce même algorithme est ensuite utilisé pour prédire les valeurs de susceptibilité magnétique des cellules du modèle qui ne sont pas recoupées par les trous de forage. Il s'agit donc d'un exercice d'extrapolation. Puisque l'auto-encodeur peut modéliser la



distribution statistique de la susceptibilité magnétique, les prédictions faites partout dans le modèle sont représentatives de l'amplitude et de la variabilité des données observées en forage. La Figure 10 montre le résultat de l'extrapolation des données de susceptibilité magnétique sur toutes les cellules du modèle 3D, ainsi qu'un rapprochement sur le côté est du modèle.

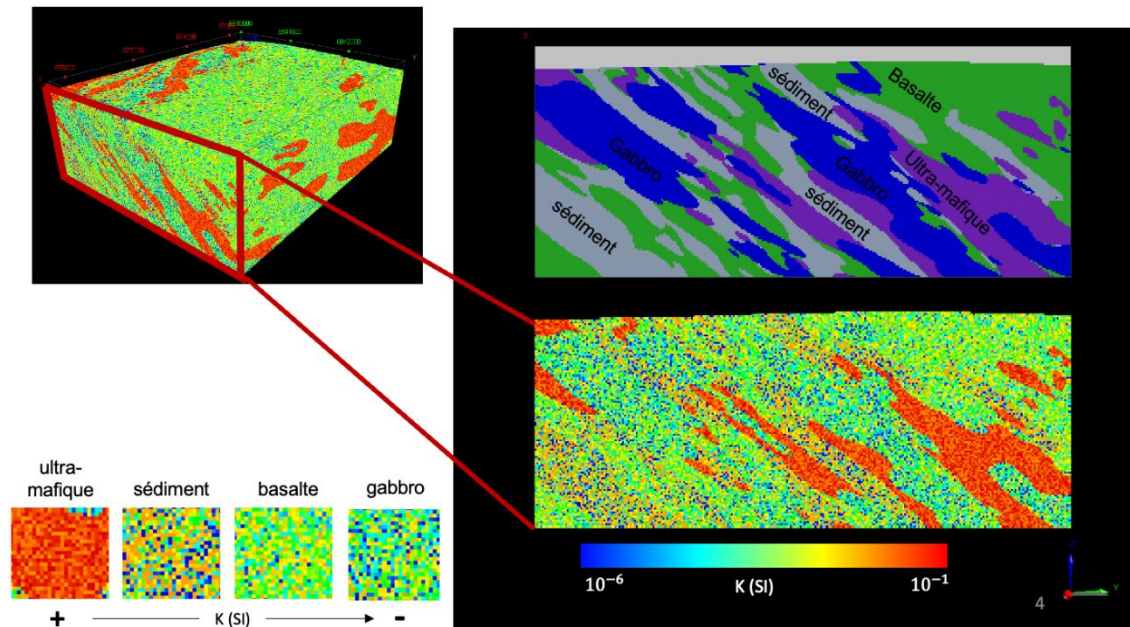


Figure 10. Modèle 3D de susceptibilité magnétique prédit par l'auto-encodeur après avoir été entraîné sur les données de forages de la zone 5-8.

Il est évident d'après la Figure 10 que l'auto-encodeur capture non seulement les valeurs moyennes, mais aussi la variance de la susceptibilité magnétique associée à chaque unité lithologique. Par exemple, les unités ultramafiques sont caractérisées par une haute susceptibilité d'environ 0,1 SI ainsi qu'une faible variance. À l'inverse, les unités de gabbro sont généralement les moins magnétiques tout en étant très variables (10^{-3} à 10^{-6} SI). Ce sont les roches métasédimentaires qui offrent la plus grande variabilité de susceptibilité magnétique (10^{-2} à 10^{-6} SI). Le modèle 3D de susceptibilité magnétique montré à la Figure 10 constitue le modèle de référence pour les inversions. C'est à partir de celui-ci que l'anomalie de champ magnétique total a été simulée dans les sections suivantes.

4.5 Résultats - Simulation de l'anomalie magnétique au-dessus de la zone 5-8

L'anomalie magnétique est modélisée sur une grille uniforme dont l'espacement entre les lignes et les stations est de 50 m. De plus, l'altitude de chaque point sur la grille est fixée à 51 m au-dessus de la topographie du site. Le choix de ces caractéristiques vise à reproduire le levé aéromagnétique qui a été réalisé au-dessus de la zone 5-8 le 12 juin 2003. Il est important de noter que l'amplitude, l'inclinaison et la déclinaison du champ magnétique terrestre varient dans le temps à cause de la variation séculaire. Ainsi, une amplitude de 58 327 nT, une inclinaison de 81,3 degrés et une déclinaison de -28,7 degrés ont été choisies pour simuler l'anomalie magnétique au-dessus de la zone 5-8. Ces paramètres ont été obtenus à partir de l'*International Geomagnetic Reference Field* de l'année 2003. De cette façon, l'anomalie magnétique simulée devrait reproduire celle qui a réellement été mesurée sur le terrain. La Figure 11 montre la grille créée au-dessus du modèle lithologique (gauche) et l'anomalie magnétique simulée sur cette grille et d'après les paramètres du champ magnétique décrits précédemment (droite).

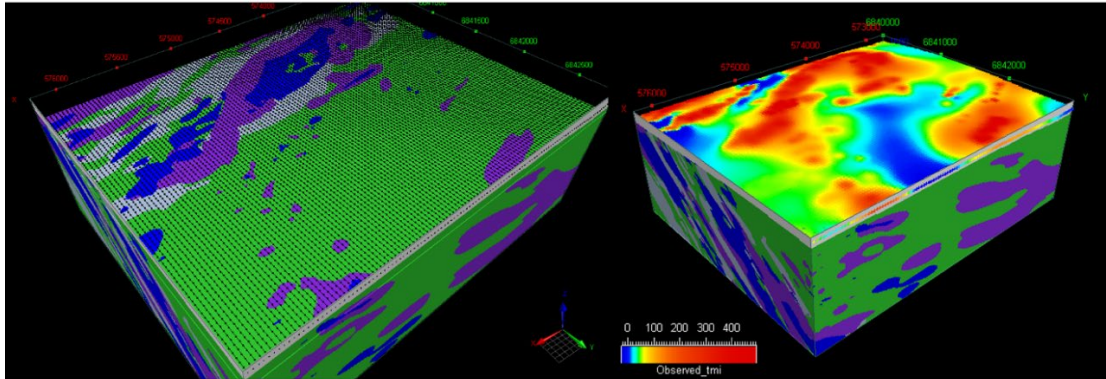


Figure 11. Création de la grille et simulation de l'anomalie magnétique au-dessus de la zone 5-8.

L'anomalie magnétique illustrée à la Figure 11 constitue le point de départ pour les expériences de modélisation inverse qui suivent.

4.6 Résultats - Maillage pour la modélisation inverse

La Figure 12 montre le maillage (*OcTree mesh*) créé pour accueillir les résultats de la modélisation inverse. Cette étape a été nécessaire pour réduire la taille du modèle de référence, qui contient près de 12 millions de cellules, à un maillage de seulement 84 680 cellules permettant de réaliser les inversions dans un temps de calcul raisonnable (c.-à-d. environ 30 minutes par itération). Le maillage est raffiné à des cellules de 50 m à proximité des trous de forage et de la surface topographique, alors qu'il devient plus grossier en bordure du modèle (Figure 12). Si le temps de calcul n'était pas une limitation dans le cadre de ce projet, un maillage de 10 m comme celui du modèle de référence aurait pu être utilisé.

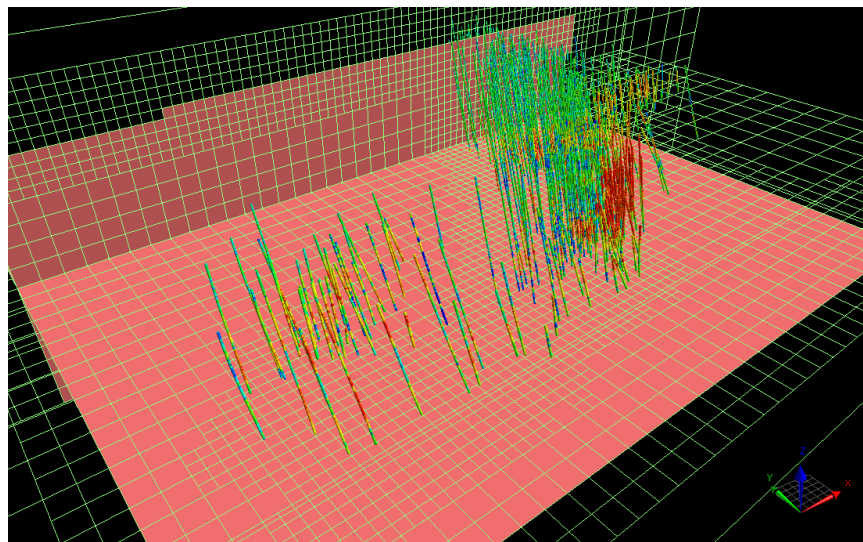


Figure 12. Illustration du maillage 3D créé pour les modélisations inverses. Le maillage est raffiné près des forages et de la surface topographique.

4.7 Résultats - Inversion non contrainte

La première expérience d'inversion a été réalisée sans aucune contrainte sur la susceptibilité magnétique, c'est-à-dire qu'aucun trou de forage n'est considéré et qu'il n'y a aucune borne sur les valeurs possibles de susceptibilité magnétique. La Figure 13 montre le modèle 3D de

susceptibilité magnétique obtenu par inversion contrainte ainsi qu'une comparaison avec la susceptibilité réellement observée en forage.

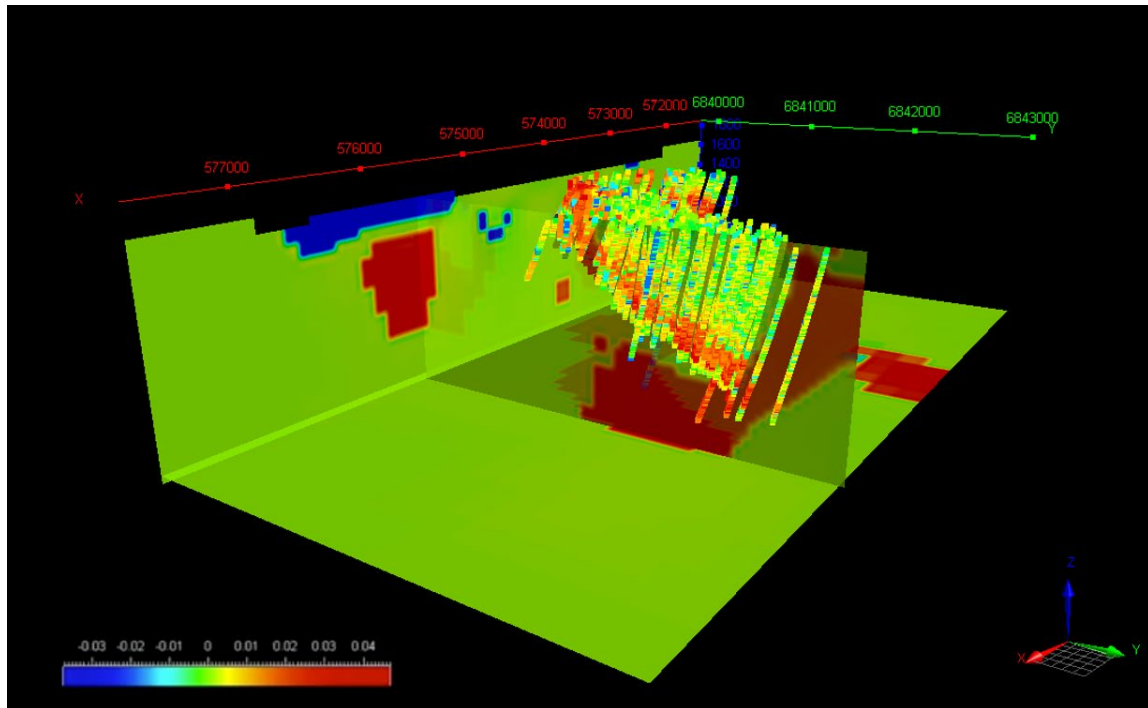


Figure 13. Modèle de susceptibilité magnétique retrouvé par inversion non contrainte.

Il est important de noter que l'inversion non contrainte converge et qu'une solution qui satisfait l'anomalie magnétique est rapidement trouvée par l'algorithme. Cependant, la solution trouvée ne respecte pas les données de forage et produit même des valeurs de susceptibilité magnétique négatives. Finalement, la solution trouvée est trop lisse et semble peu réaliste. En effet, on observe seulement trois « unités géologiques » soit une unité de très faible susceptibilité magnétique en bleu, une de très forte susceptibilité en rouge, ainsi qu'une valeur intermédiaire, en vert, partout ailleurs dans le modèle.

4.8 Résultats - Inversion avec contraintes globales

L'ajout de contraintes globales, c'est-à-dire de valeurs minimales (10^{-6} SI) et maximales (10^{-1} SI) pour la susceptibilité magnétique, améliore légèrement les résultats de l'inversion. Les valeurs de contraintes ont été choisies de façon à être compatibles avec les observations faites en forage. En comparant le modèle de susceptibilité retrouvé avec les observations en forage (Figure 14), il est évident que le modèle retrouvé ne correspond pas au modèle de référence connu. Cependant, contrairement à l'inversion non contrainte, cette fois, aucune valeur négative n'est proposée par l'algorithme et on observe une plus grande variabilité dans le modèle retrouvé. Le modèle inverse est donc plus réaliste, mais la solution trouvée n'est visiblement pas celle recherchée.

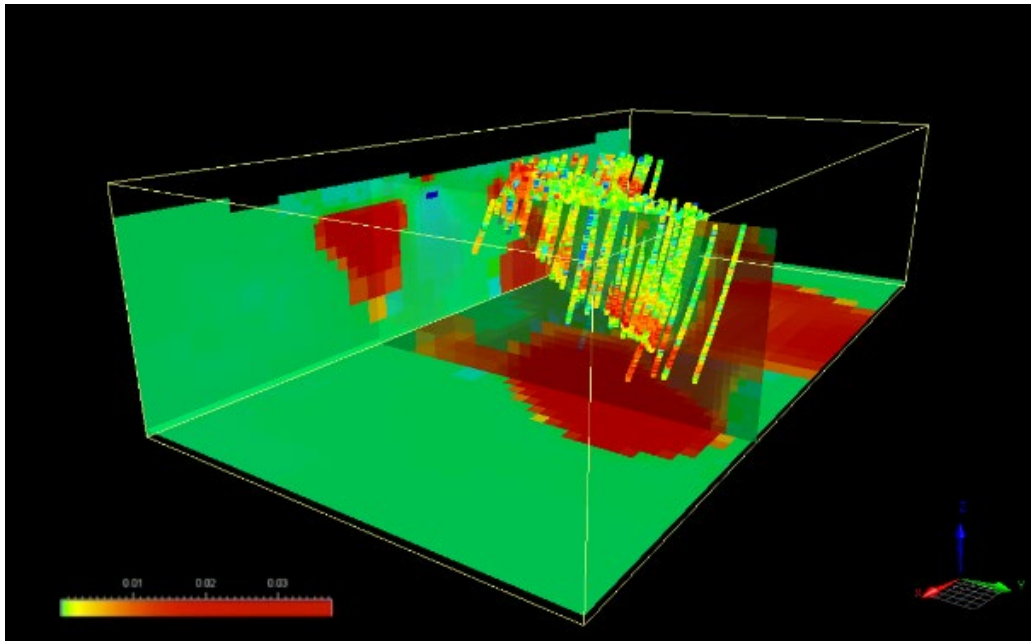


Figure 14. Modèle de susceptibilité magnétique retrouvé par inversion avec contraintes globales.

4.9 Résultats - Inversion avec contraintes ponctuelles d'après les forages

C'est avec l'ajout de contraintes ponctuelles déterminées par les observations disponibles en forage que les résultats d'inversion s'améliorent considérablement. Dans ces expériences, un nombre croissant de forages allant de 1 à 351 ont été utilisés pour contraindre les inversions. Pour chaque expérience, les forages étaient pigés au hasard pour assurer une bonne dispersion géographique des contraintes. La Figure 15 montre les contraintes utilisées (gauche) et les modèles de susceptibilité retrouvés par inversion (droite). Sur la Figure 15, l'expérience du haut considère 51 forages, alors que celle du bas considère 351 forages.

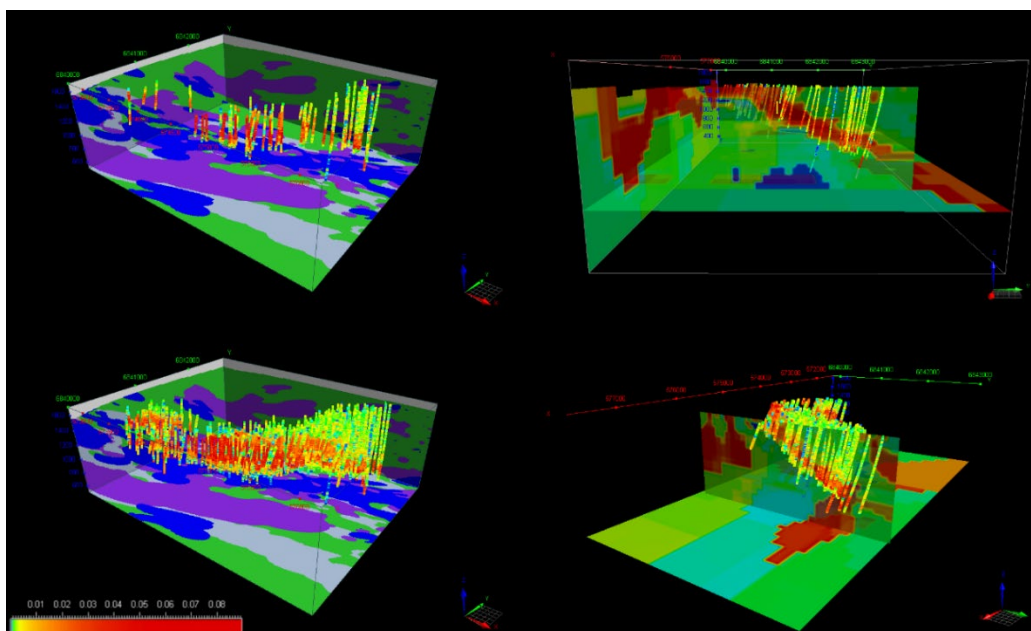


Figure 15. Modèles de susceptibilité magnétique retrouvés par inversion avec contraintes ponctuelles.

Cette fois, les modèles 3D retrouvés par inversion sont compatibles avec le modèle de référence. On note par exemple la présence bien définie des unités ultramafiques dans la partie droite de la Figure 15. Cependant, les résultats d'inversion restent assez homogènes dans les régions du modèle où les roches sédimentaires, les basaltes et les gabbros sont présents.

4.10 Résultats - Sommaire des expériences de modélisation inverse

Dans tous les cas, les inversions ont convergé vers une des solutions possibles en une cinquantaine d'itérations. Puisque l'objectif d'inversion est de retrouver la carte de l'anomalie magnétique, on peut dire que cet objectif a été atteint peu importe le type ou la densité de contraintes appliquées. En effet, la Figure 16 montre que l'anomalie magnétique de référence (gauche), celle retrouvée sans aucune contrainte (centre) et celle retrouvée avec un maximum de contraintes (droite) sont pratiquement identiques.

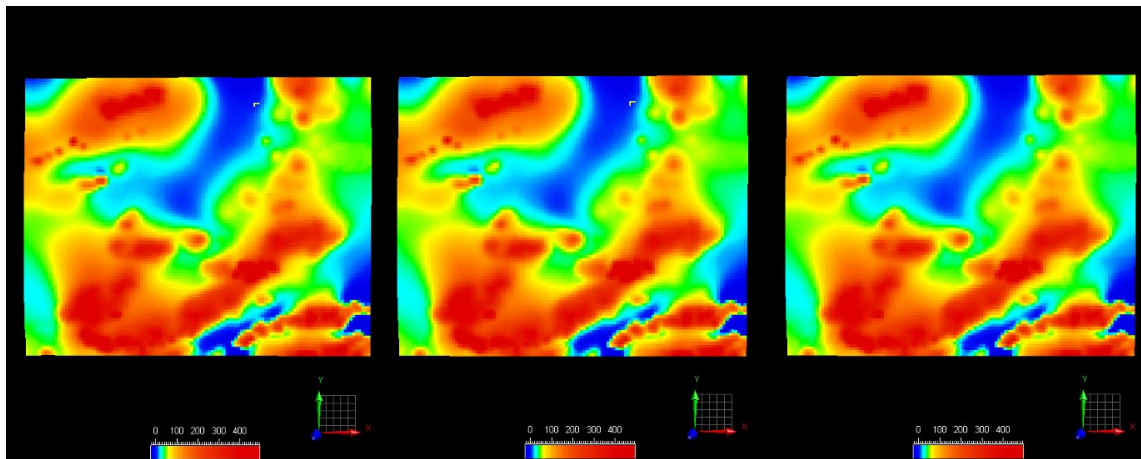


Figure 16. Comparaison entre l'anomalie magnétique de référence (gauche) et celles retrouvées par inversion non contrainte (centre) et avec un maximum de contraintes (droite).

Toutefois, tel que montré dans les sections précédentes, les modèles 3D de susceptibilité magnétique qui génèrent les anomalies magnétiques sont complètement différents selon le type et la densité de contraintes utilisées dans l'inversion. Il s'agit ici d'une démonstration claire de l'existence de plusieurs solutions possibles à la modélisation inverse : dans tous les cas, l'algorithme converge, mais rien ne garantit l'exactitude de la solution sauf dans le cas où des contraintes au niveau des forages sont disponibles.

En résumé, dix exercices de modélisation inverse ont été effectués pour retrouver le modèle 3D de référence de la susceptibilité magnétique de la zone 5-8 et chaque exercice a donné un résultat différent. La Figure 17 montre l'erreur quadratique de reconstruction (*root mean square error*, *RMSE*) entre le modèle de référence et le modèle retrouvé par inversion en fonction du type et de la densité de contraintes disponibles. On note que l'erreur est maximale, soit environ $2,1 \times 10^{-2}$ SI, avec peu (1 à 51 forages) et pas de contraintes. L'ajout de contraintes globales fait en sorte que l'erreur de reconstruction est réduite à $1,7 \times 10^{-2}$ SI, une amélioration qui n'est pas nécessairement significative. Finalement, l'ajout de contraintes ponctuelles avec un grand nombre de forages (101 à 351) réduit l'erreur de reconstruction de près de 50 %, avec un minimum de $1,2 \times 10^{-2}$ SI.

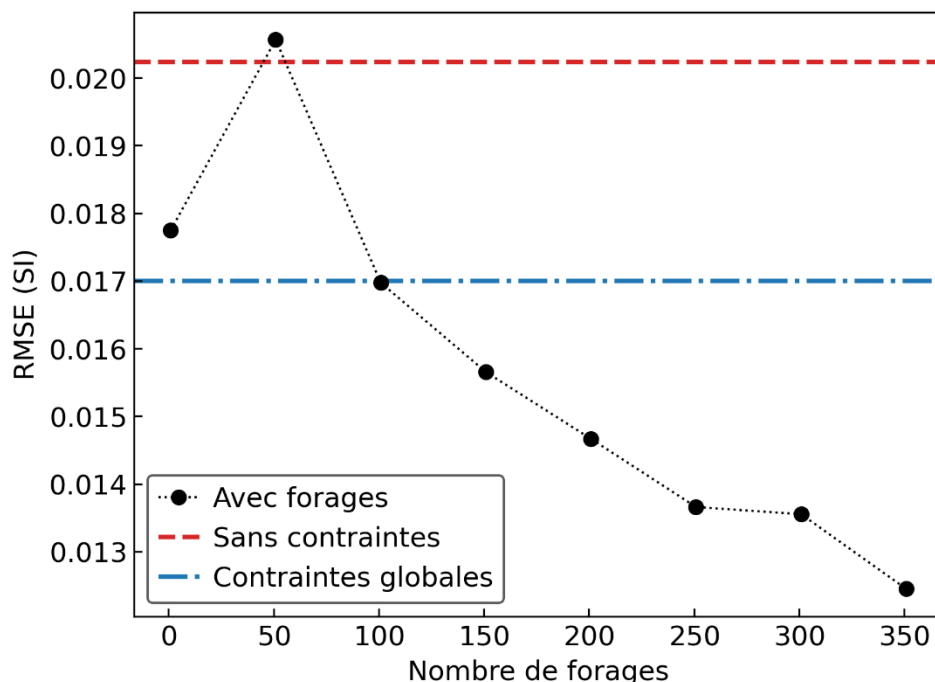


Figure 17. Erreur quadratique (*RMSE*) entre le modèle de référence et le modèle inverse en fonction du type et de la densité de contraintes appliquées.

5-Conclusions

Ce projet collaboratif a permis de 1) prédire et propager les valeurs de susceptibilité en dehors des forages à partir du modèle lithologique de départ grâce à l'outil auto-encodeur développé en phase 1 ; 2) démontrer l'apport et l'impact des contraintes ponctuelles de susceptibilité magnétique en forages sur la réduction de l'erreur sur les résultats des inversions, et 3) mettre en évidence les limites des inversions et leurs interprétations en profondeur en géophysique.

Il est important de noter qu'étant données les contraintes de temps et de ressource, ce projet est limité à l'étude d'un seul type de contexte métallogénique, celui d'un système Ni-Cu-EGP avec la présence de roches ultramafiques associées à de forts contrastes de susceptibilité magnétique. L'application de la méthodologie développée dans le cadre de ce projet pourrait être appliquée en contexte aurifère, plus complexe en termes d'empreinte minéralisée associée à des contrastes de susceptibilité plus faibles. Il s'agirait également de ré-entraîner l'auto-encodeur sur de nouvelles données lithologiques et pétrophysiques dans ces contextes afin de le rendre performant pour la prédiction des valeurs de K en dehors des zones contraintes par forages pour élaborer le modèle de susceptibilité de départ (étape 3). Les données mesurées en affleurement peuvent également être utilisées. La problématique de la rémanence magnétique des roches n'a également pas été abordée dans ce projet. Des carottes orientées et des mesures dédiées sont nécessaires à ce genre d'étude pour documenter l'effet de la rémanence des lithologies sur les résultats des inversions. La conclusion est qu'il est, dans tous les cas, indispensable de rester très prudent sur les interprétations réalisées en profondeur qui peuvent découler des inversions géophysiques, et de reconnaître les limites de l'approche mathématique inverse au regard des données utilisées et du type de contrainte appliquée.

6-Remerciements

Merci à Charles Bérubé et Francine Fallara pour leur collaboration et leur participation active à la réalisation de ce projet. Merci également à Dominique Fournier (Mira Geoscience) de nous avoir initiés à l'utilisation du logiciel Geoscience ANALYST Pro Geophysics.

7-Références

- Biard, J. (1997). Guillaume d'Ockham, logique et philosophie. Ed. Presses Universitaires de France, Philosophie, p128.
- Boschetti, F., Horowitz, F.G., Hornby, P. (1998). Ambiguity analysis and the constrained inversion of potential field data. Australian geodynamics cooperative research centre report, CSIRO exploration and Mining.
- De Kemp, E.A., Sanborn-Barrie, M., et St-Onge, M.R. (2007). 3-D model Kattiniq (Raglan Mine) region *in* St-Onge, M. R., Lamothe, D., Henderson, I., Ford, A., eds., Digital geoscience atlas of the Cape Smith Belt and adjacent domains, Ungava Peninsula, Quebec-Nunavut: Geological Survey of Canada, Open File, v. 5117
- Gigoux, M., Peyrard, V., Bérubé, S., Trépanier, S. (2022). Valorisation des données de susceptibilité magnétique en exploration minérale. Projet CONSOREM 2021-02, p51.
- Cockett, R., Kang, S., Heagy, L. J., Pidlisecky, A., & Oldenburg, D. W. (2015). SimPEG: An open-source framework for simulation and gradient based parameter estimation in geophysical applications. *Computers & Geosciences*, 85, 142–154.
- Hadamard, J. (1902). Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique, Princeton University Bulletin, p 49-52.
- Hinton, G. E., et Salakhutdinov, R. R. (2006). Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks. *Science* 313 (5786), 504-507.
- Kern, M. (2016). Numerical methods for inverse problems. Ed. Wiley-ISTE, p. 228.
- Le Pennec, E. (2014). L'art de se couper la tête sans faire mal. In *Mathématiques, l'explosion continue*, Université Paris-Saclay, Inria, 107-111.
- McKevitt, D.J., Leshner, C.M., Houlié, M.G. (2021). Geology and geochemistry of mafic-ultramafic sills in the northern permits, Raglan Ni-Cu-(PGE) district, Cape Smith Belt, Nunavut, Québec. Scientific presentation 90, Geological Survey of Canada.
- Osmond, R.T., Watts, A. H., Ravenhurst, W. R., Foley, C. P., and Leslie, K. E. (2002). Finding nickel from the B-field at Raglan – 'To B or not dB,' CSEG Recorder, Focus Article, p. 45-47.
- Sohn, K., Honglak L., et Xinchun Y. (2015). Learning Structured Output Representation using Deep Conditional Generative Models. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 28.
- St-Onge, M. R., Lamothe, D., Henderson, I., Ford, A. (2007). Digital geoscience atlas of the Cape Smith Belt and adjacent domains, Ungava Peninsula, Quebec-Nunavut: Geological Survey of Canada, Open File, v. 5117.
- Tarantola, A. (2005). Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. *Society for industrial and applied mathematics*, p.358.

