

TABLE DES MATIÈRES

<i>Remerciements</i>	<i>ii</i>
<i>Dédicaces</i>	<i>iii</i>
<i>Table des matières</i>	<i>iv</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>viii</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>xi</i>
<i>Liste des annexes</i>	<i>xii</i>
<i>Résumé</i>	<i>xiii</i>
<i>Abstract</i>	<i>xiv</i>
<i>Liste des variables</i>	<i>xv</i>
CHAPITRE 1	1
<i>Introduction</i>	<i>1</i>
1.1 Contexte de l'étude	1
1.2 Problématique et cadre du mémoire	3
1.3 Objectifs de l'étude	4
1.4 Plan du mémoire	5
1.5 Localisation de la zone d'études	6
CHAPITRE 2	9
<i>Mise en contexte géologique</i>	<i>9</i>

2.1	Revue de littérature sur la cartographie géologique par les méthodes géophysiques	9
2.2	La géologie générale du Québec	11
2.3	Les grandes provinces géologiques.....	12
2.4	La géologie des zones d'études.....	15
<i>CHAPITRE 3</i>		23
<i>Méthodes en magnétométrie aéroportée</i>		23
3.1	Modèle simplifié	24
3.1.1	Champ géomagnétique et anomalie magnétique.....	26
3.1.1	Système d'unités.....	27
3.2	Magnétisation des roches	28
3.2.1	Aimantation induite et rémanente	28
3.2.2	Susceptibilité magnétique des roches et des minéraux	30
3.3	Méthodologie de traitement des données magnétiques.....	32
3.3.1	Réduction au pôle.....	32
3.3.2	Prolongement vers le haut	32
3.3.3	Dérivations directionnelles.....	33
3.3.4	Inversions non contraintes.....	35
3.4	Workflow des traitements dans le cadre de cette maîtrise	36
3.5	Applications	37
<i>CHAPITRE 4</i>		40
<i>Cartographie géologique</i>		40
4.1	Sources de données et résolution	40

4.2	Justification du choix des zones d'études	41
4.3	Contraintes et difficultés	42
4.4	Traitement des données de levés aéromagnétiques.....	42
4.5	Méthode d'inversion	43
4.5.1	Pondération en profondeur (<i>Depth Weighting</i>)	43
4.5.2	Fonction-objectif du modèle géophysique	44
4.5.3	Inadéquation des données (<i>Data Misfit</i>).....	45
4.6	Interprétation géologique des résultats.....	46
4.6.1	Analyse des images 2D de la zone d'études 1.....	47
4.6.2	Résultats de l'inversion non contrainte de la zone d'études 1	51
4.6.3	Analyse des images 2D de la zone d'études 2.....	55
4.6.4	Modélisation inverse de la zone d'études 2.....	60
4.6.5	Apport des données magnétiques	63
<i>CHAPITRE 5</i>		65
<i>Essais sur le terrain en République togolaise</i>		65
5.1	Introduction	65
5.2	Zones d'études et cadre géologique	67
5.2.1	Cadre géologique.....	67
5.2.2	Zones d'études.....	70
5.3	Méthodologie de collecte	73
5.3.1	Travaux de terrain	73
5.3.2	Inventaire des données collectées.....	74
5.3.3	Compilation des données.....	75
5.3.4	Quelques facteurs limitatifs.....	75
5.4	Traitement des données.....	76

5.5	Analyse des données de susceptibilité	80
5.5.1	Susceptibilité dans la zone nord-est	81
5.5.2	Susceptibilité dans la zone sud-ouest	86
5.6	Apport des données de susceptibilités magnétiques	92
<i>CHAPITRE 6</i>		94
<i>Discussion et conclusion</i>		94
6.1	Sommaire	94
6.2	Lien intrinsèque entre la géologie et le champ magnétique	95
6.3	Possibilités de transposition de la méthode en zone intertropicale	96
<i>Bibliographie</i>		98
<i>Annexes</i>		110

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : DIAGRAMME SCHÉMATIQUE ILLUSTRANT LE PROBLÈME D'INVERSION. CHOUTEAU ET AL. (2011).....	3
FIGURE 2 : LOCALISATION DES DEUX ZONES D'ÉTUDES DANS UN FOND DE CARTE DES PROVINCES GÉOLOGIQUES DU QUÉBEC. MODIFIÉ DE THÉRIAULT ET AL. (2012).....	8
FIGURE 3 : CARTE GÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDES 1. MODIFIÉ DE THÉRIAULT ET AL. (2012).....	18
FIGURE 4 : CARTE GÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDES 2. MODIFIÉ DE THÉRIAULT ET AL. (2012).....	21
FIGURE 5 : ÉLÉMENTS DU CHAMP MAGNÉTIQUE: L'INCLINAISON I , LA DÉCLINAISON D ET LA FORCE DU CHAMP MAGNÉTIQUE TOTAL F . REYNOLD (1997).....	23
FIGURE 6 : VECTEUR CHAMP MAGNÉTIQUE TOTAL DÉFINIT SUIVANT (A) UNE COMPOSANTE ORTHOGONALE VERTICALE ET DEUX COMPOSANTES ORTHOGONALES HORIZONTALES (NORD ET EST);OU (B) UNE GRANDEUR SCALAIRE DU CHAMP MAGNÉTIQUE TOTAL, F LA DÉCLINAISON, D SUIVANT LE NORD GÉOGRAPHIQUE; ET L'INCLINAISON I SUIVANT LA COMPOSANTE HORIZONTALE. REEVES (2005)	24
FIGURE 7 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES LIGNES DE FLUX MAGNÉTIQUE AUTOUR D'UN BARREAU AIMANTÉ. REYNOLD (2011).....	25
FIGURE 8 : LE MAGNÉTOMÈTRE AÉROPORTÉ MESURE LA SOMME VECTORIELLE DU CHAMP GÉOMAGNÉTIQUE AMBIANT ET LA CONTRIBUTION D'UNE OU DE PLUSIEURS SOURCES ANOMALES EN UN POINT DONNÉ. REEVES (2005).....	25
FIGURE 9 : REPRÉSENTATION VECTORIELLE DES COMPOSANTES DU CHAMP : CHAMP GÉOMAGNÉTIQUE INTERNATIONAL DE RÉFÉRENCE, F_{IGRF} (OU <i>INTERNATIONAL GEOMAGNETIC REFERENCE FIELD, IGRF</i>); CHAMP GÉOMAGNÉTIQUE OBSERVÉ, $F_{OBSERVÉ}$ ET LA COMPOSANTE ANOMALE DU CHAMP GÉOMAGNÉTIQUE TERRESTRE, ΔF . REEVES (2005).....	28
FIGURE 10 : SOMMATION VECTORIELLE DES INTENSITÉS INDUITE (J_I) ET RÉMANENTE (J_R) DE L'AIMANTATION. J EST L'AIMANTATION RÉSULTANTE ET H , LE CHAMP APPLIQUÉ. REYNOLD (2011).....	30
FIGURE 11 : ORGANIGRAMME DE TRAITEMENT DE DONNÉES	37
FIGURE 12 : IMAGE COMPOSITE DU CHAMP MAGNÉTIQUE TOTAL RÉSIDUEL DANS LA ZONE D'ÉTUDES 1	48
FIGURE 13 : CARTE GÉOLOGIQUE SUPERPOSÉE SUR LE CHAMP MAGNÉTIQUE TOTAL RÉSIDUEL DANS LA ZONE D'ÉTUDES 1	48

FIGURE 14 : (A) CHAMP MAGNÉTIQUE TOTAL RÉSIDUEL DE LA ZONE 1 QUÉBÉCOISE, (B) RÉDUCTION AU PÔLE, (C) PROLONGEMENT VERS LA HAUT À 250M; (D) PROLONGEMENT VERS LA HAUT À 1KM, (E) PROLONGEMENT VERS LA HAUT À 2,5KM, (F) PROLONGEMENT VERS LA HAUT À 10 KM.....	50
FIGURE 15 : (A) CHAMP MAGNÉTIQUE TOTAL RÉSIDUEL RÉDUIT AU PÔLE DE LA ZONE 1 QUÉBÉCOISE, (B) DÉRIVÉE VERTICALE, (C) DÉRIVÉE HORIZONTALE SUIVANT X; (D) DÉRIVÉE HORIZONTALE SUIVANT Y	51
FIGURE 16 : MODÈLE 3D DE LA ZONE D'ÉTUDES 1 MONTRANT DES ISOSURFACES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE ÉLEVÉE	53
FIGURE 17 : RÉSULTAT DE L'INVERSION MAGNÉTIQUE NON CONTRAINTE. A) SECTION HORIZONTALE À 5 KM DE PROFONDEUR SOUS LA SURFACE; B) VUE DE PROFIL (VUE DE L'EST) À 68000 M. C) VUE DE PROFIL (VUE DE L'EST) À 640000 M	54
FIGURE 18 : IMAGE COMPOSITE DU CHAMP MAGNÉTIQUE TOTAL RÉSIDUEL DANS LA ZONE D'ÉTUDES 2	56
FIGURE 19 : CARTE GÉOLOGIQUE SUPERPOSÉE SUR LE CHAMP MAGNÉTIQUE TOTAL RÉSIDUEL DANS LA ZONE D'ÉTUDES 2	57
FIGURE 20 : (A) CHAMP MAGNÉTIQUE TOTAL RÉSIDUEL DE LA ZONE 2 QUÉBÉCOISE, (B) RÉDUCTION AU PÔLE, (C) PROLONGEMENT VERS LA HAUT À 250M; (D) PROLONGEMENT VERS LA HAUT À 1KM, (E) PROLONGEMENT VERS LA HAUT À 2,5KM, (F) PROLONGEMENT VERS LA HAUT À 10 KM.....	59
FIGURE 21 : (A) CHAMP MAGNÉTIQUE TOTAL RÉSIDUEL RÉDUIT AU PÔLE DE LA ZONE 2 QUÉBÉCOISE, (B) DÉRIVÉE VERTICALE, (C) DÉRIVÉE HORIZONTALE SUIVANT X; (D) DÉRIVÉE HORIZONTALE SUIVANT Y	60
FIGURE 22 : MODÈLE 3D DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE DE LA ZONE 2 QUÉBÉCOISE	62
FIGURE 23 : MODÈLE 3D ZONE 2 MONTRANT DES ISOSURFACES DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE	63
FIGURE 24 : CARTE DE LA GÉOLOGIE SIMPLIFIÉE DU TOGO MONTRANT LES GRANDS ENSEMBLES GÉOLOGIQUES ET LES DEUX ZONES D'ÉTUDES. MODIFIÉ DE AFFATON ET AL. (1980).....	68
FIGURE 25 : CARTE DE LOCALISATION DE LA ZONE D'ÉTUDES NORD-EST DE LA RÉGION DE LA KARA (FEUILLE KARA AU 1/200 000 ^E).....	71
FIGURE 26 : CARTE DE LOCALISATION DE LA ZONE D'ÉTUDES SUD-OUEST DE LA RÉGION DES PLATEAUX (FEUILLE ATAKPAMÉ AU 1/200 000 ^E).....	72
FIGURE 27 : DISTRIBUTION DE LA SUSCEPTIBILITÉ DANS LA ZONE D'ÉTUDES NORD-EST (LIGNES NOIRES RECTILIGNES : PROFILS; LIGNE NOIRES COURBES : COURBES DE NIVEAU).	77
FIGURE 28 : CARTE GÉOLOGIQUE SUPERPOSÉE SUR LA CARTE DE SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE, ZONE D'ÉTUDES NORD-EST DU TOGO.	78

FIGURE 29 : DISTRIBUTION DE LA SUSCEPTIBILITÉ DANS LA ZONE SUD-OUEST (A) ET LA CARTE GÉOLOGIQUE SUPERPOSÉE SUR LA CARTE DE SUSCEPTIBILITÉ (B).....	79
FIGURE 30 : DISTRIBUTION DES SUSCEPTIBILITÉS MAGNÉTIQUES EN FONCTION DE LA LITHOLOGIE DANS LA ZONE D'ÉTUDES NORD-EST; SUSCEPTIBILITÉS MESURÉE AU KT-20 À 10 KHz (10^{-3} SI).....	83
FIGURE 31 : DISTRIBUTION DES SUSCEPTIBILITÉS MAGNÉTIQUES EN FONCTION DE LA LITHOLOGIE DANS LA ZONE D'ÉTUDES NORD-EST; SUSCEPTIBILITÉS MESURÉES AU KT-20 À 100 KHz (10^{-3} SI)...	84
FIGURE 32 : HISTOGRAMMES MONTRANT LA DISTRIBUTION DE LA SUSCEPTIBILITÉ MESURÉE SUR AFFLEUREMENTS DE ROCHES AU KT-20 À 10 KHz (10^{-3} SI) (À GAUCHE) ET AU KT-20 À 100 KHz (10^{-3} SI) (À DROITE) DANS LA ZONE D'ÉTUDES NORD-EST.....	85
FIGURE 33 : DISTRIBUTION DES SUSCEPTIBILITÉS MAGNÉTIQUES EN FONCTION DE LA LITHOLOGIE DANS LA ZONE D'ÉTUDES SUD-OUEST; SUSCEPTIBILITÉS MESURÉES AU KT-20 À 10 KHz (10^{-3} SI)...	89
FIGURE 34 : DISTRIBUTION DES SUSCEPTIBILITÉS MAGNÉTIQUES EN FONCTION DE LA LITHOLOGIE DANS LA ZONE D'ÉTUDES SUD-OUEST; SUSCEPTIBILITÉS MESURÉES AU KT-20 À 100 KHz (10^{-3} SI). 90	
FIGURE 35 : HISTOGRAMMES MONTRANT LA DISTRIBUTION DE LA SUSCEPTIBILITÉ MESURÉE SUR AFFLEUREMENTS DE ROCHES AU KT-20 À 10 KHz (10^{-3} SI) (À GAUCHE) ET AU KT-20 À 100 KHz (10^{-3} SI) (À DROITE) DANS LA ZONE D'ÉTUDES SUD-OUEST.....	91

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : COORDONNÉES GÉOGRAPHIQUES, EN DEGRÉS DÉCIMAUX, DES SOMMETS DES DEUX ZONES D'ÉTUDES.....	6
TABLEAU 2 : SUSCEPTIBILITÉ DES ROCHES ET DES MINÉRAUX (UNITÉS EN SI); (SOURCES : PARASNIS (1986), SHARMA (1986) ET TELFORD ET AL. (1990)). MODIFIÉ DE REYNOLDS (1997)	31
TABLEAU 3 : KILOMÉTRAGE ANNUEL DE LEVÉS MAGNÉTOMÉTRIQUES SELON LES APPLICATIONS (SOURCES : SEG, RAPPORTS SPÉCIAUX SUR L'ACTIVITÉ GÉOPHYSIQUE INTERNATIONALE EN 1989, 1990 ET 1991). MODIFIÉ DE ALLARD ET AL. (1999).....	38
TABLEAU 4 : LEVÉS AÉROMAGNÉTIQUES À L'ÉCHELLE MONDIALE (EN KM) (REFORD, 1996)	39
TABLEAU 5 : PARAMÈTRES DE MAILLAGE DE LA ZONE D'ÉTUDES 1 (VOLUME ACTIF)	55
TABLEAU 6 : PARAMÈTRES DE MAILLAGE DE LA ZONE D'ÉTUDES 2 (VOLUME ACTIF)	63
TABLEAU 7 : COORDONNÉES DES SOMMETS DE LA ZONE D'ÉTUDES NORD-EST (RÉGION DE LA KARA) .	71
TABLEAU 8 : COORDONNÉES DES SOMMETS DE LA ZONE D'ÉTUDES SUD-OUEST (RÉGION DES PLATEAUX)	72
TABLEAU 9 : INVENTAIRES DES DONNÉES COLLECTÉES AU NIVEAU DES DEUX ZONES D'ÉTUDES.	74
TABLEAU 10 : RÉSULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE DE LA SUSCEPTIBILITÉ MESURÉE À LA 10 KHz (10^{-3} SI), ZONE NORD-EST.	81
TABLEAU 11 : RÉSULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE DE LA SUSCEPTIBILITÉ MESURÉE À LA 100 KHz (10^{-3} SI), ZONE NORD-EST.	82
TABLEAU 12 : RÉSULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE DE LA SUSCEPTIBILITÉ MESURÉE AU KT-20 À LA 10 KHz (10^{-3} SI) DE LA ZONE SUD-OUEST.	87
TABLEAU 13 : RÉSULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE DE LA SUSCEPTIBILITÉ MESURÉE AU KT-20 À LA 100 KHz (10^{-3} SI) DE LA ZONE SUD-OUEST.	88

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A - BASE DE DONNÉES DES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉS MAGNÉTIQUES APPARENTES, PRISES SUR AFFLEUREMENTS AU KT-20 (10^{-3} SI) À 10KHZ ET À 100KHZ (ZONE D'ÉTUDES NORD-EST).....	111
ANNEXE B - BASE DE DONNÉES DES MESURES, DE SUSCEPTIBILITÉS MAGNÉTIQUES, PRISES SUR AFFLEUREMENTS AU KT-20 (10^{-3} SI) À 10KHZ ET À 100KHZ (ZONE D'ÉTUDES SUD-OUEST).....	117
ANNEXE C – IMAGES DES ÉCHANTILLONS DE ROCHES DE LA ZONE D'ÉTUDES NORD-EST (RÉGION DE LA KARA, RÉPUBLIQUE TOGOLAISE).....	129
ANNEXE D – IMAGES DES ÉCHANTILLONS DE ROCHES DE LA ZONE DU SUD-OUEST (RÉGION DES PLATEAUX, RÉPUBLIQUE TOGOLAISE).....	130
ANNEXE E - IMAGES DES ÉCHANTILLONS DE ROCHES DE LA ZONE SUD-OUEST (RÉGION DES PLATEAUX, RÉPUBLIQUE TOGOLAISE).....	131
ANNEXE F - CARTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE DE LA ZONE D'ÉTUDES DU SUD-OUEST (RÉGION DES PLATEAUX, RÉPUBLIQUE TOGOLAISE) SUPERPOSÉE D'UNE IMAGE DE SUSCEPTIBILITÉS MAGNÉTIQUES MESURÉES MONTRANT LES ZONES DE FORTES ET FAIBLES SUSCEPTIBILITÉS MAGNÉTIQUES.....	132
ANNEXE G - CARTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE DE LA ZONE D'ÉTUDES SUD-OUEST (RÉGION DES PLATEAUX, RÉPUBLIQUE TOGOLAISE) MONTRANT LES POINTS DE MESURES.....	133
ANNEXE H - CARTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE DE LA ZONE D'ÉTUDES SUD-OUEST DU TOGO MONTRANT LES SUSCEPTIBILITÉS MAGNÉTIQUES MESURÉES AU KT-20 À LA FRÉQUENCE DE 10KHZ (10^{-3} SI).....	134
ANNEXE I - CARTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE DE LA ZONE D'ÉTUDES NORD-EST DU TOGO MONTRANT LES POINTS DE MESURES.....	135
ANNEXE J - CARTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE DE LA ZONE D'ÉTUDES NORD-EST DU TOGO MONTRANT LES SUSCEPTIBILITÉS MAGNÉTIQUES MESURÉES AU KT-20 À LA FRÉQUENCE DE 10KHZ (10^{-3} SI).....	136

RÉSUMÉ

Les roches de la croûte terrestre peuvent être caractérisées par des propriétés physiques telles que la susceptibilité magnétique, la densité, la résistivité électriques mesurables. Les méthodes géophysiques sont dédiées pour mesurer le contraste de ces propriétés à l'intérieur de la terre qui représente entre autres une variation de la géologie structurale. Le développement des nouveaux outils et de nouvelles techniques d'acquisition de données géophysiques permettent d'accroître considérablement la qualité/quantité des données et, d'autres part, de diminuer les coûts d'exploitation et le temps de mise en œuvre. Ces données au-delà de leur qualité, nécessitent toutefois des traitements adéquats pour être utilisables pour l'interprétation géologique.

La carte géologique représente une fenêtre de la structure interne de la terre qui est le premier outil utilisé dans l'exploration des ressources naturelles. Actuellement, l'industrie minière est dans sa recherche des solutions aux difficultés liées notamment à la raréfaction et/ou l'épuisement des ressources naturelles de proche surface. Du fait que la majorité de la surface de la terre est recouverte par les sédiments et végétation, il est important de valoriser d'autres technologies à cartographier la géologie à travers cette couverture. Nous avons traité les données magnétiques aéroportées afin d'interpréter la géologie de deux zones d'études ciblées sur le territoire du Québec. Nous avons par la suite fait une inversion non contrainte de ces données provenant du Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, utilisé le logiciel VOXI (*Geosoft de Oasis montaj*).

Parallèlement, des traitements et des analyses de données de susceptibilité magnétique mesurées, sur le terrain en République Togolaise, ont été effectués sur deux zones. Une corrélation entre la répartition spatiale de la susceptibilité magnétique en lien avec les unités géologiques a démontré dans ce mémoire de maîtrise.

Le but ultime de cette recherche était de traiter les données de surface, exemple des données magnétiques aéroportées au Québec, puis suivit par des inversions de ces données afin de déterminer une distribution tridimensionnelle de susceptibilité magnétique qui a un lien intrinsèque avec la géologie souterraine. Cette pratique de la cartographie géologique en trois dimensions sera transposable en zone intertropicale, par exemple en Togo.

Mots clés : levés aéromagnétiques, traitement d'images, inversion non contrainte, cartographie géologique.

ABSTRACT

The rocks of the earth's crust can be characterized by physical properties such as magnetic susceptibility, density, electrical resistivity. Geophysical methods dedicate to measure the contrast of these properties within the earth, which represent variations in structural geology. The development of new geophysical data acquisition tools and techniques can significantly increase the quality / quantity of data and, on the other hand, reduce operating costs and implementation time. These data beyond their quality nevertheless require adequate treatments to be useful for geological interpretation purpose.

The geological map is as a window of the internal structure of the earth, which is the first tool used in the exploration of natural resources. Currently, the mineral industry is searching for solutions to the difficulties related in particular to the scarcity and / or depletion of natural resources near surface. Since the majority of the surface of the earth is covered by sediment and vegetation, it is important to enhance new technologies mapping geology through this cover. We proceeded airborne magnetic data to interpret the geology of two study areas targeted on the territory of Quebec. We have subsequently made an unconstrained inversion of these data that come from the Ministère d'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, using VOXI software (Geosoft- Oasis montaj).

At the same time, measurements and analyzes of magnetic susceptibility data measured on the ground in the Togolese Republic were carried out in two zones. A correlation between the spatial distributions of magnetic susceptibility with the geological units has been demonstrated in present master thesis.

The ultimate goal of this research was to treat surface data, an example of magnetic airborne magnetic data in Quebec, and then followed by inversions of these data in order to determine a three-dimensional distribution of magnetic susceptibility that has an intrinsic link with underground geology. This practice of geological mapping in three dimensions will be transposable in intertropical zones, for example in Togo.

Key words: aeromagnetic surveys, image processing, unconstrained inversion, geological mapping

LISTE DES VARIABLES

A	Signal analytique
AGC	Control de gain automatique
AIGA	Association internationale de Géomagnétisme et d'Aéronomie
ASTER	<i>Advanced Spacebone Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
B	Flux d'induction magnétique
BCEI	Bureau canadien de l'éducation internationale
CGC	Commission géologique du Canada
CGS	Centimètre gramme seconde
DGMG	Direction générale des Mines et de la Géologie
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
EUMC	Comité de l'Entraide Universitaire Mondiale du Canada
F	Champ magnétique terrestre
GDEM	<i>Global Digital Elevation Model</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
H	Intensité d'un champ magnétique
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
Ji	Aimantation induite
Jr	Aimantation rémanente
J	Aimantation résultante
MME	Ministère des Mines et de l'Énergie
MTN	Modèle numérique de terrain
nT	<i>Nano Tesla</i>
PCBF	Programme canadien de bourses de la Francophonie
SI	Système international

SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
T	<i>Tesla</i>
T	Amplitude de l'intensité du champ total
TDR	<i>Total derivative</i>
THDR	<i>Total horizontal derivative</i>
TMI	<i>Total Magnetic Intensity</i>
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
USB	Unité structurale du Buem
USP	Unité structurale de la plaine bénino-togolaise
VDR	<i>Vertical derivative</i>

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Contexte de l'étude

Les méthodes utilisées en géophysique appliquée se sont diversifiées dans plusieurs domaines d'application. Elles sont de plus en plus sollicitées dans l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles (mines, pétrole et gaz), l'hydrogéologie, le génie civil, l'archéologie, la gestion environnementale entre autres.

Le monde contemporain de l'industrie minérale fait face à des défis majeurs. En effet, les ressources naturelles, en particulier celles de proche surface, s'épuisent et/ou se raréfient. L'industrie minérale s'oriente dorénavant, au-delà des zones déjà conquises, vers des zones géologiques plus ou moins complexes (par exemple, formations géologiques plissées et faillées, régions à couvert végétal dense). En plus, les zones profondes de la croûte terrestre constituent de nouvelles cibles où la découverte des gisements exploitables devient un défi majeur (Boszczuk, Cheng, Hammouche, Roy, Lacroix et Cheillett, 2011). Les coûts d'exploration et d'exploitation afférents connaissent une hausse.

La nécessité de développer et d'améliorer, de façon continue, les nouvelles méthodes, techniques et outils d'exploration et d'exploitation des ressources naturelles est au cœur des préoccupations des acteurs du domaine. En effet, au cours des dernières années, des techniques et pratiques tous azimuts voient le jour; dont l'objectif est de rentabiliser l'exploration et l'exploitation de ces ressources à travers la réduction des coûts et du temps.

La géophysique appliquée à la prospection minière permet d'aborder les problèmes suivant trois approches classiques (Allard et Bois, 1999) : (i) l'approche directe utilise une ou plusieurs méthodes géophysiques pour détecter directement les minéraux dans les formations géologiques; (ii) l'approche indirecte, comme son nom l'indique, s'applique lorsque la détection directe se révèle impossible, on procède alors par association; (iii) l'approche cartographique, est beaucoup plus transversale et permet de faire face aux défis contemporains liés à l'exploration minière. Conventionnellement cette dernière approche en deux dimensions permet de délimiter les contacts géologiques, de localiser les éléments structuraux et d'identifier certaines formations géologiques. Avec l'avancement de la technologie informatique, il est possible d'extraire les informations dans la troisième dimension et donc d'estimer le volume d'une cible recherchée.

Les méthodes géophysiques se basent sur la différence des propriétés physiques des roches (densité, susceptibilité, conductivité, résistivité, vitesse de propagation des ondes) et leur distribution dans l'espace. Elles sont utilisées à la fois comme outils de détection directe des gisements (exploration minière dans certaines situations idéales) et outils de recherche indirecte (hydrocarbures, eaux, études environnementales).

Parvenir à réaliser une carte géologique moins évasive, qui puisse renseigner au mieux sur la nature et les caractéristiques des formations géologiques en intégrant les informations des propriétés physiques, peut constituer un outil indispensable pour une investigation réussie de la croûte terrestre superficielle, semi-profonde ou profonde. Il sera question d'améliorer la qualité des données par divers procédés de traitement (filtrages, transformations des images 2D), et déterminer la distribution en trois dimension d'une propriété physique par la méthode d'inversion (figure 1).

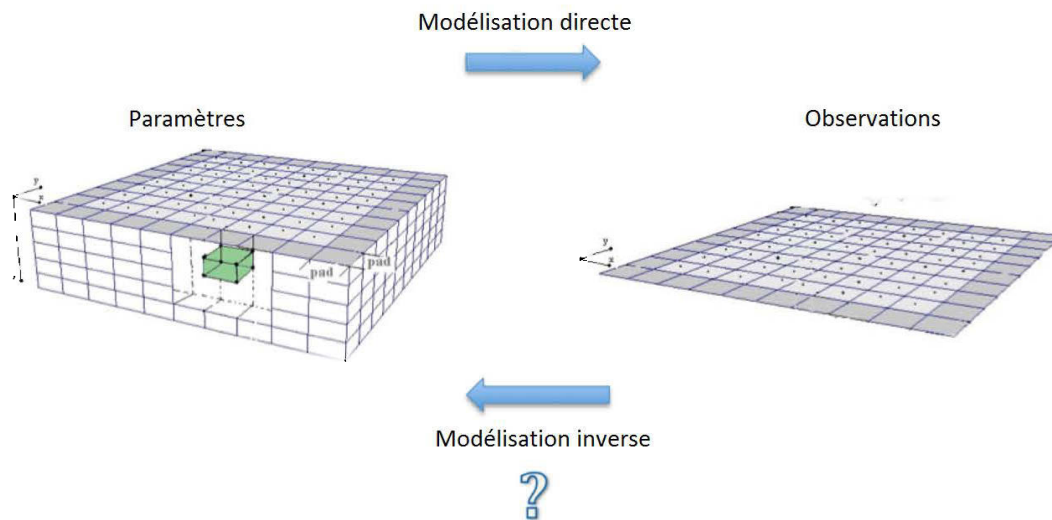


Figure 1 : Diagramme schématisant la procédure d'interprétation des données géophysiques. Chouteau et al. (2011).

1.2 Problématique et cadre du mémoire

Mise à part les travaux de recherche universitaires qui sont réalisés de façon sporadique sur l'ensemble du territoire togolais, les derniers travaux ayant conduit à la réalisation de la carte géologique IGN au 1/500 000^e (Carte géologique du Togo, 1^{ère} édition, 1986) de l'ensemble du territoire et de cinq coupures de feuilles au 1/200 000^e datent des années 80. Par ailleurs, le Canada en général et la province du Québec en particulier, fait partie des pays développant continuellement des techniques et des technologies dans le domaine de la recherche et de l'exploration; la preuve, la dernière mise à jour de la carte géologique de la province du Québec date de 2012 (Carte géologique du Québec - Édition 2012) (Thériault et Beauséjour, 2012). Dans

cette nouvelle édition, les résultats des nombreux levés géophysiques effectués sur l'ensemble du territoire québécois ont été incorporés, augmentant ainsi, et de façon considérable, le niveau de détail de la géologie et améliorant le niveau de précision de la localisation des failles et des zones géologiques. Cette nouvelle carte géologique sert d'outil promotionnel pour la diffusion de la connaissance géologique du territoire québécois, à l'intention des institutions scolaires et universitaires, des centres de recherche ainsi que du grand public (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERNQ)).

La mise à jour de la carte géologique est faite par la compilation des données géophysiques des travaux de la Commission géologique du Canada (CGC), et celles du Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERNQ). L'expérience québécoise s'avère indispensable, d'où l'exploitation des données publiques de levés aéroportées DP-2006-07 (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, MERNQ, 2006) pour les besoins du présent mémoire. Parallèlement, d'autres travaux de collecte de données de susceptibilité magnétique, de conductivité et de densité ont été effectués sur deux zones d'études situées en République togolaise, l'objectif de ces travaux est d'étudier le lien intrinsèque entre ces propriétés physiques et la géologie.

1.3 Objectifs de l'étude

Les travaux de cartographie géologique, notamment ceux réalisés à petite échelle, se basent sur des grilles grossières (extrapolations et interpolations), et sont donc insuffisants pour une bonne connaissance des zones géologiquement complexes (métamorphisme, magmatisme, plissement, fracturation). En outre, il est difficile de faire la cartographie géologique sur des formations partiellement ou entièrement couvertes (peu ou pas d'affleurements) et surtout difficile d'avoir accès à l'information des parties profondes de la croûte terrestre. Ceci étant, l'expression

« *Géophysique pour les géologues* » trouve son sens dans l'utilisation des méthodes géophysiques multiples pour l'optimisation des travaux de cartographie géologique, soubassement de toute exploration et/ou exploitation des ressources naturelles.

L'objectif principal de la présente étude est de vérifier l'adéquation de méthode aéromagnétique à la cartographie géologique en particulier à une échelle plus ou moins régionale de deux zones localisées sur le territoire du Québec; ultimement, à estimer la possibilité de transfert de la pratique en République togolaise.

Dans le cas de ce mémoire, deux objectifs spécifiques sont poursuivis :

- premièrement, il est question d'identifier les différentes zones anomales par des procédés adéquats de traitements en 2D sur les zones d'études dont les données de levés magnétiques aéroportées publiques (DP-2006-07, MERNQ) sont disponibles; et
- deuxièmement, outre les traitements 2D, il sera question d'analyser la géométrie des formations géologiques spécifiques et des contacts géologiques à partir des anomalies magnétiques. La technique utilisée dans cette partie est l'inversion non contrainte, puisque nous ne disposons pas de modèle géologique.

Tout ceci permettra à terme d'évaluer l'applicabilité de la méthode magnétique dans la réalisation de la cartographie géologique et d'élaborer une relation entre la susceptibilité magnétique et les unités et/ou structures géologiques par analyse géostatistique.

1.4 Plan du mémoire

Le présent mémoire s'articule autour de six chapitres y compris la présente introduction. Le chapitre deux est consacré à la synthèse des connaissances de base sur la géologie du Québec en générale et celle des zones d'études en particulier. Le

troisième chapitre de ce mémoire aborde de façon succincte la littérature consacrée aux développements récents des méthodes de potentiels (magnétométrie), essentiellement dans leur composante aéroportée, et leurs applications à l'exploration et à l'exploitation des ressources naturelles suivant l'approche cartographique. Ce chapitre décrit également le principe de magnétisme, ainsi que la méthodologie de traitement des données et la méthode d'inversion non contrainte. Les données, les résultats, l'analyse et l'interprétation des résultats sont présentés dans le chapitre quatre. Le chapitre cinq présente les résultats et l'analyse des données de susceptibilité magnétique collectées sur le terrain en République togolaise. En fin, le chapitre six traite la synthèse, discute les résultats du chapitre quatre et dresse la conclusion sur l'ensemble des travaux.

1.5 Localisation de la zone d'études

Dans le cadre des travaux de ce mémoire, les données géophysiques disponibles au Québec ont été utilisées. Deux zones études ont été ciblées (voir figure 2) sur la base des unités géologiques représentées, des accidents géologiques et de la couverture végétale. Les deux zones d'études dont les coordonnées géographiques (voir **Erreur ! Référence non valide pour un signet.**) de chacune des sommets (exprimées en degrés décimaux) se situent dans la région ouest du Québec.

Tableau 1 : Coordonnées géographiques, en degrés décimaux, des sommets des deux zones d'études

Zone	Sommets	LNG	LAT	UTM (NAD83)	Provinces géologiques	Sous- provinces géologiques
Zone1	A1	-79,5	51,5	17	Baie d'Hudson	
	B1	-78,6	51,5		Supérieur	Opatica
	C1	-78,6	50,6			Opinaca
	D1	-79,5	50,6			
Zone2	A2	-78	49,6	18	Supérieur	Abitibi
	B2	-77,1	49,6			
	C2	-77,1	48,7			
	D2	-78	48,7			

géologiques du Québec. Modifié de Thériault et al. (2012).

CHAPITRE 2

MISE EN CONTEXTE GÉOLOGIQUE

En géophysique appliquée, l'interprétation des données se fait suivant deux principales étapes. La première étape consiste en une analyse détaillée et aux traitements des données recueillies tandis que la deuxième consiste en la synthèse des données géologiques et géophysiques (Baranov, 1957). La connaissance de la géologie dans l'espace tridimensionnelle des zones prospectées par l'outil d'exploration géophysique s'avère indispensable.

2.1 Revue de littérature sur la cartographie géologique par les méthodes géophysiques

La magnétométrie est l'une des méthodes géophysiques les plus anciennes (Jakosky, 1950; Telford, Geldart, Sheriff et Keys, 1976; Thompson, 1982; Merrill, 1983; Dubois, 1997; Reynolds, 1997; Reeves, 2005). Bien que trop ancienne, elle reste de nos jours largement utilisée en particulier comme outil de reconnaissance des structures de la croûte terrestre.

Ainsi, les relevés aéromagnétiques, en particulier, cartographient la magnétite dans les formations géologiques sous l'aéronef (Abbass et Mallam, 2013). Bien que ces levés aéromagnétiques soient largement utilisés comme un outil de reconnaissance, il y'a une reconnaissance grandissante de leur potentiel dans l'évaluation des zones prospectives compte tenu de l'information unique qu'ils fournissent (Reeves, 2005; Abbass *et al.*, 2013). Reeves (2005) donne un aperçu du rôle des levés aéromagnétiques: (i) délimitation de ceintures volcano-sédimentaires sous couverture et les terrains fortement métamorphisés; (ii) la reconnaissance et l'interprétation des failles et des zones de cisaillement comme des hôtes potentiels pour une variété de

minéraux, mais aussi comme guide indirect de la minéralisation épigénétique liée aux contraintes dans les roches environnantes; (iii) identification et délimitation des intrusions post-tectoniques dans le cas des complexes syénitiques, des carbonatites zonées, des kimberlites et des intrusions mafiques; (iv) la détection directe des gisements de certains minéraux de fer; et (v) dans le cas particulier de la prospection pétrolière, l'interprétation des données aéromagnétiques permet d'estimer la profondeur du socle rocheux sous couverture et l'étendue du bassin sédimentaire; en se basant sur le fait que les roches sédimentaires exercent un si petit effet magnétique par rapport aux roches ignées (Parasnis, 1986; Dobrin et Savit, 1988; Reynolds, 1997). Les variations d'intensité magnétique mesurable à la surface résultent des changements lithologiques associés au sous-sol ou aux intrusions ignées. Xiong et al. (2016) ont publié la carte aéromagnétique du territoire de la République populaire de Chine à l'échelle de 1 : 1 000 000^e en proposant une nouvelle interprétation des signatures magnétiques en relation avec la géologie régionale.

Les cartes d'anomalies magnétiques, de concert avec les informations géologiques et d'autres données géophysiques, jouent un rôle important dans le décryptage de l'histoire de la Terre et dans la caractérisation des roches de la croûte (Hinze, 1985). Les levés magnétiques servent également à détecter directement la présence de gîtes métalliques (Allard *et al.*, 1999), par exemple des grands gisements de fer du moyen nord québécois et la plupart des amas de sulfures. Les données magnétiques sont utilisées pour cartographier les structures géologiques, en particulier pendant la phase de reconnaissance de l'exploration. Mais lorsqu'elles sont utilisées dans la prospection détaillée, des algorithmes d'inversion robustes et efficaces doivent être utilisés. Cependant, une difficulté principale avec l'inversion des données des méthodes de potentiel est la non-unicité du modèle.

Dans les travaux de cartographie géologique, les cartes magnétiques sont aussi d'une grande utilité (McGrath, 1996). Elles servent à : (i) aider dans le choix de la position

des cheminementes ou des points d'échantillonnage, (ii) mettre en évidence des contacts géologiques où il y a un changement du niveau de magnétisation ce qui pourrait signifier la variation de lithologie et de structure pour l'interprétation de l'histoire géologique d'une région, (iii) mettre en corrélation des éléments observés sur le terrain et situés à une certaine distance les uns des autres, et (iv) construire des modèles géologiques à trois dimensions qui vont permettre d'expliquer la répartition géographique des unités et des éléments structuraux géologiques représentés sur les cartes et d'évaluer les profondeurs qu'atteignent ces éléments structuraux (Peters, 1949; Reford, 1980; Hinze, 1985; Hood, McGrath et Teskey, 1985; McGrath, 1996; Allard *et al.*, 1999). L'interprétation des données magnétiques est précise lorsque l'on a une meilleure connaissance de la géologie du domaine (Allard *et al.*, 1999). Sánchez et al., (2014) ont utilisé la méthode de traitement dite de réduction au pôle (*Reduce-To-Pole, RTP*) des grilles magnétiques pour interpréter des linéaments. Ensuite une comparaison de ces linéaments aéromagnétiques avec les données gravimétriques, géologiques et topographiques a permis de déduire d'importantes structures géologiques régionales contrôlant les occurrences de minéraux hydrothermaux dans les secteurs pauvres en affleurements de la cordillère nord-américaine dans le Yukon et à l'est de l'Alaska. Abbass et al., (2013) ont combiné les imageries de paramètre source et la déconvolution d'Euler pour évaluer la profondeur des roches magnétiques dans les parties inférieures du bassin de Benue et les parties supérieures du bassin d'Anambra au Nigéria. Ces méthodes réussies seront des références pour l'étude de ce mémoire de maîtrise.

2.2 La géologie générale du Québec

Le territoire du Québec, en terme géologique, peut être assimilé au continent nord-américain en miniature où tous les éléments qui forment l'ossature du continent s'y trouvent. Le Bouclier précambrien central est flanqué de deux grandes chaînes de

montagnes, la Cordillère de l'Ouest et les Appalaches. On retrouve tous les éléments qui forment l'ossature du continent : noyau archéen (Province du Supérieur), terrains protérozoïques (fosse de l'Ungava, fosse du Labrador, Province de Grenville), Plate-forme du Saint-Laurent et Appalaches.

Nous faisons, dans cette partie, de la description des provinces géologiques ci-après, l'inventaire détaillé, mais non exhaustif, de la géologie du Québec. Un accent particulier est mis sur les provinces géologiques concernées par les zones d'études ciblées. L'essentiel de ces informations ont été tirées de la Géologie du Québec (Hocq, Dubé et Caty, 1994).

2.3 Les grandes provinces géologiques

Le territoire du Québec est subdivisé géologiquement en sept provinces (figure 2) à savoir le Supérieur, le Nain, le Churchill, le Grenville, les Appalaches, la Plate-forme du Saint-Laurent (PFSL) et la Plate-forme de la baie d'Hudson (PFBH) :

- (1) **La Province archéenne du Supérieur** (2,9 à 2,65 Ga). Elle occupe la plus grande partie du continent nord-américain et couvre près de la moitié de la superficie du Québec soit environ 745 000 km². Elle forme la partie centrale du Bouclier nord-américain. Elle se subdivise en une douzaine de sous-provinces, dont la moitié est située au Québec. La plus connue est la Sous-province de l'Abitibi qui est la plus étendue des ceintures volcano-sédimentaires archéennes au monde et est réputée pour ses gisements de métaux de base. Les roches de la Province du Supérieur sont bordées à l'est par la fosse du Labrador, au nord par la fosse de l'Ungava et au sud par la Province de Grenville.

Ce noyau continental nord-américain est fragmenté en plusieurs blocs continentaux à l'intérieur desquels les océans se sont développés durant leur dispersion puis ces derniers se sont ultérieurement réassemblés grâce au phénomène de subduction-

collision (Dufr  chou, Harris et Corriveau, 2014). Cette province est constitu  e de roches diverses plus anciennes au monde.

(2) La Province de Nain (3,8    1,3 Ga) elle est situ  e majoritairement au Labrador (avec une superficie d'environ 60 000 km²), le long de sa côte est et au Québec où elle couvre à peine 60 km². Elle est constitu  e essentiellement de roches métamorphiques d'âge archéen.

(3) La Province de Churchill (2,1    1,1 Ga) couvre une superficie d'environ 200 000 km² au nord et au nord-est de la Province du Supérieur. Elle se caractérise par quatre zones géologiques distinctes, notamment :

- l'Orogène de l'Ungava ou encore la Fosse de l'Ungava, bordant la Province du Supérieur au nord connu pour ses gisements de nickel-cuivre;
- l'Orogène du Nouveau-Québec (Fosse du Labrador), résultat de la suture par subduction de la Province du Supérieur sous la Zone noyau appel  e avant Province du Rae (James, Connelly, Wasteneys et Kilfoil, 1996; Wardle, James, Scott et Hall, 2002) et dont le sous-sol renferme de grands gisements de fer ainsi que plusieurs gîtes de cuivre, de nickel et d'éléments du groupe du platine;
- la Zone noyau, situ  e entre la fosse du Labrador et l'Orogène des Torngat, qui contient des roches archéennes et paléo-prot  rozo  iques (2,9 à 1,75 Ga) ainsi que des roches plutoniques méso-prot  rozo  iques (1,7 à 1,1 Ga); et
- l'Orogène des Torngat (2,1    1,75 Ga), limit  e, à l'est, par les roches archéennes de la Province de Nain et, à l'ouest, par la Zone noyau. Il est divis  e en domaines et en complexes lithotectoniques qui séparent des zones de cisaillement mylonitiques. Les roches qui le constitue sont principalement des paragneiss mylonitisés, des diatexites granitiques    trames et paragneiss

et des enderbites. Ces roches sont localement coupées entre autres par des kimberlites et qui recèlent un potentiel diamantifère.

- (4) **La Province protérozoïque de Grenville** (2,7 Ga à 600 Ma) couvre une superficie de 600 000 km². La limite entre la Province du Supérieur et la Fosse du Labrador avec le Grenville est appelée le Front de Grenville (FG). Le Grenville se divise en trois grands ensembles de ceintures à savoir le parautochtone, l'allochtone polycyclique et l'allochtone monocyclique séparés les uns des autres par des zones de failles ductiles (Rivers, Martignole, Gower et Davidson, 1989). Il s'agit respectivement de l'ATB, *l'Allochtone Boundary Thrust* ou zone de faille de charriage de l'Allochtone et de la MBBZ, la *Monocyclic Belt Boundary Zone* ou zone de faille de l'Allochtone monocyclique (Rivers, Culshaw, Hynes, Indares, Jamieson et Martignole, 2012). Ces ceintures sont elles-mêmes subdivisées en ensembles de deuxième ordre ou Terrains qui regroupent des entités d'ordre inférieur ou Domaines (Reeves, 2005). L'unité autochtone, formée de roches archéennes des Provinces du Supérieur et de Rae, ainsi que des roches paléo-protérozoïques de la Fosse du Labrador, constitue l'ensemble de roches non déformées et non déplacées par l'orogénie. Les roches dans le parautochtone sont déformées. Les roches de l'allochtone sont des roches métamorphiques. Le transport tectonique s'est fait de façon importante le long d'une grande zone de décollement qui marque la limite entre l'allochtone et le parautochtone. Outre les roches métamorphiques, le Grenville se caractérise par la présence de très grands massifs de roches intrusives, dont un type particulier, l'anorthosite : une roche généralement de teinte noire à grands cristaux composée presque entièrement de plagioclase. La Province de Grenville est reconnue pour ses mines de fer et de titane; son potentiel en minéraux industriels de même que ses pierres architecturales.

- (5) **La Plate-forme du Saint-Laurent** (570 à 430Ma). Elle s'est développée à la fin du Protérozoïque et au Paléozoïque, avec la formation du grabben du Saint-Laurent. Elle couvre une superficie de plus de 30000 km² et repose en discordance sur les formations de la Province de Grenville. Elle est subdivisée en deux plates-formes, à savoir : La plate-forme des Basses-Terres du Saint-Laurent et la plate-forme d'Anticosti.

Sur le plan économique, elle regorge des gisements de calcaire et ceux de niobium, dont le Québec est le deuxième producteur mondial (Mine Niobec, carbonatite injectée dans le Grenville).

- (6) **L'Orogène des Appalaches** (600 à 300 Ma) d'une superficie d'environ 80 000 km², elle s'est développée sur la marge du Bouclier canadien au cours du Paléozoïque au sud de la Province de Grenville. Elle est divisée en trois ceintures distinctes (la zone de Humber; le zone de Dunnage et la ceinture de Gaspé) et bordée à l'est par le bassin permo-carbonifère de Madeleine. Deux événements tectoniques (orogénies taconienne et acadienne) ont affectés les Appalaches au Québec. C'est dans cette province géologique que se situent les gisements de cuivre.
- (7) **La Plate-forme paléozoïque de la Baie-d'Hudson** (450 à 410 Ga) couvre une superficie d'environ 5500km² situé tout juste au sud de la baie James. Elle repose sur la Province du Supérieur avec des roches sédimentaires semblables à celles de la Plate-forme du Saint-Laurent.

2.4 La géologie des zones d'études

Nous avons ciblé deux zones d'études sur le territoire de la province du Québec (figure 2). Elles sont localisées dans la partie sud-ouest et situées dans la Province du Supérieur (PS) et de la Plate-forme de la Baie-d'Hudson (PFBH). La première zone dénommée "zone 1" recouvre presque totalement la PFBH et une partie des sous-

provinces d'Opinaca et d'Opatica du Supérieur (figure 3), tandis que la "zone 2" se situe entièrement dans la Sous-province de l'Abitibi (figure 4).

La Province du Supérieur est subdivisée en une douzaine de sous-provinces (figure 2). Elle est formée dans sa partie méridionale par les sous-provinces méta-sédimentaires du Pontiac, de Nemiscau et d'Opinaca; les sous-provinces volcano-plutoniques de l'Abitibi, d'Opatica et de La Grande; et la sous-province gneissique-plutonique d'Ashuanipi. La partie septentrionale est formée par la sous-province plutonique de Bienville et par la sous-province gneissique-plutonique de Minto. Les signatures aéromagnétiques des sous-provinces méta-sédimentaires d'Opinaca et volcano-plutoniques d'Abitibi, bien que très peu significatives, font l'objet de nos travaux d'interprétation. Il faut noter que les relations structurales entre les sous-provinces du Supérieur sont moins connues au Québec. Les minéralisations connues, dont la plupart se situent dans la sous-province de l'Abitibi, sont des gisements de métaux de base (Cu, Zn, Ni) et d'or.

La sous-province volcano-plutoniques d'Opatica est subdivisée en trois Terrains principaux qui à leur tour sont subdivisés en Domaines : (1) le Terrain méridional est constitué essentiellement d'orthogneiss tonalitiques à granodioritiques. Ces orthogneiss renferment des enclaves d'amphibolites et de paragneiss. Une foliation pénétrante faiblement inclinée vers le nord caractérise ces formations gneisseuses et souligne des structures en forme de dômes aplatis. La tectonique est caractérisée par la présence de cisaillements ductiles précoces hébergeant par endroit des trains de lambeaux d'amphibolites et de métasédiments; (2) le Terrain central correspond à une bande volcanique (ceinture de Frotet-Evans, BVFE). On y trouve des basaltes tholéiitiques, des basaltes komatitiques, de pyroclastites, de pyroxénites, de monzonites, de granodiorites, de péridotites, d'intrusion de gabbro, et quelques rares unités sédimentaires. Le métamorphisme est moyen à élevé avec des faciès de schistes verts et des faciès moyen des amphiboles; et (3) le Terrain septentrional de

l'Opatica est formé essentiellement de gneiss migmatitiques recoupés par des granitoïdes ainsi que des champs de pegmatites. Les paragneiss ont atteints les faciès des amphibolites et localement celui des granulites.

La répartition des trois sous-provinces ci-haut dans la zone 1 est : 30% de la Plate-forme de la Bais-d'Hudson, 40% de l'Opinaca et 30% de l'Opatica. Selon la carte géologique de la zone 1 (figure 3), elle est couverte majoritairement par des bandes (orientées nord-sud) de sédiments calcaires et mudstones paléozoïques (H1, H2, H3) dans la région de Plate-forme de la Bais-d'Hudson; par des métasédiments (étendus est-ouest), des roches intrusives (tonalites, granodiorites) d'âge archéen dans les deux autres sous-provinces. La cartographie géophysique est particulièrement utile dans ce cas-ci pour investiguer la géologie sous la couverture des sédiments.

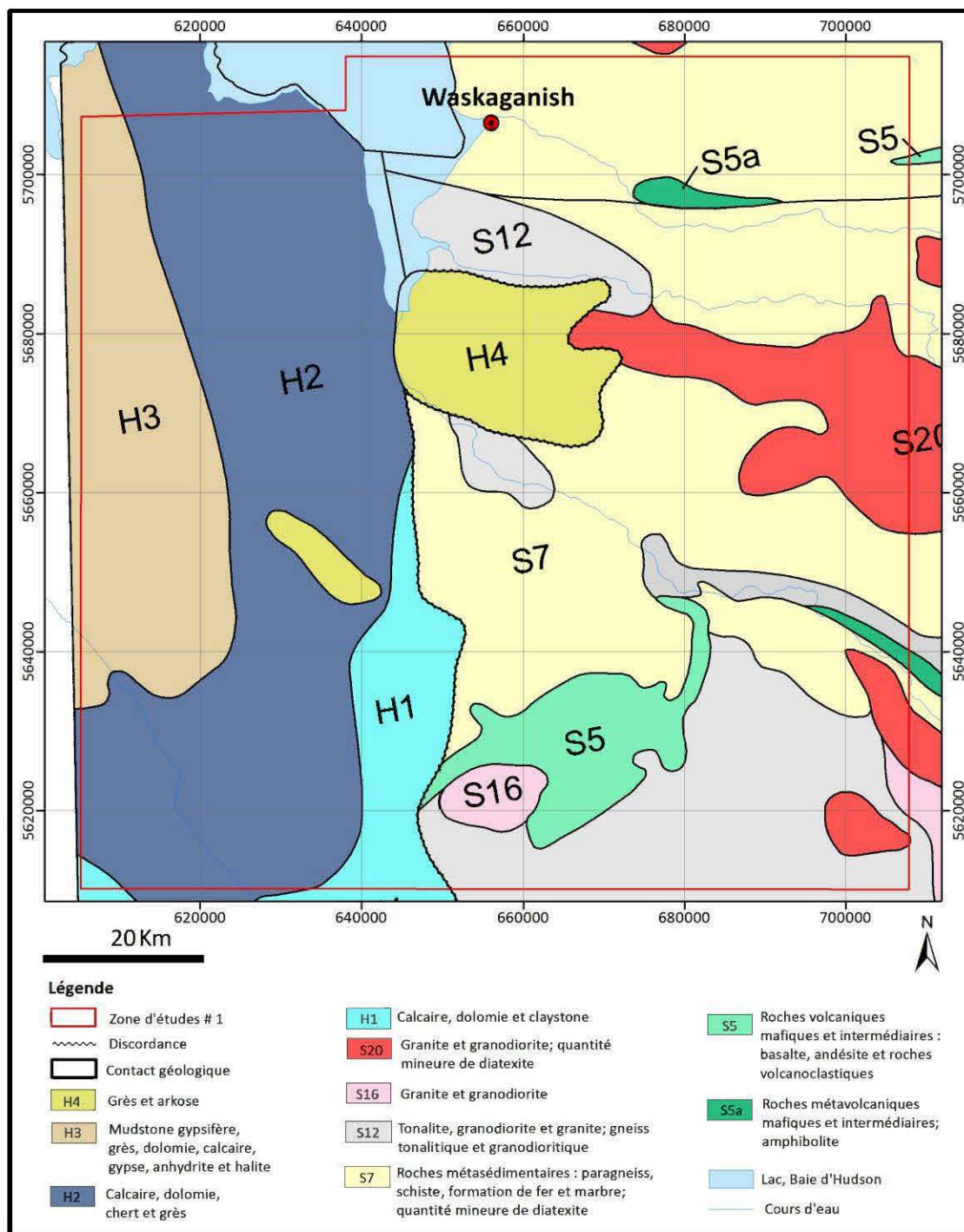


Figure 3 : Carte géologique de la zone d'études 1. Modifié de Thériault et al. (2012).

La ceinture volcano-sédimentaire de l'Abitibi est constituée de granitoïdes divers, de roches volcaniques et de dépôts Quaternaires. Historiquement, la découverte et l'exploitation des premiers gisements en Abitibi-Témiscamingue ont commencé vers la fin des années 1670. Des camps miniers voient le jour au début des années 50 puis des années 80; il s'agit des camps miniers de Rouyn-Noranda, de Chibougamau-Chapais, de Matagami, de Joutel, de Selbaie - Casa-Berardi et de Label-sur-Quévillon avec des associations zinc-cuivre (Zn-Cu) accompagnées d'or (Au) et/ou d'argent (Ag). Le début des années 90 s'affiche avec de nouvelles orientations notamment dans la recherche de diamant à partir de micro-diamants recueillis soit dans le till, soit dans les filons ou de roches apparentées à des kimberlites. Sur le plan géologique, plusieurs modèles de subdivisions ont été proposés. La sous-province de l'Abitibi est subdivisée en zones volcaniques nord (NVZ) et sud (SVZ) (Daigneault, Mueller et Chown, 2002). Plusieurs dizaines de failles ductiles orientées est-ouest, nord-ouest et nord-est parcourent ces formations lithologiques principales de volcanites mafiques et felsiques, de roches sédimentaires et granitoïdes.

Le volcanisme est caractérisé par la présence des coulées volcaniques basaltiques, andésitiques et ultramafiques. Les dépôts de roches pyroclastiques sont généralement de nature andésitique et rhyolitique. Deux types d'empilement volcaniques sont clairement identifiés : (i) le volcanisme de "type plaine de laves" caractérisé par des unités de composition ultramafique (komatiites) à mafique (tholéiites, basaltes andésitiques) et des coulées massives épaisses avec un faible taux de vésicularité; et (ii) le volcanisme de type bimodal avec des coulées de laves recoupées par des intrusions de granitoïdes (tonalite, granodiorite). Les formations récentes, mais peu abondantes, sont essentiellement alcalines et se seraient mise en place le long des failles de Cadillac-Lader-Lake (FCL) et de Desor-Porcupine (FDP); séparant respectivement la NVZ de la SVZ et la SVZ de la sous-province du Pontiac. Les roches plutoniques sont essentiellement granitoïdes d'âge et de nature variés, les

autres formations plutoniques sont des intrusions mafiques reliées au volcanisme basaltique.

Les formations sédimentaires, développées sur un fond marin profond et de nature volcanique, occupent les bassins sédimentaires sous forme de bandes étroites localisées entre les blocs de volcanites. La stratigraphie de ces dépôts, peu métamorphisés, est difficile à établir. On y rencontre des grauweekes, des siltstones, des argilites noires, de conglomérats, des formations de fer de type oxydé à magnétite, chert et japse et des formations de fer de type sulfuré à pyrite.

En plus de la diagenèse, les roches de la sous-province de l'Abitibi sont affectées d'un métamorphisme régional d'âge archéen et de type basse pression (BP) -basse température (BT). Le métamorphisme de contact s'observe dans les unités sédimentaires et dans des volcanites autour de la plupart des plutons de l'Abitibi.

D'importantes anomalies aéromagnétiques s'étendent sur plusieurs kilomètres. Leur épaisseur redoublée par les failles et les plissements, varient de plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres. Dans la bande de Taïbi, un tonnage d'environ 800000t à faible teneur en Fe a été rapporté (Lacroix, Simard, Pilote et Dubé, 1990).

La zone 2 se situe dans la zone volcanique du nord de la ceinture verte d'Abitibi, entre Matagami et Label-sur-Quévillon. Ce sont des roches volcaniques et sédimentaires d'âge archéen qui exposent à la surface (figure 4). L'objectif de recherche dans cette zone est d'étudier la continuation de la géologie de surface vers la profondeur afin de comprendre l'organisation des ensembles litho-structuraux.

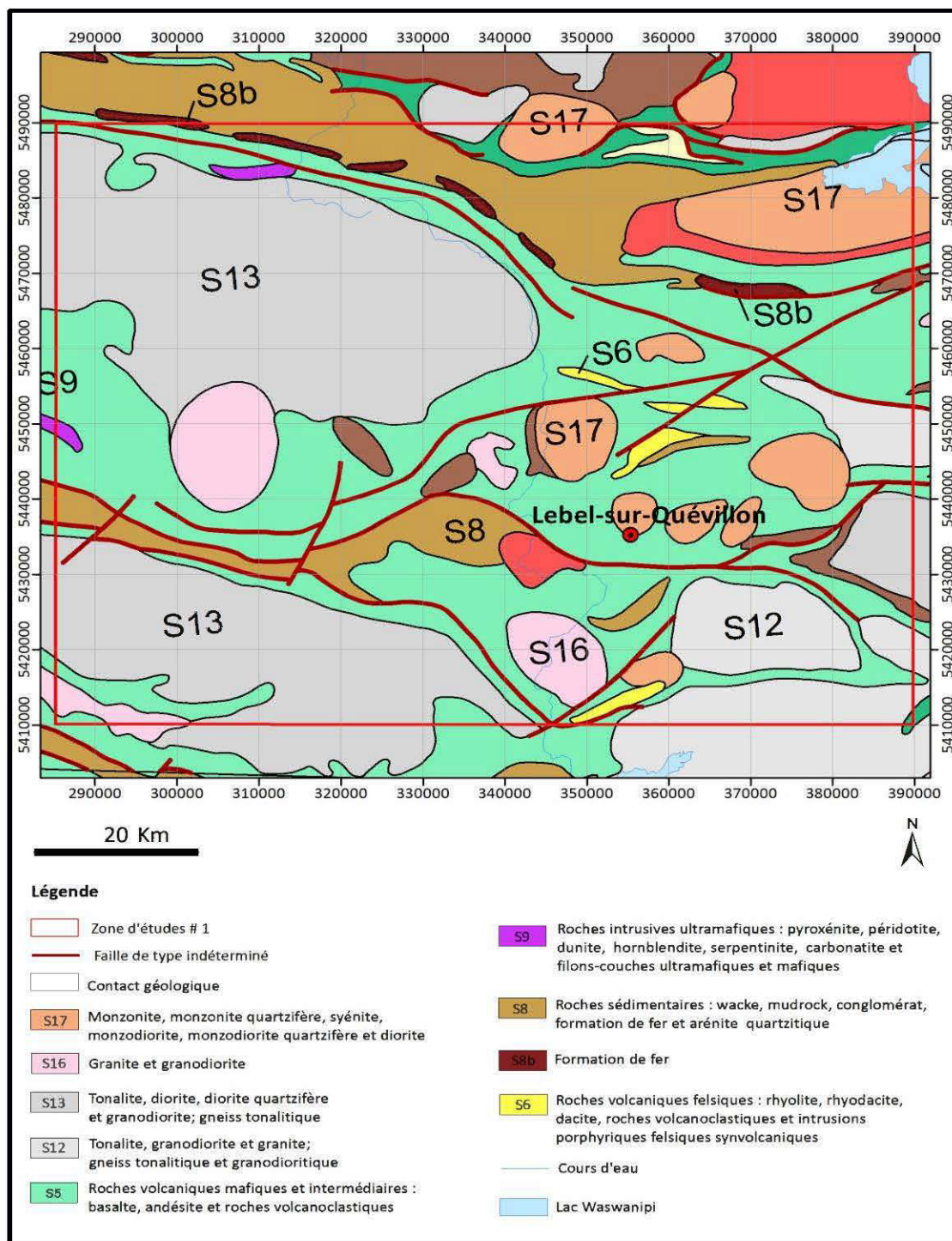


Figure 4 : Carte géologique de la zone d'études 2. Modifié de Thériault et al. (2012).

La sous-province méta-sédimentaire d'Opinaca est située au centre de la Province du Supérieur. Cette sous-province est formée de gneiss, de migmatites, d'amphibolites basaltiques, de pyroclastites felsiques, de péridotites, de tonalite-granodiorite et de monzodiorite. La tectonique est représentée par des grandes structures souples.

La Plate-forme de la Bais-d'Hudson est encore trop peu documentée. La province est néanmoins formée d'unités sédimentaires dont les causes des glaciations ayant conduit à ces dépôts sont encore mal connues. Ces dépôts du Quaternaire sont formés de calcaire, mudstone gypsifère, de grès, de dolomies, de gypse, d'anhydrite, d'halite, de chert, de grès et d'arkose.

CHAPITRE 3

MÉTHODES EN MAGNÉTOMÉTRIE AÉROPORTÉE

La magnétométrie est une des principales méthodes en géophysique appliquée. Elle permet de mesurer le champ magnétique terrestre (intensité du champ) et/ou de ses composantes (figure 5 et figure 6) à l'aide d'un magnétomètre. Les mesures sont effectuées soit sur terre, soit sur la mer, soit dans les trous de forage ou encore dans les airs, le processus est dénommé levés aéromagnétiques.

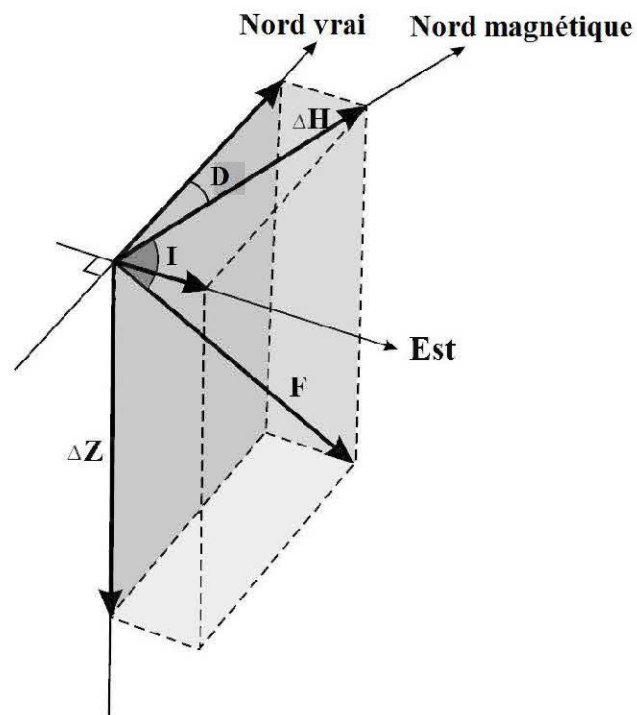


Figure 5 : Éléments du champ magnétique: l'inclinaison I , la déclinaison D et la force du champ magnétique total F . Reynold (1997).

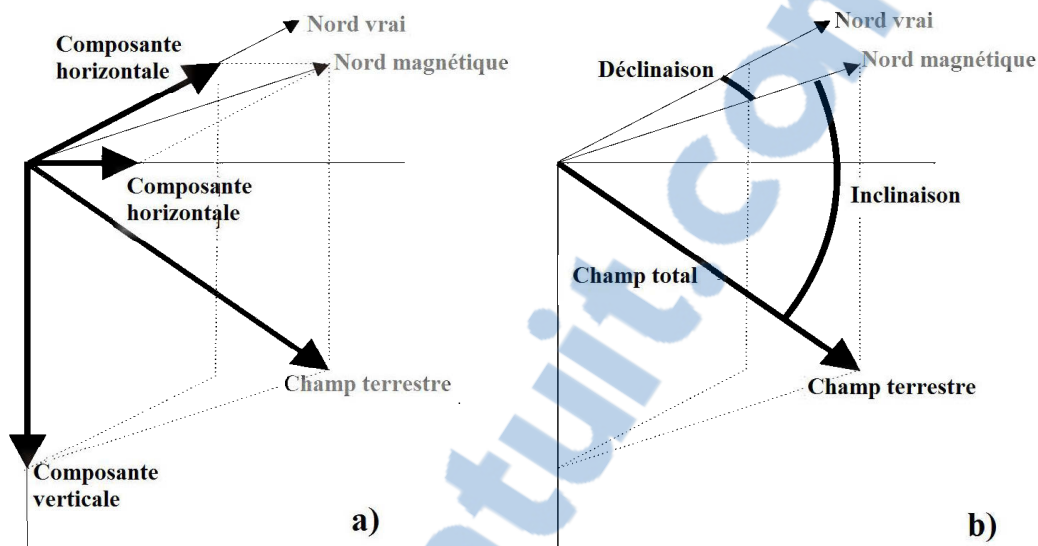


Figure 6 : Vecteur champ magnétique total définit suivant (a) une composante orthogonale verticale et deux composantes orthogonales horizontales (nord et est); ou (b) une grandeur scalaire du champ magnétique total, F la déclinaison, D suivant le nord géographique; et l'inclinaison I suivant la composante horizontale. Reeves (2005).

3.1 Modèle simplifié

En se basant sur un grand nombre d'études en sismologie, en gravité et en géochimie, la structure interne de la terre est définie par trois grandes parties, dont le noyau, le manteau et la croûte terrestre (Frazy, 1967). Le processus de convection permanente dans la partie liquide du noyau (fer, nickel) donne naissance à un champ géomagnétique dipolaire qui ressemble à celui d'un grand aimant aligné approximativement le long de l'axe de rotation de la terre (figure 7). La magnétisation des roches de la croûte terrestre produit les anomalies magnétiques enregistrées lors des levés géomagnétiques (figure 8).

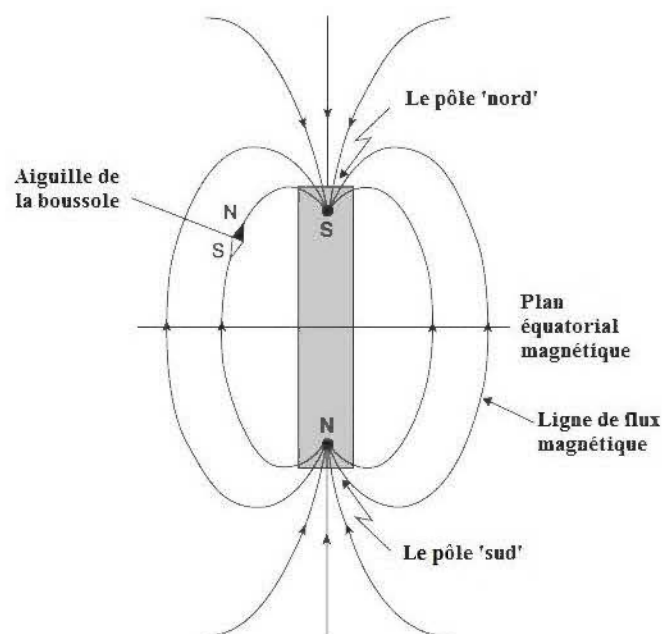


Figure 7 : Représentation schématique des lignes de flux magnétique autour d'un barreau aimanté. Reynold (2011).

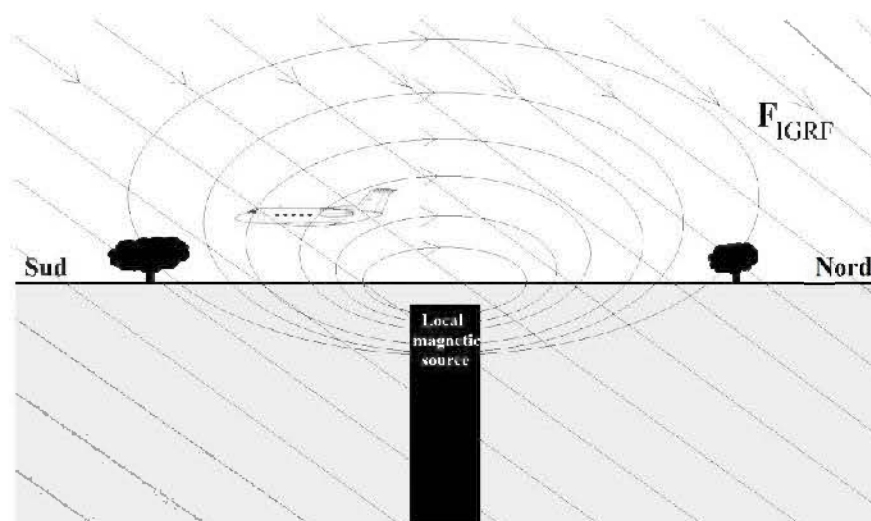


Figure 8 : Le magnétomètre aéroporté mesure la somme vectorielle du champ géomagnétique ambiant et la contribution d'une ou de plusieurs sources anormales en un point donné. Reeves (2005).

3.1.1 Champ géomagnétique et anomalie magnétique

Puisque la magnétisation des roches ne peut pas exister au-dessus de la température de Curie, la variation du champ magnétique est liée étroitement à la nature des roches de la croûte (Hunt, Moskowitz et Banerjee, 1995). Il existe trois types de roches qui agissent de différentes façons dans un champ magnétique (Hinze, 1985). Ce sont : (1) les roches contenant des minerais alignés en sens inverse du champ magnétisant – diamagnétisme, par exemple quartz, calcite, graphite, gypse; (2) les roches contenant de minerais alignés en sens parallèle du champ magnétisant – paramagnétisme, par exemple pyroxène, amphiboles, biotite, grenat; et (3) la plupart de minerais métalliques ayant une aimantation spontanée même en absence d'un champ magnétisant externe - ferromagnétisme. Les minerais ferromagnétiques communs sont la magnétite, l'hématite, l'ilménite et la pyrrhotite. Il est clair que les roches ferromagnétiques ont une plus forte magnétisation donc une susceptibilité élevée.

Le champ magnétique principal est défini en tout point de la surface de la terre par une grandeur vectorielle (Reynolds, 1997; Reeves, 2005). Il s'exprime : soit suivant trois composantes orthogonales (composante verticale, composante horizontale nord et composante horizontale est) soit sous forme d'une grandeur scalaire du champ total, de son inclinaison I et de sa déclinaison D (figure 5 et figure 6). Le champ magnétique est représenté par des lignes de force (figure 6 et figure 7); la direction d'une ligne en un point quelconque de l'espace est celle du vecteur champ en ce point. La longueur du vecteur champ local est égale à la valeur de la force ou de l'intensité du champ magnétique. Lowes (1974) a démontré que le champ magnétique peut être représenté par deux champs vectoriels B et H . B représente le flux d'induction magnétique (ou l'induction magnétique) mesuré dans un milieu ambiant comme l'air, tandis que H représente l'intensité d'un champ magnétique (ou la force du champ magnétique) mesurée dans le vide. En présence d'un milieu à forte susceptibilité magnétique, B et H diffèrent grandement ce qui peut être le cas pour des mesures faites dans une mine ou dans un trou de forage. La magnétisation étant

une quantité vectorielle, la forme de l'anomalie dépendra de la somme des vecteurs (Reynolds, 1997) du champ terrestre F (avec intensité J) et du champ induit (J_i) du corps souterrain et de toute aimantation rémanente (J_r).

3.1.1 Système d'unités

En théorie, si la convection dans la partie liquide du noyau externe à une vitesse variée elle génère un champ électromagnétique qui induit un flux magnétique; et ce flux traversant une unité de surface est défini comme la densité du flux magnétique. Dans le système international (SI) l'intensité du champ magnétique est nommée Tesla (T). Les unités de mesure sont en volt-secondes par mètre carré ou *Weber/m²* ou en T . L'amplitude du champ magnétique terrestre n'étant estimée qu'à environ $5 \times 10^{-5} T$, l'unité de mesure du SI conventionnellement adaptée en géophysique est le nano Tesla ($nT = 10^{-9} T$). Cette convention d'uniformisation des unités, utilisées de nos jours dans presque tous les pays, fut adoptée en 1973 à Kyoto lors de la réunion de l'Association internationale de Géomagnétisme et d'Aéronomie (AIGA). Le système SI devient alors le système moderne d'unités métriques utilisant le mètre, le kilogramme, la seconde et l'ampère en remplacement du système cgs. Bien que le champ géomagnétique ait une valeur d'environ 50000 nT, il convient de préciser que des anomalies magnétiques d'amplitudes très petites de l'ordre de 0,1 nT peuvent être mesurées dans des levés magnétiques classiques et peuvent avoir une signification en termes d'interprétation géologique (Figure 9).

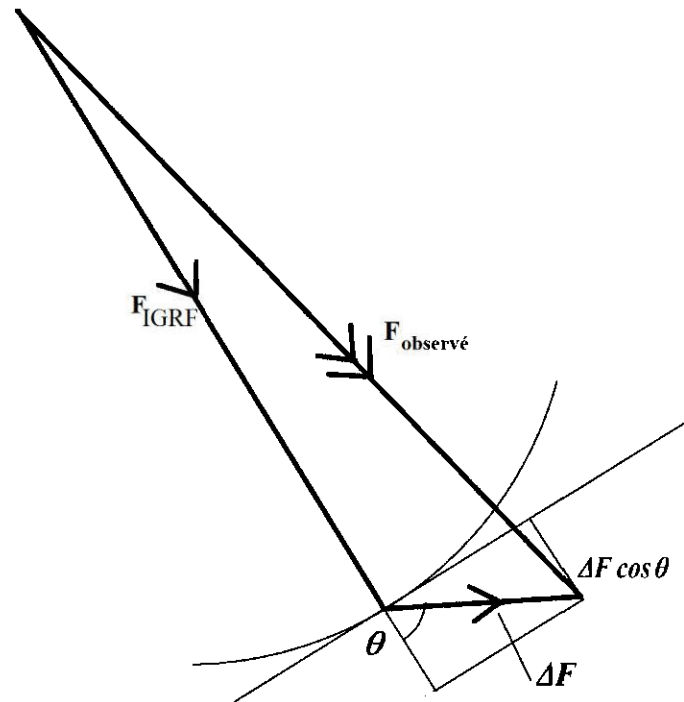


Figure 9 : Représentation vectorielle des composantes du champ : champ géomagnétique international de référence, F_{IGRF} (ou *International Geomagnetic Reference Field, IGRF*); champ géomagnétique observé, $F_{Observé}$ et la composante anormale du champ géomagnétique terrestre, ΔF . Reeves (2005).

3.2 Magnétisation des roches

Il existe plusieurs types d'interaction entre les matériaux rocheux et le champ magnétique dont les principaux sont le diamagnétisme, le paramagnétisme, le ferromagnétisme, l'antiferromagnétisme et le ferrimagnétisme. Le type d'aimantation le plus important pour l'interprétation des données magnétiques est le ferrimagnétisme; la magnétite étant le plus important minéral ferrimagnétique.

3.2.1 Aimantation induite et rémanente

L'aimantation d'une roche a habituellement deux composantes (McGrath, 1996; Reynolds, 1997): une aimantation rémanente et une aimantation induite. Chacune de ces deux composantes peut être représentée par un vecteur qui indique à la fois une direction et une grandeur (figure 10). L'aimantation induite est produite par un champ appliqué. L'aimantation rémanente est une intensité d'aimantation mesurable, en l'absence d'un champ appliqué, et qui est entretenu par l'intensité du champ magnétique interne due à des particules magnétiques permanentes. On peut facilement démontrer que les deux types d'aimantation diffèrent l'une de l'autre en faisant tourner une roche magnétique dans un champ magnétique. Le vecteur de l'aimantation rémanente se déplace avec la roche tandis que le vecteur de l'aimantation induite, en l'absence d'anisotropie, reste immobile.

En effet le vecteur d'aimantation totale dans un corps isotopique peut être décrit sous la forme d'une somme vectorielle (Lelièvre et Oldenburg, 2009) :

$$\vec{J} = k\vec{H} + \vec{J}_r, \quad (3.1)$$

avec k , la susceptibilité magnétique et H , le champ magnétique terrestre. Le premier terme ($k\vec{H}$) dans l'équation 3.1 est la composante induite de l'aimantation,

$$\vec{J}_i = k\vec{H} \quad (3.2)$$

et $\vec{J}_r$ est la composante rémanente.

L'aimantation rémanente est une aimantation permanente obtenue dans le passé qui peut souvent être orientée dans une direction différente de celle du champ terrestre actuel (Lelièvre *et al.*, 2009). Les deux composantes peuvent s'orienter dans des directions différentes.

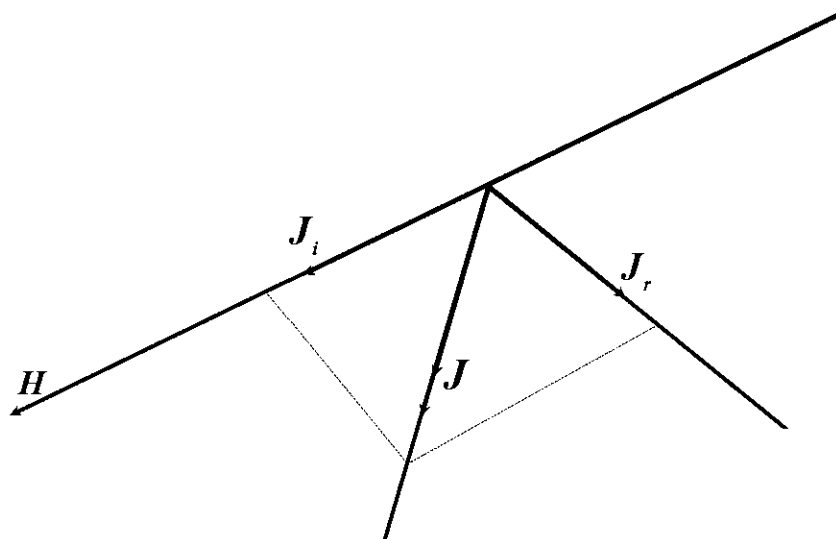


Figure 10 : Sommation vectorielle des intensités induite (J_i) et rémanente (J_r) de l'aimantation. J est l'aimantation résultante et H , le champ appliqué. Reynold (2011).

3.2.2 Susceptibilité magnétique des roches et des minéraux

Dès lors qu'il est possible d'exprimer la relation entre l'induction magnétique (densité du flux magnétique) B et la force d'aimantation H , la susceptibilité magnétique κ , qui est une propriété intrinsèque des minéraux et des roches (tableau 2), devient un paramètre de diagnostic géologique. La susceptibilité est en substance une mesure de la sensibilité d'un matériau à être magnétisé (Reynolds, 1997).

La susceptibilité magnétique est une propriété extrêmement importante des roches, et est aux méthodes d'exploration magnétique ce que la densité est aux levés gravimétriques. Les roches qui ont une concentration significative de minéraux ferro- et/ou ferrimagnétiques ont tendance à avoir les plus grandes susceptibilités. En conséquence, les roches basiques et ultrabasiques ont les plus fortes susceptibilités, les roches ignées acides et métamorphiques ont des valeurs intermédiaires à faibles, et les roches sédimentaires ont très peu de susceptibilité en général.

Tableau 2 : Susceptibilité des roches et minerais (unités en SI)
(Sources : Parasnis (1986), Sharma (1986) et Telford et al. (1990)). Modifié de Reynolds (1997)

Type de roches et de minerais	Susceptibilité*
Sédimentaires	
Dolomie (pure)	-12,5 à +44
Dolomie (impure)	20,000
Calcaire	10 à 25,000
Grès	0 à 21,000
Schistes	60 à 18,600
Moyenne	0 à 360
Métamorphiques	
Schiste	315 à 3,000
Ardoise	0 à 38,000
Gneiss	125 à 25,000
Serpentine	3,100 à 75,000
Moyenne	0 à 73,000
Ignées	
Granite	10 à 65
Granite (m)	20 à 50,000
Rhyolite	250 à 37,700
Pegmatite	3,000 à 75,000
Gabbro	800 à 76,000
Basalte	500 à 182,000
Basalte océanique	300 à 36,000
Péridotite	95,500 à 196,000
Moyenne pour roches acides ignées	40 à 82,000
Moyenne pour roches basique ignées	550 à 122,000
Glace (d)	-9
Rocksalt (d)	-10
Gypse (d)	-13
Quartz (d)	-15
Graphite (d)	-80 à -200
Chalcopryrite	400
Pyrite (o)	50 à 5,000
Hématite (o)	420 à 38,000
Pyrrhotite (o)	1,250 à $6.3 \cdot 10^6$
Ilménite (o)	314,000 à $3.8 \cdot 10^6$
Magnétite (o)	70,000 à $2 \cdot 10^7$

Note: (d) = matériau diamagnétique; (o) = ore; (m) = avec minéraux magnétiques. * $\kappa \times 10^6$ SI; convertir à l'unité c.g.s divisé par 4π .

3.3 Méthodologie de traitement des données magnétiques

Les données de levés magnétiques aéroportés publiques (DP-2006-07, MERNQ) recueillies ont fait l'objet de traitements. Avant de traiter ces données, il est nécessaire de faire une révision des méthodes conventionnelles utilisées dans le domaine de géophysique appliquée. Les traitements mentionnés ci-après sont disponibles sur la plateforme *Geosoft (Oasis Montaj)*.

3.3.1 Réduction au pôle

La réduction au pôle magnétique est un filtre qui a pour objectif d'éliminer la distorsion des anomalies engendrée par l'inclinaison du champ magnétique terrestre (Roest, Verhoef et Pilkington, 1992; Sarma et Verma, 2001; Sánchez, Allan, Hart et Mortensen, 2014; Oladunjoye, Olayinka, Alaba et Adabanija, 2016). Il permet d'obtenir des anomalies dont le maximum est centré sur les sources magnétiques. La réduction au pôle des données magnétiques a été effectuée en considérant une aimantation uniquement induite de direction parallèle au champ magnétique terrestre actuel. L'aimantation rémanente a été négligée au niveau du bouclier canadien (Allard *et al.*, 1999). L'approche du signal analytique (Nabighian, 1972; Roest *et al.*, 1992), une seconde alternative, permet de présenter des informations d'anomalies magnétiques dépouillées d'une dépendance à l'inclinaison du champ inducteur de la terre. Ainsi, les anomalies demeurent positives et se situent directement au-dessus de leurs sources. L'inconvénient dans l'utilisation de la méthode de réduction au pôle magnétique réside dans le fait que les traitements sont souvent affectés par l'amplification de bruit directionnel pour des vols effectués aux faibles degrés d'inclinaison du champ magnétique.

3.3.2 Prolongement vers le haut

Le filtre par « continuation vers le haut » dans le domaine fréquentiel appliqué aux données permet d'analyser de façon qualitative la distribution des sources d'anomalie magnétique à différents niveaux de profondeur. Du fait que l'intensité du champ

magnétique décroît avec la distance au carré entre le point d'observation et la source magnétique, le signal des petits corps magnétiques disparaît rapidement lorsqu'on prolonge l'anomalie vers le haut, et le signal des sources profondes vont persister dans l'image. Un excellent exemple est celui de Sánchez et al. (2014) qui décrivent les correspondances géologiques qui sous-tendent le prolongement vers le haut suivant quatre niveaux de tranche de profondeur dans la province de l'ouest du Yukon et de l'est de l'Alaska. À des profondeurs de la croûte inférieure à environ 10 km, le gradient géothermique avoisine les 30°C/ km, on est bien en dessous de la température de Curie de la magnétite (585°C) et donc, les unités géologiques peuvent générer une réponse magnétique : (1) la plage des profondeurs de 10-2,5 km où résident les conditions de la croûte cassante profonde à intermédiaire à travers la cordillère canadienne; les anomalies aéromagnétiques sont à grandes longueurs d'ondes; (2) de 2,5-1 km correspond à la plage des profondeurs pour la croûte supérieure peu profonde avec des assemblages métamorphiques et des plutons mésozoïques qui sont présentés par une variété de morphologie d'anomalie et de forte à faible intensité du champ magnétique.

Cette plage de profondeur montre une plus grande densité de linéaments aéromagnétiques secondaires plus courtes, et bien entendu, une possible présence de linéaments aéromagnétiques majeurs; (3) de 1 km à 250 m de profondeur, la plage de profondeur appropriée pour les roches volcaniques et sédimentaires mésozoïques et cénozoïques non métamorphisées; cette zone fournit des informations précieuses sur les failles secondaires et tertiaires liées aux systèmes de failles majeures; et (4) de 250 à 50 m de profondeur, la plage de profondeur appropriée pour les dépôts de surface et des régolithes; le grand nombre d'artefacts de courte longueur d'onde présents dans cette plage entraîne une plus grande incertitude structurelle dans l'interprétation.

3.3.3 Dérivations directionnelles

La dérivation représente le taux de variation d'une fonction par rapport à la distance ou au temps. Une application de filtre par « dérivations directionnelles » aux données magnétiques permet de mettre en évidence les zones à variation rapide du champ magnétique, et cette dernière pourrait être causée par le changement de lithologie, ou de déformation intense. Les propriétés physiques d'une structure de source magnétique qui peut être déterminée à partir d'une grille de données magnétiques comprennent sa forme, l'emplacement de ses bords, son inclinaison et son contraste de susceptibilité magnétique (Verduzco, Fairhead, Green et MacKenzie, 2004). Ces auteurs ont formulé l'équation du signal analytique et de la dérivée totale horizontale en 2D :

$$A(x, z) = |A| \exp(j\theta) \quad (3.3)$$

avec $|A| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2}$ le signal analytique;

T = amplitude de l'intensité du champ total;

$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{\partial T / \partial z}{\partial T / \partial x} \right]$, représente la phase locale.

Le tilt angle est similaire à la phase locale :

$$TDR = \tan^{-1} \left[\frac{VDR}{THDR} \right] \quad (3.4)$$

avec VDR (positive ou négative);

$THDR$ (toujours positive) respectivement la première dérivée verticale et la dérivée horizontale total de l'intensité du champ total.

pour les profils dans la direction de x ,

$$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2}$$

et pour les grilles,

$$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \quad (3.5)$$

La nature de fonction trigonométrique arctan fait que toutes les amplitudes sont limitées entre les valeurs de $+\pi/2$ et $-\pi/2$ indépendamment des amplitudes de VDR ou THDR. Ainsi donc, la relation fonctionne comme un filtre à contrôle de gain automatique (AGC) et tend à égaliser la sortie d'amplitude des anomalies du champ magnétique total sur une grille ou sur un profil.

La dérivée horizontale totale du tilt angle est :

$$TDR_THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2}, \text{ pour un profil;}$$

$$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2}, \text{ pour une grille.}$$

3.3.4 Inversions non contraintes

Lorsqu'on calcule la réponse magnétique à partir d'un modèle géologique, il s'agit d'une modélisation directe (*Forward modeling*). À partir des données magnétiques, on estime une distribution de susceptibilité à certaine profondeur de la terre qui est une procédure inverse, qui s'appelle une inversion. Les « *inversions non contraintes* » sont effectuées en se basant sur un modèle mathématique sans information géologique a priori. Le logiciel utilisé dans le cadre de cette maîtrise est VOXI sur la plateforme de Geosoft. VOXI utilise un algorithme d'inversion 3D développé par l'*University of British Columbia* (Li et Oldenburg, 1996) et qui est intégrée ensuite

dans Geosoft. Pour réaliser une inversion, le volume de la zone d'études est d'abord discrétisé en un ensemble de cellules rectangulaires : maillage 3D. La distribution de la susceptibilité magnétique à l'intérieur de l'espace du modèle est alors déterminée en minimisant la différence entre l'anomalie observée et celle générée par les sources ponctuelles (au centre de chaque cellule) en fonction de la solution lisse (le principe des moindres de carré).

Nous devons garder à l'esprit qu'une interprétation géophysique peut réfuter une hypothèse géologique, dans ce cas de figure, l'information géologique ne doit pas être considérée comme une solution ultime.

3.4 Workflow des traitements dans le cadre de cette maîtrise

Toutes nos données aéromagnétiques sont traitées à l'aide du logiciel Geosoft ainsi que VOXI pour les inversions des deux zones d'études. Les autres traitements de données topographiques, géologiques et structuraux ont été faits à base du logiciel ArGIS 10.2.2 de « *Environmental Systems Research Institute, (Esri)* ». Les grilles géophysiques sont obtenues à partir des interpolations (*minimum curvature*). Le modèle 3D est maillée sur une base régulière. La logistique de nos traitements sont résumés par la figure 11 ci-après.

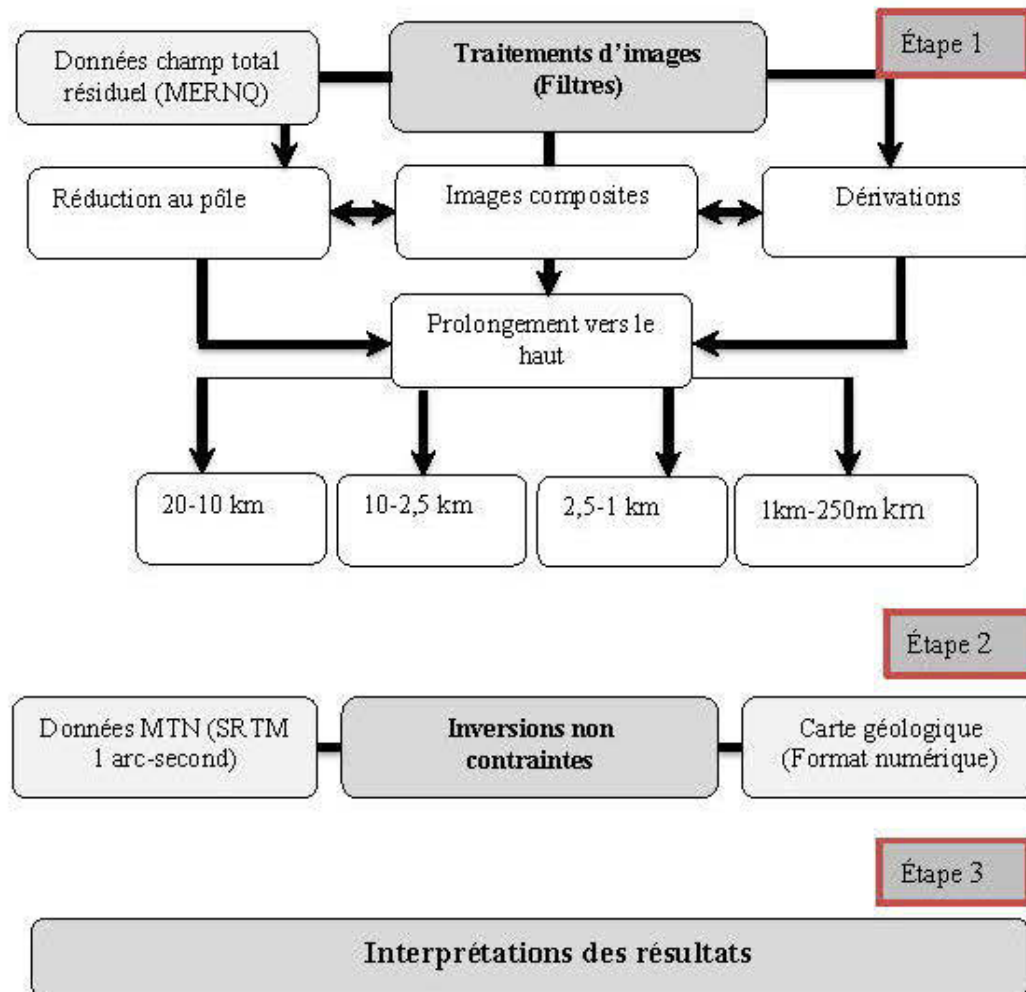


Figure 11 : Organigramme de traitement de données.

3.5 Applications

La méthode magnétique, bien qu'étant l'une des plus anciennes méthodes en géophysique, continuent de susciter de l'engouement auprès de ses utilisateurs. En effet la singularité liée à l'exploitation d'un champ naturel et le développement de techniques nouvelles qui permettent de couvrir de grandes superficies à coup judicieux, font des méthodes géophysiques les plus largement et transversalement

utilisées comme les statistiques montrent dans le tableau 3 et le tableau 4 (Telford *et al.*, 1976; Reynolds, 1997; Allard *et al.*, 1999; Reeves, 2005).

Tableau 3 : Kilométrage annuel de levés magnétométriques selon les applications (Sources : SEG, rapports spéciaux sur l'activité géophysique internationale en 1989, 1990 et 1991). Modifié de Allard *et al.* (1999).

Application	Levé	1991 (km)	1990 (km)	1989 (km)
Exploration pétrolière	aérien	361 154,5	903 863,9	669 881,4
	au sol	2 734,3	478,0	24 400,9
	en mer	142 441,4	49 516,3	152 425,8
Exploration minérale	aérien	1 657 065,9	1 446 771,3	1 072 289,8
	au sol	50 573,6	11 365,2	204 735,9
	en mer		592,2	36 675,3
	en forage		26,4	1,9
Études environnementales	aérien	2 240,2		
	au sol	2 669,9	32,2	239,8
	en mer		167,4	
Études géotechniques	aérien			6 678,8
	au sol		143,2	13,7
	en mer		77,2	553,6
	en forage		2,6	
Exploration géothermale	aérien		7 724,9	
Hydrogéologie	aérien			27 358,8
	au sol	820,8		
Recherche océanographique	en mer		37 666,7	13 669,8
Recherche scientifique	aérien	2 986,9	95 945,9	117 160,2
	au sol	83 175,7	3 891,4	90,1
	en mer		5 149,9	117 602,8
	en forage		4,3	1,9

Tableau 4 : Levés aéromagnétiques à l'échelle mondiale (en km) (Reford, 1996).

Année	Pétrole	Minerai	Autres	Total
1961	559 796	1 034 523		1 594 319
1962	697 607	1 205 576		1 903 183
1963	699 973	1 160 427		1 860 400
1964	875 391	1 066 029		1 941 421
1965	807 266	1 155 589		1 962 856
1966	953 140	1 309 913		2 263 053
1967	858 352	1 441 039		2 299 390
1968	522 554	1 347 130		1 869 684
1969	1 025 152	946 294		1 971 446
1970	708 755	1 606 038		2 314 794
1971	1 013 243	762 496		1 775 739
1972	593 777	1 978 651	86 586	2 659 014
1973	635 449	1 452 287	259 185	2 346 921
1974	1 207 734	998 714	201 763	2 408 211
1975	855 944	2 798 628	15 680	3 670 252
1976	356 412	1 419 789	38 624	1 814 825
1977	443 947	1 616 424	136 730	2 197 101
1978	468 269	1 133 801	110 329	1 712 398
1979	628 027	666 304	140 264	1 434 595
Total				39 999 603

CHAPITRE 4

CARTOGRAPHIE GÉOLOGIQUE

En géophysique appliquée, l'interprétation des résultats suppose deux aspects différents, correspondant à deux phases successives (Baranov, 1957). La première phase est une analyse détaillée des données obtenues par chacune des méthodes appliquées; et la seconde est la synthèse des données géophysiques et géologiques. Dans les travaux de cartographie géologique, les cartes magnétiques (surtout l'aéromagnétiques) sont couramment utilisées (Thompson, 1982; Hinze, 1985; McGrath, 1996). Elles servent à : (1) déterminer la position des cheminements géologiques ou des points d'échantillonnage, (2) mettre en évidence les secteurs les plus significatifs pour l'interprétation géologique d'une région, (3) mettre en corrélation des éléments observées sur le terrain, et (4) construire un modèle géologique en trois dimensions afin d'étudier la structure profonde.

4.1 Sources de données et résolution

Pour les besoins de ce présent mémoire, les données disponibles se composent de :

- la carte géologique issue de la compilation des organismes gouvernementaux du Canada et du Québec, et de plusieurs études universitaires récentes et d'entreprises minières d'exploration et d'exploitation. Une carte géologique du Québec de la récente mise à jour (Thériault *et al.*, 2012) composée d'un répertoire « ArcGIS » comprenant un projet ArcMAP version 10.0 (Géologie du Québec – Édition 2012.mxd) avec fichiers associés et une *Géodatabase* Fichier des entités géoscientifiques et d'un répertoire « *Shapefile* » comprenant les fichiers en format « *Shapefile* » (.shp) des entités géoscientifiques de la *Géodatabase* Fichier;

- des données numériques des levés aéromagnétiques du Québec (Dion et Lefebvre, 2006) publics issus de la compilation des travaux antérieures; et
- les modèles numériques de terrain (MTN) à une résolution spatiale au 1 arc-second (environ 30 mètres) de couverture mondiale et une résolution verticale de 1m; données "*Shuttle Topography Radar Mission*" (SRTM)¹.

Les données sont géoréférencées selon le système de référence «*North American Datum*» de 1983 (NAD83), en coordonnées (x, y) "*Universal Transverse Mercator*" (UTM) suivant les deux zones d'études 17N et 18N.

4.2 Justification du choix des zones d'études

Différentes raisons justifient le choix des deux zones études sur le territoire de la province du Québec, Canada, notamment :

- La disponibilité des données aéromagnétiques de haute résolution. En effet, les travaux entrepris depuis les années 70s par la Commission géologique du Canada (CGC) visaient la réalisation de levés magnétiques aériens de l'ensemble du territoire. En 1980, grâce aux avancées technologiques, la CGC a produit plusieurs cartes magnétiques à un espacement de 800 m entre les lignes de vol et une garde au sol de 300 m à partir des levés de détails (Spector, Hood, Farah et Ahmed, 1985; Allard *et al.*, 1999). Le MERNQ a conduit des mesures aéromagnétiques de haute résolution depuis les années 90s. Ces données de haute résolution ont un espacement entre les lignes de vol à 150 - 200 m. Dans le cadre de la politique de diffusion des connaissances géoscientifiques, MERNQ rend disponibles les données magnétiques aéroportés résiduelles sur une grille de 50 m par 50 m (Système d'information géominière, SIGÉOM);
- La disponibilité de la récente version de la carte géologique du Québec datant de l'année 2012 à l'échelle de 1/2 000 000 (Thériault *et al.*, 2012). Cette dernière

¹ <http://earthexplorer.usgs.gov/>

version a pris en compte les résultats de nombreux levés géologiques et géophysiques effectués au cours des dix (10) dernières années sur l'ensemble du territoire québécois;

- Par ailleurs, les spécificités des unités géologiques des provinces géologiques et la comparabilité des formations géologiques et celle du Togo nous ont poussés à cibler les deux zones d'études dont la première zone est majoritairement sous une couverture sédimentaire, et la deuxième zone représente un terrain plutonique et métamorphisé

En fin, étant donné que la géophysique ne peut se défaire de la géologie, la disponibilité des informations géologiques au Québec nous aide à justifier la méthodologie de traitement afin de nous permettre de l'appliquer plus tard dans la cartographie en République togolaise.

4.3 Contraintes et difficultés

Les deux zones d'intérêt de présentation du modèle géophysique couvrent respectivement une superficie de 105 x 103 km pour la zone d'étude 1; et 105 x 85 km pour la zone d'étude 2. Les seules données géophysiques dont nous disposons sont celles des levés aéromagnétiques, du modèle numérique de terrain et de la carte géologique. Les données de levés gravimétriques, les données de forages ou des données d'autres méthodes géophysiques pourraient, comme nous l'avons souligné dans les chapitres précédents, si elles étaient disponibles, permettre de contraindre de manière réaliste l'inversion de la zone d'intérêt.

4.4 Traitement des données de levés aéromagnétiques

Les données sont disponibles sous forme d'une grille avec un pas minimum de 50 m représentant le champ magnétique total résiduel et ont été enregistrées à une hauteur de 120 m au-dessus de la topographie. Nous concevons une grille au pas de 100 m, pour un total de 100000 et 120000 points respectivement à l'intérieur de la zone 1

(Bais-d'Hudson, Opinaca et Opatica) et de la zone 2 (Abitibi). Les données (champ total résiduel) ont été traitées, ce qui fait que nous ne disposons pas des valeurs originales du champ magnétique total. Nous assumons que la suppression de la tendance régionale a été faite raisonnablement.

La réduction au pôle est effectuée sur les grilles initiales en fonction des paramètres du champ magnétique terrestre local suivant une déclinaison $D = -13,957^\circ$; une inclinaison $I = 76,168^\circ$ et l'intensité $H = 57745 \text{ nT}$.

Ensuite, un prolongement vers le haut est effectué sur les mêmes grilles initiales un peu plus large, à des plages de distance de 10 à 2,5 km; de 2,5 à 1 km; de 1 km à 250m; et en fin de 250 à 10m.

En fin, les filtrages directionnels ont été réalisés : la première dérivée verticale, la dérivée horizontale suivant x et la dérivée horizontale suivant y.

4.5 Méthode d'inversion

L'inversion permet de déterminer un modèle de distribution propriété physique à partir de la réponse géophysique. Li et Oldenburg (1996, 1998) ont développé deux algorithmes permettant de faire des inversions en trois dimensions des données du champ de potentiel (gravimétrie et magnétométrie). Ces algorithmes ont été introduits dans Geosoft; ce qui est utilisé dans la réalisation des inversions non contrainte de données aéromagnétiques des deux zones d'études.

Le choix des paramètres dans l'inversion est important. Le choix des valeurs à attribuer à ces paramètres (le maillage; la taille, la forme et le poids de chaque cellule, la convergence) relève de la décision du géophysicien (Li *et al.*, 1996; Lelièvre *et al.*, 2009). Il n'existe pas de valeur universelle.

4.5.1 Pondération en profondeur (*Depth Weighting*)

Dans un modèle maillé, les cellules les plus profondes auront un moindre impact sur la réponse géophysique. Ce qui tend à ramener la structure à la surface. Cette

situation peut être surmontée en introduisant une pondération en profondeur afin de contrecarrer cette diminution naturelle. Ainsi on s'assure que les contributions à la réponse géophysique viennent de partout (de la profondeur et de la surface).

Li et Oldenburg (1996) donnent l'expression de la pondération de chaque cellule :

$$w(\vec{r}_j) = \frac{1}{\Delta z_j} \int_{\Delta z_j} \left(\frac{dz}{(z + z_0)^\beta} \right)^{1/2} \quad (4.1)$$

avec j est le numéro de la cellule en profondeur;

r_j identifie la cellule;

Δz_j est l'incrément en z de la cellule (épaisseur);

z est la profondeur;

β et j sont les paramètres de la pondération en profondeur.

4.5.2 Fonction-objectif du modèle géophysique

La fonction-objectif permet de minimiser la différence entre la réponse générée par le modèle et celle d'observation. Elle s'exprime comme suit (Li *et al.*, 1996) :

$$\phi = \beta \phi_m + \phi_d$$

$$\phi_d = W_e \|d_{cal} - d_{obs}\|^2$$

$$\phi_m(m) = \alpha_s \int_v w_s \{w(z)[m(r) - m_0]\}^2 dv$$

$$+ \alpha_x \int_v w_x \left\{ \frac{\partial w(z)[m(r) - m_0]}{\partial x} \right\}^2 dv$$

$$+ \alpha_y \int_v w_y \left\{ \frac{\partial w(z)[m(r) - m_0]}{\partial y} \right\}^2 dv$$

$$+\alpha_z \int_v w_z \left\{ \frac{\partial w(z) [m(r) - m_0]}{\partial z} \right\}^2 dv \quad (4.2)$$

avec v la région occupée par le modèle;

α_s , α_x , α_y et α_z des coefficients qui déterminent l'importance des différents termes;

w_s , w_x , w_y et w_z des fonctions de pondération dépendant de l'espace;

w_r la fonction de pondération en profondeur;

m la valeur de la susceptibilité du modèle à la cellule r ;

m_0 le modèle de référence;

β est le paramètre de pondération;

ϕ_d quantifie le degré de reconstruction des données en fonction de la matrice (W_e);

ϕ_m quantifie l'écart entre le model calculé et le modèle de référence;

ϕ est la fonction-objectif total à minimiser.

4.5.3 Inadéquation des données (*Data Misfit*)

Les données récoltées à travers des levés magnétométriques contiennent des marges d'erreur, il faut alors déterminer dans quelle mesure les données calculées dans le modèle doivent correspondre aux données observées. L'objectif de l'inversion est de trouver un modèle qui reproduit les données vraies.

$$d^{obs} = d^{vrai} + \epsilon_{mes}$$

$$\begin{aligned}
&= d^{cal} + \varepsilon_{err} + \varepsilon_{mes} \\
&= F[m] + \varepsilon
\end{aligned}
\tag{4.3}$$

Supposons que l'erreur i^n ait pour écart type σ_i , la fonction d'inadéquation (*Data Misfit Function*) est définie comme suit :

$$\phi_d = \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i^{cal} - d_i^{obs}}{\sigma_i} \right)^2 = \|W_d(F[m] - d^{obs})\|^2
\tag{4.4}$$

avec ε_{mes} les erreurs associées au contrôle de qualité ou au bruit lors de l'acquisition des levés;

ε_{cal} les erreurs associées à la solution numérique de la modélisation;

d^{vrai} , d^{obs} et d^{cal} respectivement les données vraies, observées et calculées;

W_d est la matrice $N \times N$ de pondération diagonale avec i^n un élément diagonale égal à $1/\sigma$

4.6 Interprétation géologique des résultats

L'objectif des levés magnétiques est de déterminer la profondeur, la position, la forme et l'occurrence des modèles géologiques. Les techniques d'interprétation des données gravimétriques et magnétiques sont semblables à l'exception de deux complications importantes (Reynolds, 1997). En effet le champ magnétique de la Terre est dipolaire, ce qui signifie qu'une seule anomalie peut avoir soit la forme unique d'un pic positif ou d'un pic négatif, soit les deux (pics positif et négatif). En plus, le plus grand inconnu est de savoir s'il y'a une aimantation rémanente et, le cas échéant, déterminer son intensité et sa direction (J_r).

4.6.1 Analyse des images 2D de la zone d'études 1

De l'analyse des images 2D de la zone d'études 1 (figure 12 et figure 13), les signatures géophysiques sont orientées globalement est-ouest dans la partie nord-est de la zone d'étude. Dans la région sud-ouest, par contre, la tendance est nord-ouest à sud-est. La partie nord-est de la zone d'étude 1 est un ensemble formé de roches méta-sédimentaires, essentiellement des paragneiss et des schistes associés aux formations de fer et de marbre. Dans cette région apparaît des roches volcaniques et intermédiaires (basaltes, andésites, volcanoclastiques et amphibolites) au sein du grand complexe méta-sédimentaire.

L'application des filtres de prolongement vers le haut à diverses profondeurs (figure 13 c-f) montre la persistance de cette signature magnétique à une profondeur d'environ 10 km. Les roches volcaniques ci-avant citées pourraient constituer la source des valeurs élevées de susceptibilité magnétiques et donc de la signature magnétique à tendance est-ouest. Les résultats issus de l'effet des filtres dérivatifs suivant les trois directions (x, y et z) de l'espace (figure 14b-d) montrent une faible variation des patrons des images composites, et donc, une influence faible de l'effet de ces filtres directionnels dans le cas d'espèce. La signature magnétique est à tendance est-ouest dans la partie nord de la zone d'études 1 tandis que dans la partie sud, cette tendance se dessine sud-est à nord-ouest. Cette deuxième observation permet de relever un net déphasage des tendances géophysiques contre celles géologiques (figure 3) orientées plutôt nord-sud dans la même zone et de conclure sur l'existence d'une source magnétique plus profonde.

La région sud-ouest de la zone d'études 1 présente une géologie de surface essentiellement sédimentaire (grès, dolomie, claystone, calcaire). L'anomalie magnétique détectée sur les images 2D serait fort probablement sous-jacente à ces formations sédimentaires de surface.

Cette première analyse permet de conclure sur l'existence d'un socle plutono-volcanique sous couverture sédimentaire. L'étude de la magnétométrie se révèle efficace et permet ainsi de localiser ces types de formations en cartographie et en prospection minière.

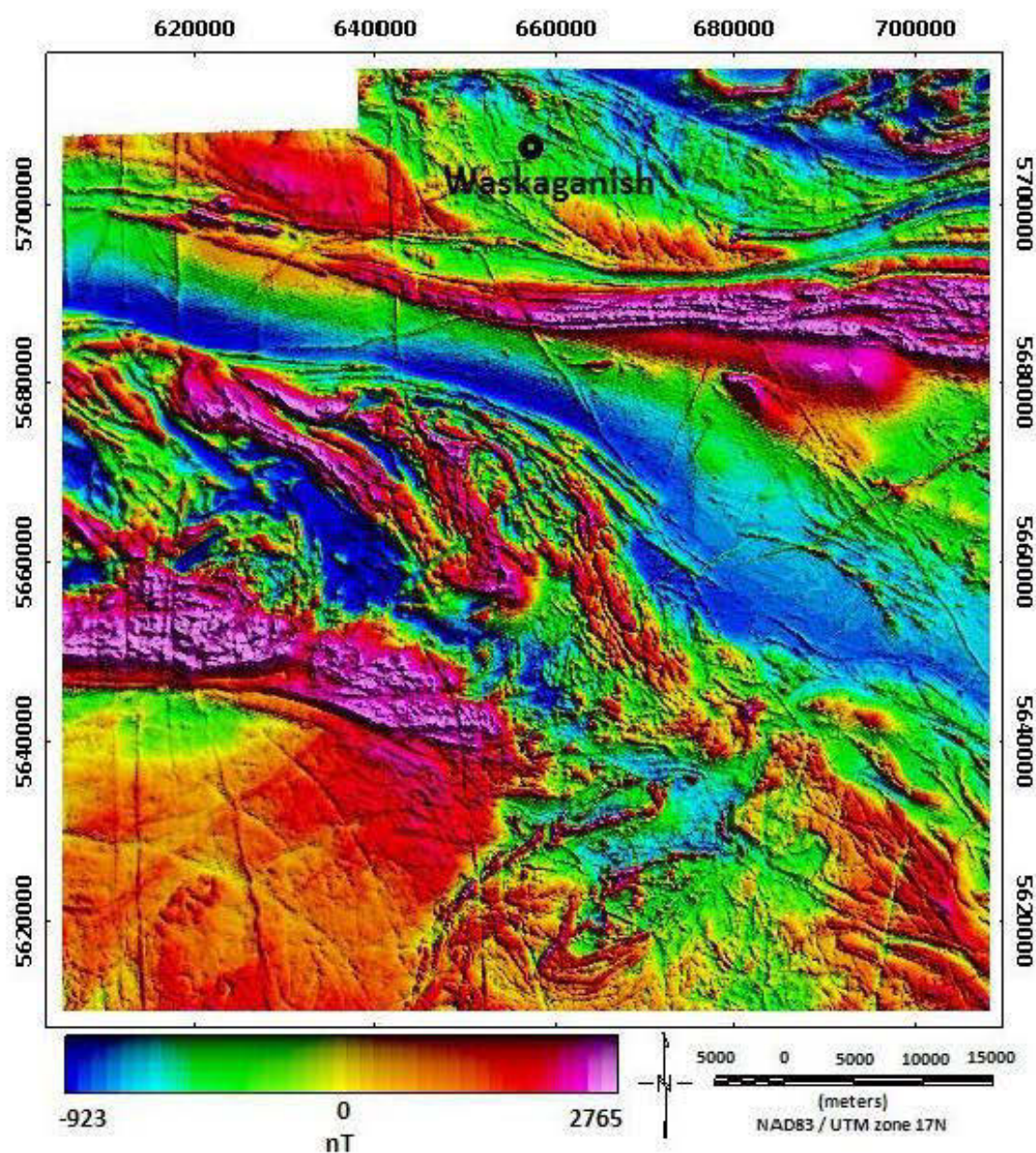


Figure 12 : Image composite du champ magnétique total résiduel dans la zone d'études 1.

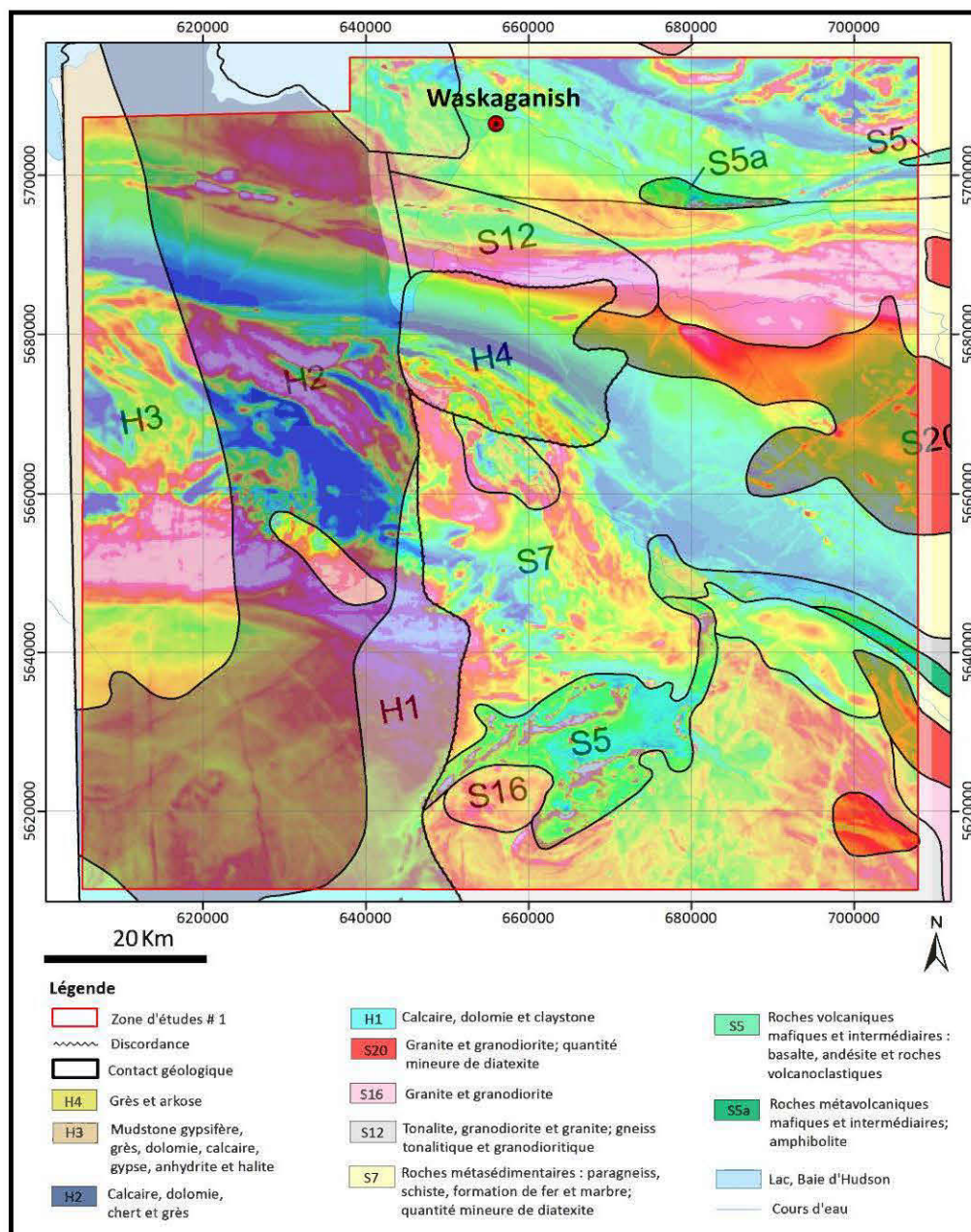


Figure 13 : Carte géologique superposée sur le champ magnétique total résiduel dans la zone d'études 1.

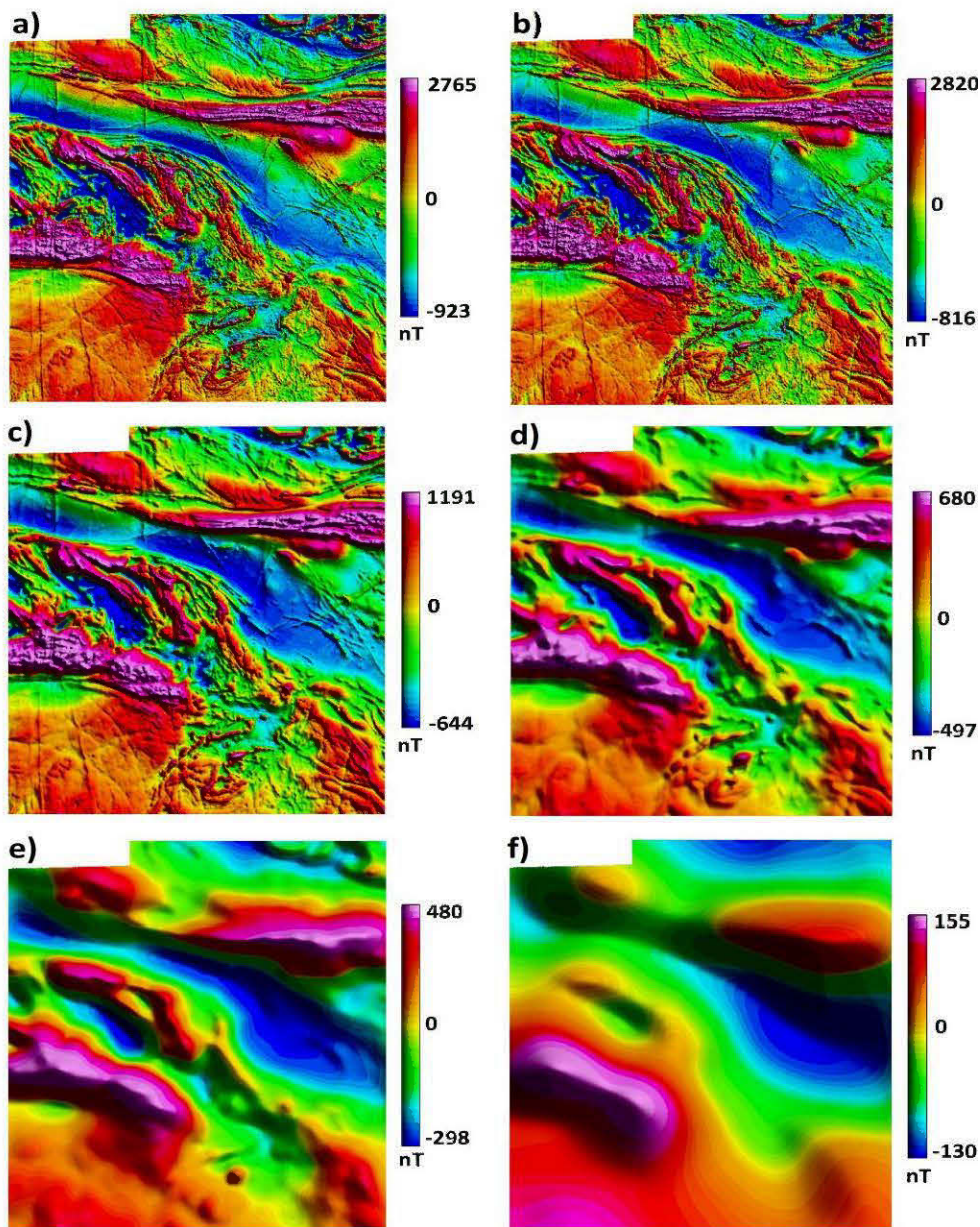


Figure 13 : (a) Champ magnétique total résiduel de la zone 1 québécoise, (b) réduction au pôle, (c) prolongement vers la haut à 250m; (d) prolongement vers la haut à 1km, (e) prolongement vers la haut à 2,5km, (f) prolongement vers la haut à 10 km.

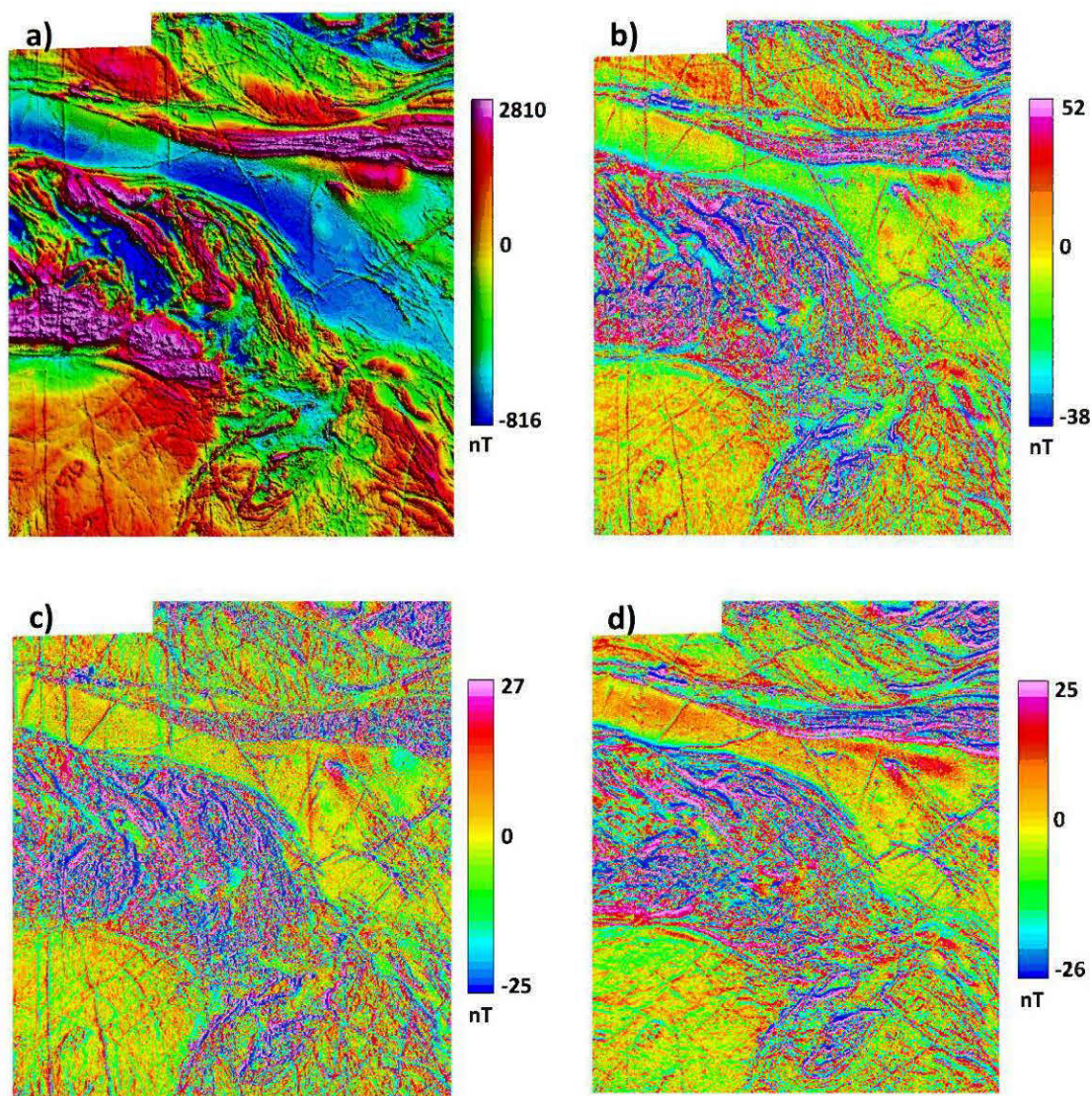


Figure 14 : (a) Champ magnétique total résiduel réduit au pôle de la zone 1 québécoise, (b) dérivée verticale, (c) dérivée horizontale suivant x; (d) dérivée horizontale suivant y.

4.6.2 Résultats de l'inversion non contrainte de la zone d'études 1

À cause de l'étendue de la zone d'études (105 km x 103 km) le modèle d'inversion a une faible résolution (figure 16). Néanmoins, il ressort clairement que l'orientation de deux structures géologiques profondes, une orientée est-ouest au nord et nord-est, et

une autre orientée ouest-nord sud-est au centre. Les linéaments visibles sont identifiés comment étant des dykes suite à la vérification d'observation de terrain. La zone de discordance définit sur la carte géologique apparaît difficilement sur la carte magnétique. Cette zone d'études étant située dans une région où la cartographie géologique n'est pas récente, datant de plusieurs années, il est évident que les données structurales soient inexistantes, ce qui ressort clairement sur le modèle de la figure 15 ci-après.

Deux sections faites dans le plan y transversalement (orientation nord-sud) aux signatures visibles sur le plan horizontal (figure 16a) en dessous du sous-sol et à 5km de profondeur permettent de voir la continuité des anomalies signalées ci-avant dans l'analyse des sections 2D. Ces vues en sections viennent confirmer l'hypothèse d'une formation magnétique sous-jacente aux roches sédimentaires de surface.

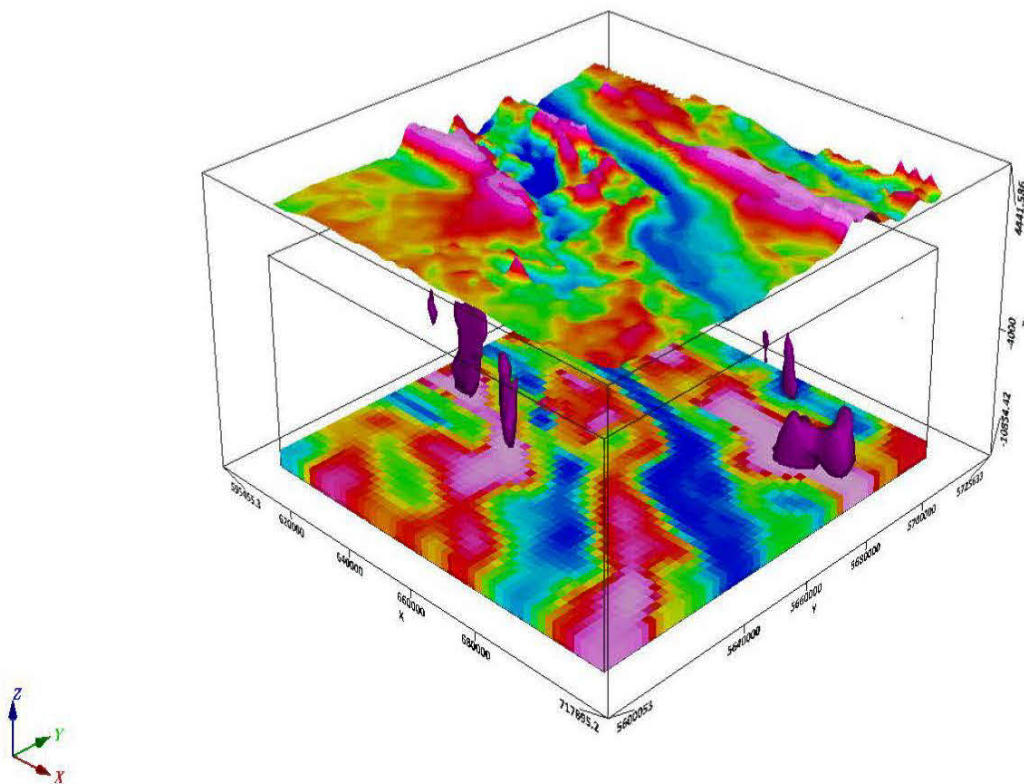


Figure 15 : Modèle 3D de la zone d'études 1 montrant des isosurfaces de susceptibilité magnétique élevée.

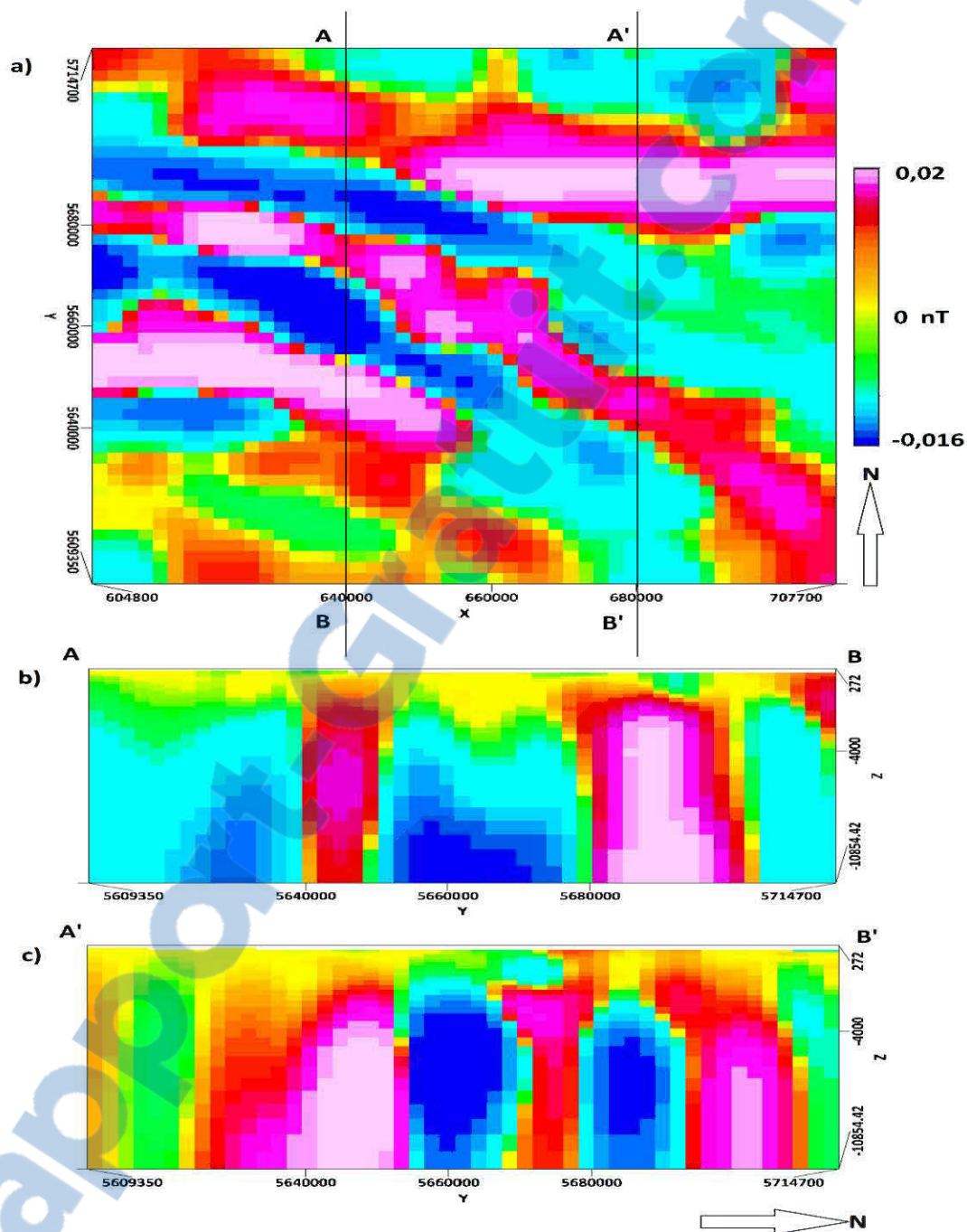


Figure 16 : Résultat de l'inversion magnétique non contrainte. a) Section horizontale à 5 km de profondeur sous la surface; b) Vue de profil (vue de l'est) à 680000 m. c) Vue de profil (vue de l'est) à 640000 m.

Tableau 5 : Paramètres de maillage de la zone d'études 1 (volume actif).

	X	Y	Z
Taille des cellules (m)	2100	2150	105
Dimensions (nombre de cellules)	50	50	31
Minima (m)	604986,3	5610253,5	-9999,5
Maxima (m)	707769,7	5715353,5	272,0

4.6.3 Analyse des images 2D de la zone d'études 2

Les images en 2D de la zone d'études 2 montrent nettement une tendance magnétique nord-ouest à sud-est entrecoupée par une seconde tendance orientée nord-est à sud-ouest (figure 17). Ces signatures seraient associées à un système de failles de type indéterminé au sein des formations volcaniques mafiques à intermédiaires et décrites sur la carte géologique. Par ailleurs, l'ensemble métamorphique du nord-ouest représenté par des formations de tonalite, de diorite, de granodiorite et de gneiss est nettement visible sur les images 2D. Cet ensemble est associé à un batholithe faiblement magnétique autour duquel les formations volcaniques mafiques et intermédiaires se moulent au contact de l'intrusion. Les unités du sud-ouest, quant à elles, sont très profondes et apparaissent progressivement avec la profondeur allant vers les 10 km en-dessous du sous-sol (figure 19f). La signature du nord-est, contraire à ce qu'on pourrait croire, est loin d'être une anomalie uniquement associée à des formations de fer décrites sur la carte géologique. Cette anomalie est visible au-delà des profondeurs de 10 km (figure 21) et aurait certainement une source plus profonde.

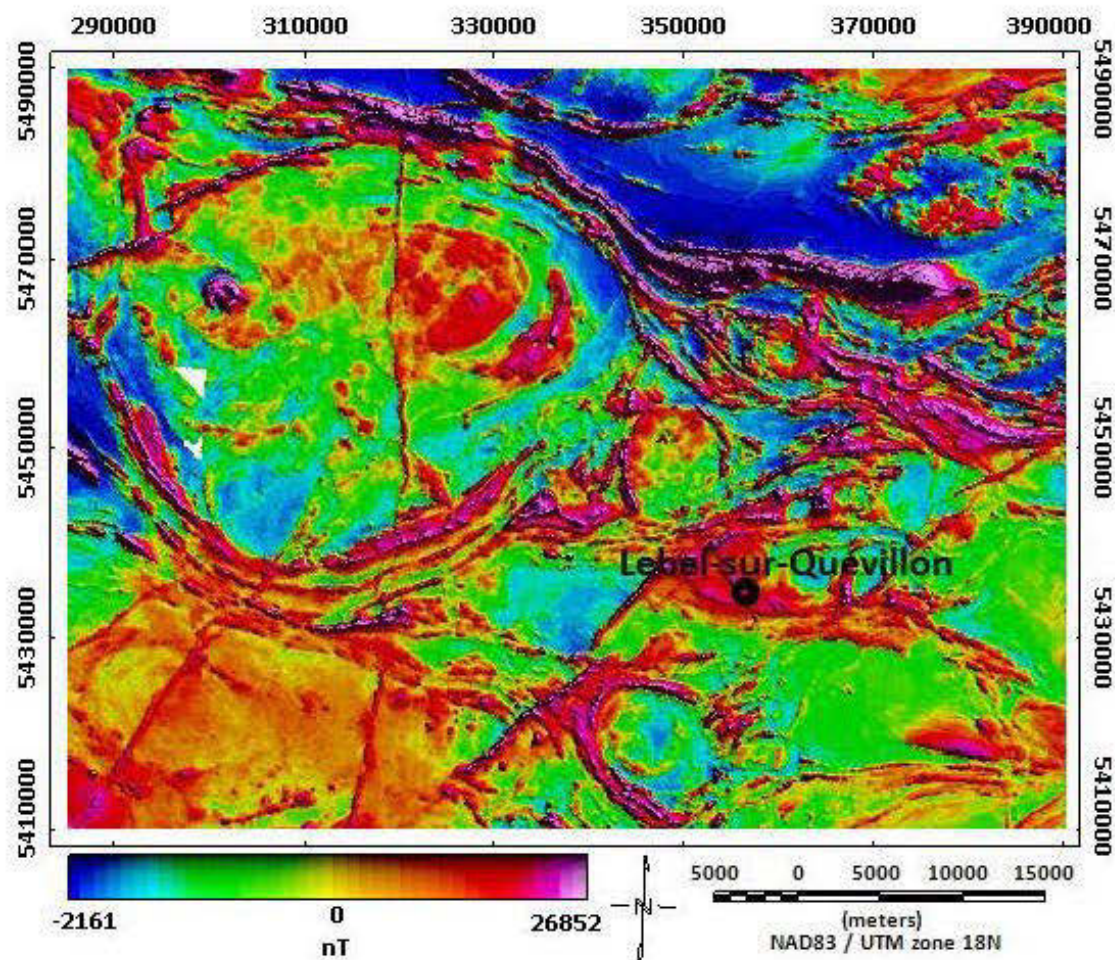


Figure 17 : Image composite du champ magnétique total résiduel dans la zone d'études 2.

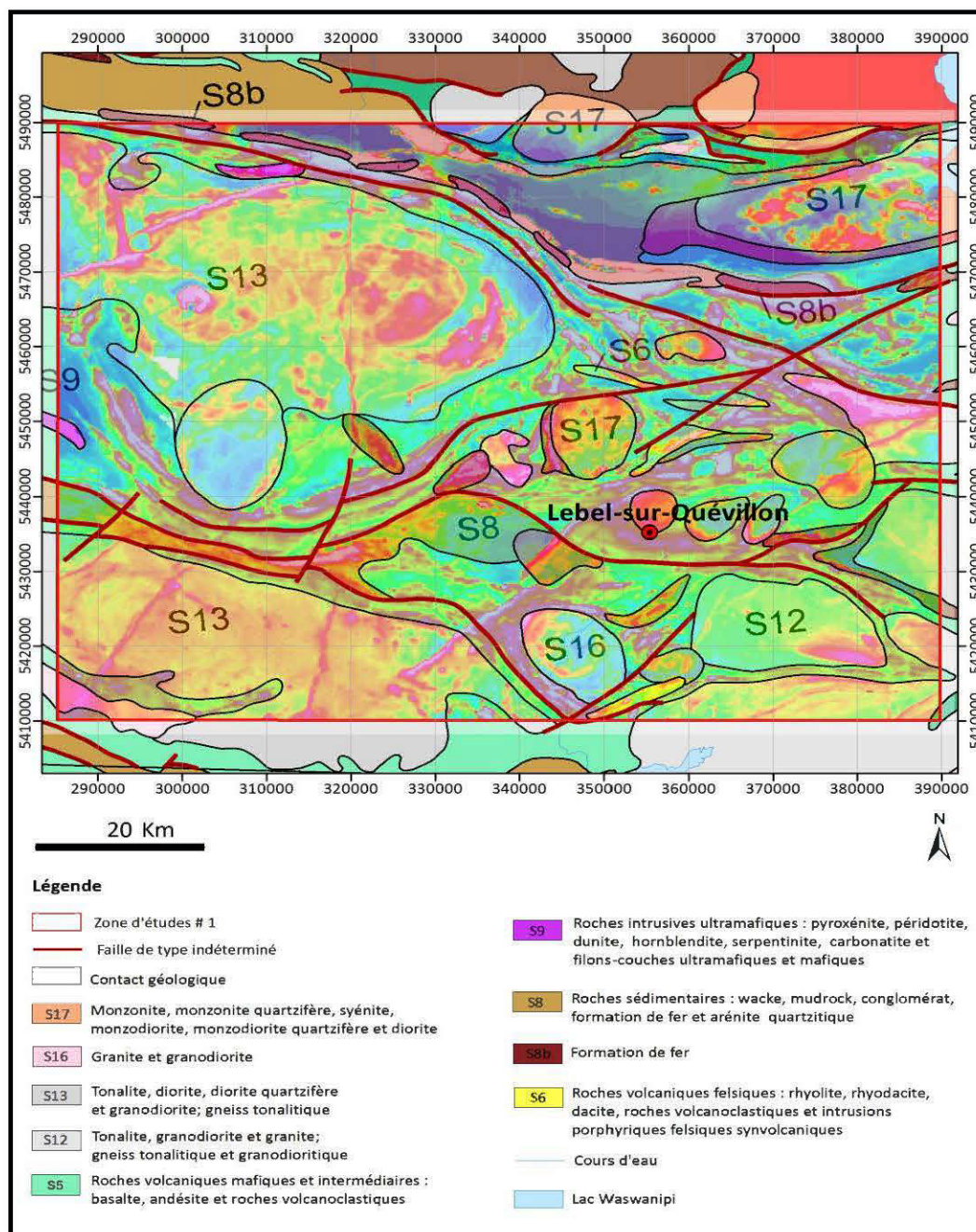


Figure 18 : Carte géologique superposée sur le champ magnétique total résiduel dans la zone d'études 2.

Cette seconde zone d'études est beaucoup mieux connue, sur le plan géologique, par rapport à la première. En effet, sur le plan minier, la zone abrite quelques projets, qui sont soit en activité, en développement ou en phase de mise en valeur, pour des métaux de base, notamment les associations or- cuivre-zinc, zinc-cuivre et nickel.

Les images composites du champ magnétique total résiduel à diverses profondeurs montrent, dans la partie nord-est de la zone d'études 2, une anomalie magnétique positive de source profonde probable qui serait associée à des effets positifs moins profonds et liées aux formations de fer. Les résultats obtenus par filtrage (prolongement vers le haut) à diverses profondeurs laissent apparaître, aux environs de 10 km de profondeur, un patron témoignant d'une anomalie recentrée plus amplement dans le secteur nord-est de la zone d'études 2. La géophysique peut jouer un rôle majeur quant à la recherche de pistes pour exploration des minerais associées aux unités géologiques peu ou non affleurantes surtout lorsque l'on dispose de peu de données géologiques et géochimiques.

Les traitements par filtrage directionnels effectués sur les mailles interpolées du champ magnétique total résiduel réduit aux pôles (figure 20b-d) révèlent une faible variation. Néanmoins, on observe une atténuation des anomalies négatives dans le secteur nord-est après l'effet de filtres dérivatifs horizontaux suivant y. Ce qui n'est pas le cas pour les résultats du filtrage directionnel suivant x et z. Le secteur sud-est est associé à des linéaments à tendance nord-est à sud-ouest.

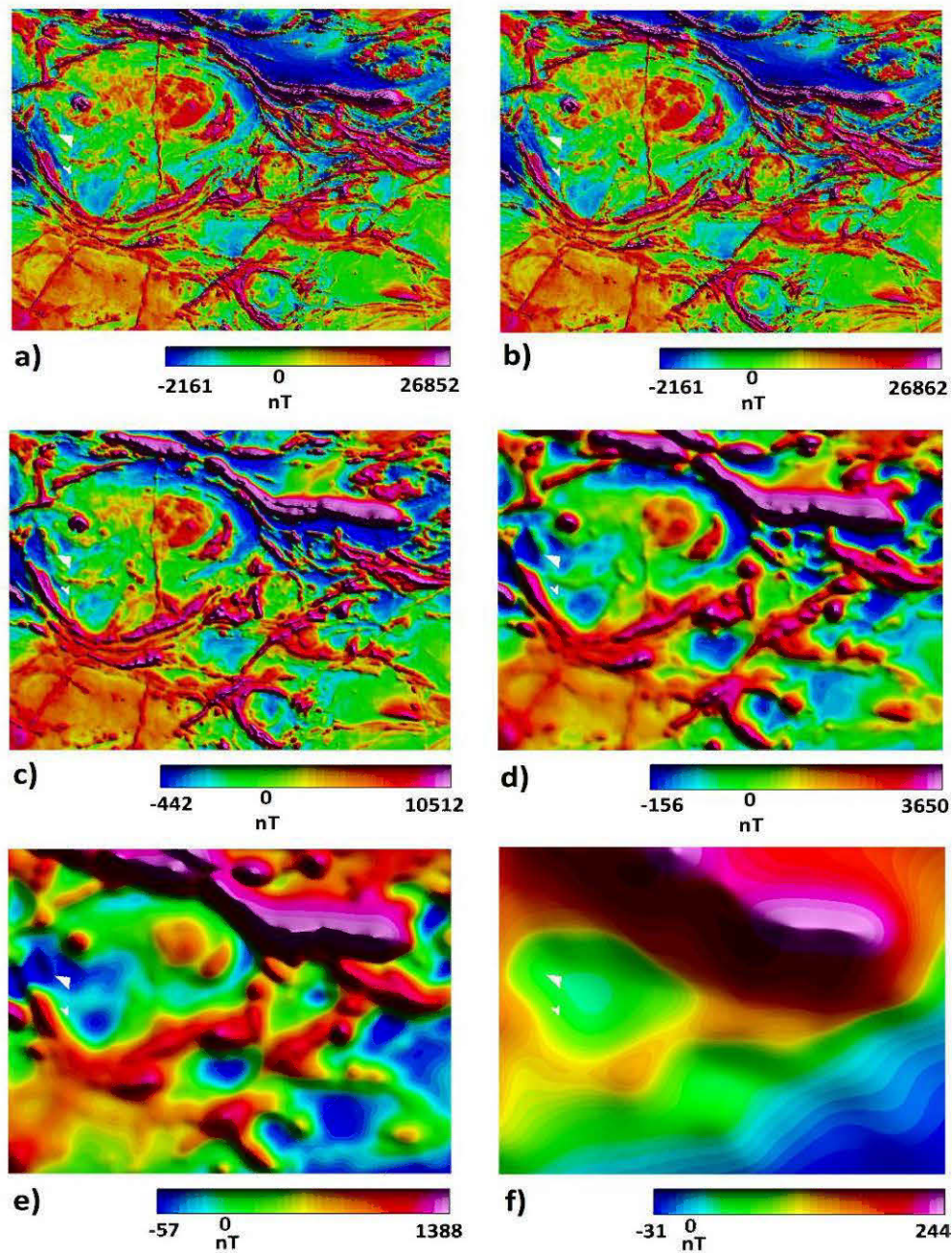


Figure 19 : (a) Champ magnétique total résiduel de la zone 2 québécoise, (b) réduction au pôle, (c) prolongement vers la haut à 250m; (d) prolongement vers la haut à 1km, (e) prolongement vers la haut à 2,5km, (f) prolongement vers la haut à 10 km.

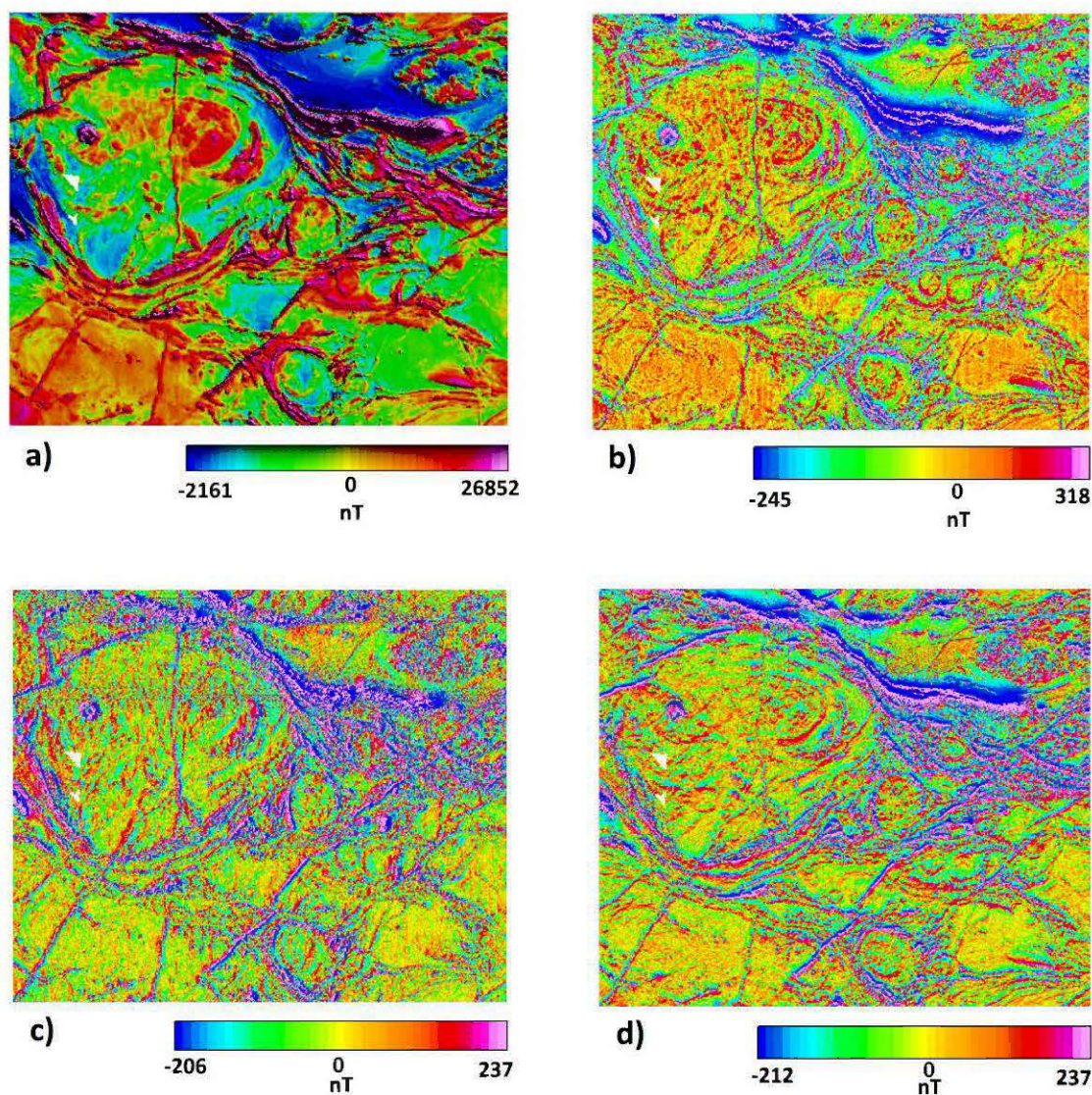


Figure 20 : (a) Champ magnétique total résiduel réduit au pôle de la zone 2 québécoise, (b) dérivée verticale, (c) dérivée horizontale suivant x; (d) dérivée horizontale suivant y.

4.6.4 Modélisation inverse de la zone d'études 2

Le modèle d'inversion non contrainte 3D montre plus de détails de la distribution de susceptibilité en trois dimensions (figure 21). À partir de la surface du sol jusqu'à une profondeur d'environ 3km et au-delà, une signature nord-est à sud-ouest à laquelle

serait associée un système de failles (par exemple la faille de Wedding à mouvement senestre) se maintient. Cette structure qui traverse le centre de la zone d'études 2 québécoise est devenue visible. Ce domaine de susceptibilité reflète des caractéristiques géologiques peu profondes et pourrait faire l'objet d'une attention particulière d'autant qu'il est situé dans une zone où l'exploitation minière est plus ou moins intensive.

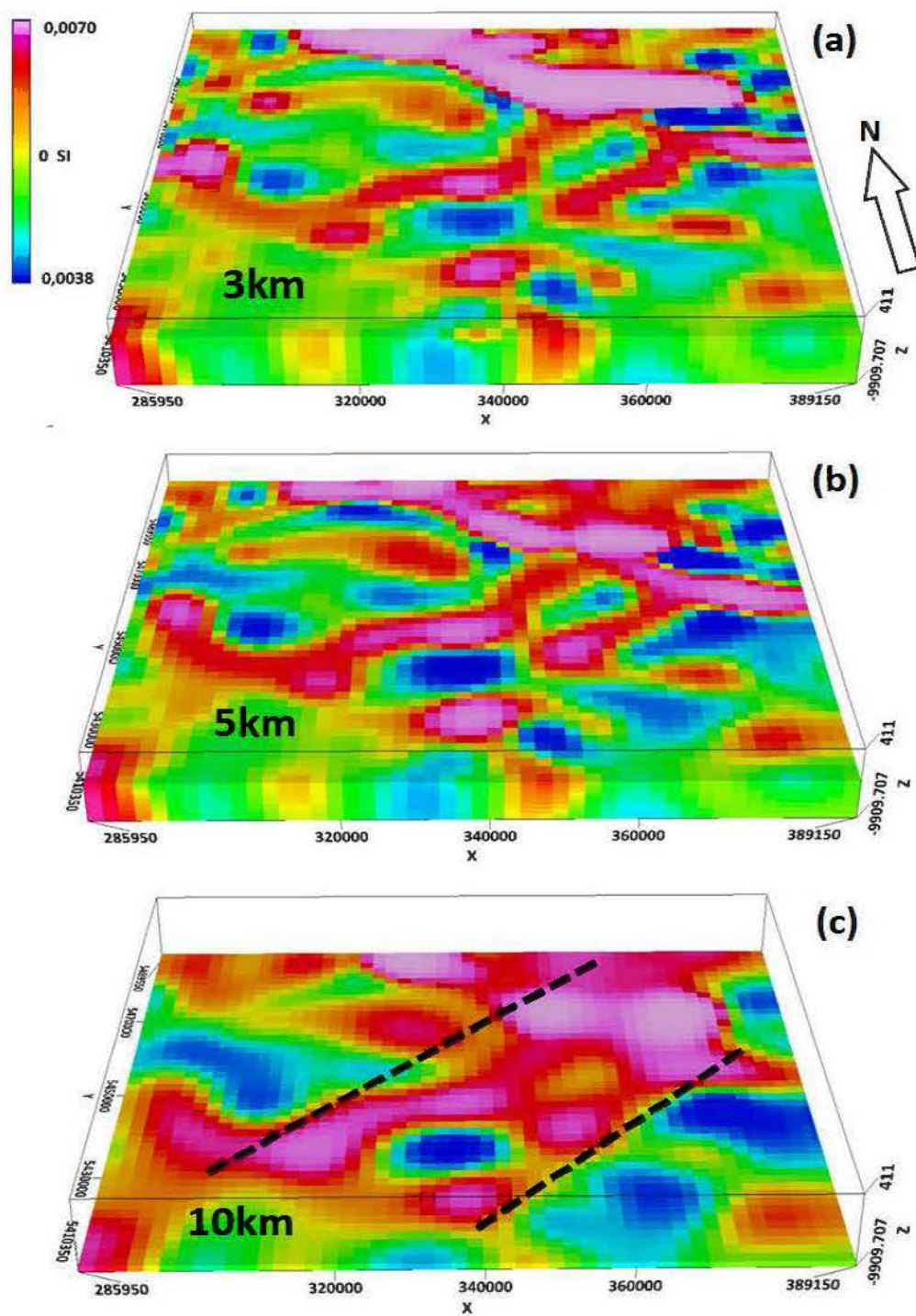


Figure 21 : Modèle 3D de susceptibilité magnétique de la zone 2 québécoise.

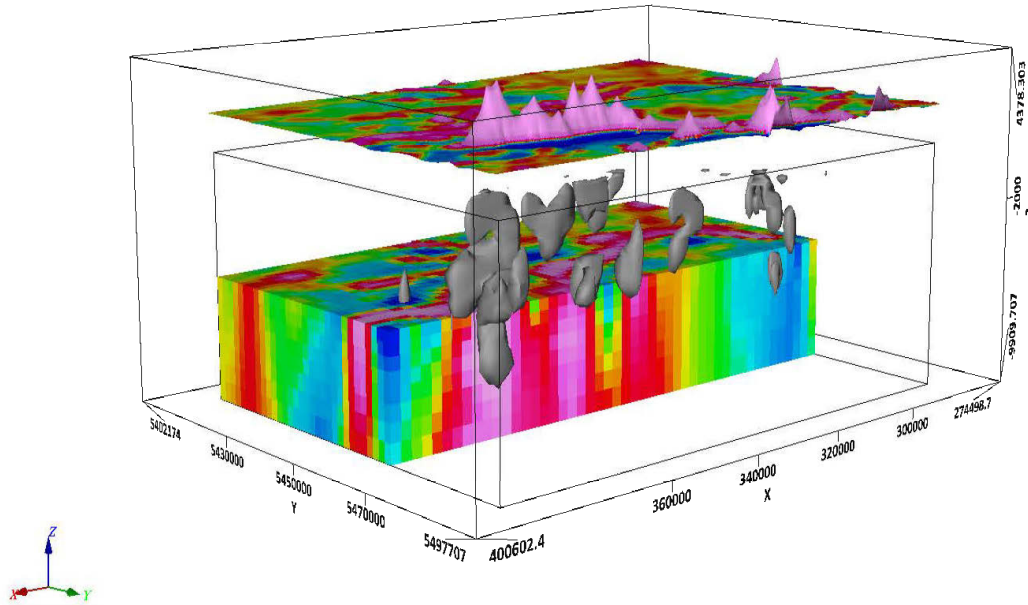


Figure 22 : Modèle 3D zone 2 montrant des isosurfaces de susceptibilité magnétique.

Tableau 6 : Paramètres de maillage de la zone d'études 2 (volume actif).

	X	Y	Z
Taille des cellules (m)	2150	1650	83
Dimensions (nombre de cellules)	50	50	33
Minima (m)	285072.8	5410055.7	-9217.3
Maxima (m)	390018.8	5489938.7	494.0

4.6.5 Apport des données magnétiques

Les anomalies magnétiques ont permis d'une part de localiser les formations magnétiques sous-jacentes au domaine sédimentaire de la zone d'études 1. Les dykes de diabase et la structure assimilée à un batholithe de la zones d'étude 2 ont été confirmés tout d'abord par les images en 2D traitées puis par des inversions non-

contraintes qui ont permis de déterminer les distributions de la susceptibilité magnétique des roches dans le sous-sol.

Par les exemples ci-haut, nous démontrons qu'on peut analyser et interpréter les anomalies magnétiques de façon qualitative et quantitative. L'importance est de trouver le sens géologique dans l'expression géophysique.

Cette expérience d'apprentissage à travers la formation de maîtrise, permet d'une part de comprendre le lien entre la géologie et la géophysique et d'autre part d'être à même de transmettre la connaissance pratique en République togolaise et ailleurs où besoin sera sur les travaux de levés magnétiques.

CHAPITRE 5

ESSAIS SUR LE TERRAIN EN RÉPUBLIQUE TOGOLAISE

5.1 Introduction

La susceptibilité magnétique est une propriété physique des roches qui représente la quantité de la magnétisation induite par l'intensité du champ magnétique terrestre. Elle est sans dimension, et donc marquée par *SI* dans le système international d'unités.

Le KT-20 s/c permet de mesurer, en plus de la susceptibilité magnétique, d'autres paramètres physiques (la conductivité, la chargeabilité, la résistivité et la densité). Les mesures peuvent être faites soit dans des trous de forage, soit au laboratoire (échantillons, carotte), soit directement sur des affleurements de roc. L'appareil est doté d'un capteur ultra-sensible (1×10^{-7} [*SI*] du modèle KT-20) à fréquence simple (10 KHz) ou double (10 KHz/100 KHz).

L'utilisation de la susceptibilité magnétique, bien qu'étant un problème beaucoup plus complexe, permet de solutionner divers problèmes d'ordre géologique, pétrologique et environnemental (Terraplug, 2009). La susceptibilité magnétique des roches est contrôlée par le type et la quantité de minéraux magnétiques contenus dans une roche (Reynolds, 1997; Terraplug, 2009). Il est dominé par des minéraux paramagnétiques (olivine, pyroxène, amphibole, mica, tourmaline et grenat), souvent par des minéraux ferromagnétiques (magnétite, pyrrhotite), très peu par des minéraux diamagnétiques (calcite et quartz). À l'exception des rares roches monominérales, les roches se composent en général des trois grands groupes de minéraux (ferromagnétique,

paramagnétique et diamagnétique) (Terraplus, 2009). Ainsi donc, la susceptibilité magnétique permet d'étudier la pétrographie, la métasomatose, l'altération, la détection des sources d'anomalies magnétiques, la géologie économique, la gestion environnementale et la cartographie géologique.

Dans le contexte de la zone de suture, où les mesures ont couvert les unités métamorphiques (avec des intrusions mafiques et ultramafiques) pour la plus part et les formations d'altération et pédogénétiques subséquentes, l'interprétation ne prend pas en compte la nature structurale desdites formations. Quant à la susceptibilité magnétique des roches sédimentaires, elle est en général très faible. Cependant, certaines roches sédimentaires enrichies en éléments magnétiques (par des activités volcaniques ou hydrothermales), la tuffite et les roches sédimentaires riches en sidérite, en ankérite ou des skarn, peuvent présenter des susceptibilités magnétiques relativement élevées. En plus, les susceptibilités magnétiques de telles roches peuvent être relativement élevées en fonction de la quantité de carbonates lourds qu'elles contiennent. Ces complexités en nature démontrent une importance des mesures de susceptibilité magnétique. Établir le lien direct entre la susceptibilité magnétique et la lithologie qu'elle représente peut permettre d'augmenter la précision de l'interprétation des anomalies magnétiques.

Dans le cadre de la présente étude, le KT-20 a été utilisé pour mesurer la susceptibilité magnétique directement sur les affleurements le long de 9 profils au nord et de 11 profils au sud du Togo. La dernière mise à jour de la carte géologique du Togo date des années 80. En dépit des travaux de recherches universitaires et des entreprises privées réalisés sporadiquement sur l'étendue du territoire, des efforts restent à faire pour l'actualisation de la carte géologique du Togo. Il apparaît clairement de nos jours que les méthodes magnétiques et gravimétriques sont largement utilisées pour soutenir la cartographie géologique. Ces méthodes présentent

des avantages inhérents notamment aux dernières technologies développées sur le marché de l'industrie minière et aux coûts de plus en plus abordables dus à la concurrence. L'objectif des mesures de susceptibilité est de:

- servir d'indicateurs sur les signatures magnétiques de différentes unités géologiques;
- faire la corrélation entre la susceptibilité magnétique et les différentes formations géologiques (et structurales si possible) des zones d'études ciblées; et
- évaluer l'apport de ce paramètre physique aux défis liés à la cartographie géologique des zones complexes.

5.2 Zones d'études et cadre géologique

5.2.1 Cadre géologique

La zone d'études, présentée sur un fond de carte géologique simplifiée de la République togolaise au 1/500 000^e (figure 23), est située en région intertropicale. Elle fait partie d'une chaîne de subduction-collision panafricaine et s'étend du sud-est du Ghana et du Togo au nord de la République du Bénin. Les deux zones d'études ciblées (tableau 7 et tableau 8) se situent respectivement au nord-est et au sud-ouest de la partie togolaise de la zone de suture mafique-ultramafique (Affaton, Kröner et Seddoh, 2000).

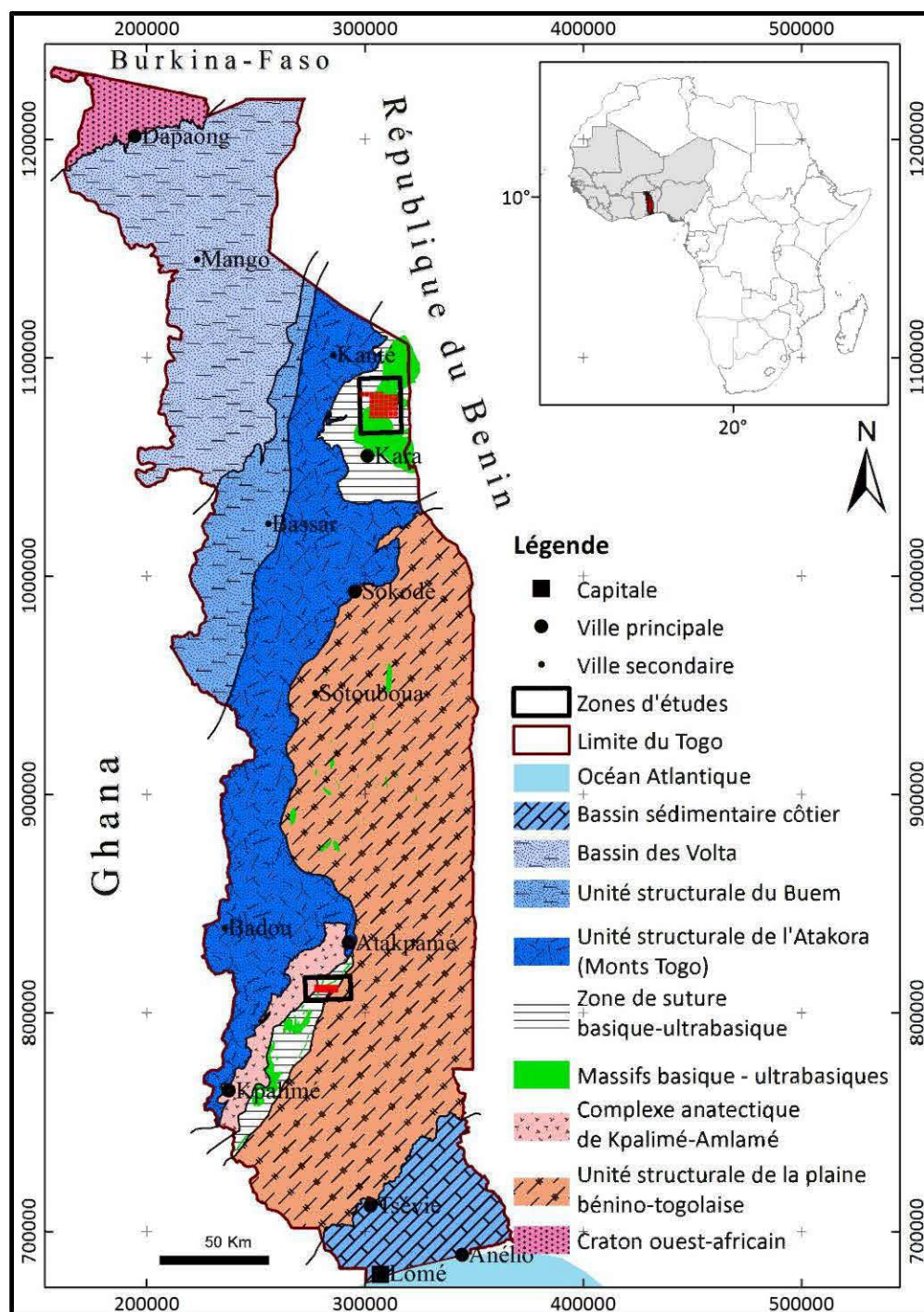


Figure 23 : Carte de la géologie simplifiée du Togo montrant les grands ensembles géologiques et les deux zones d'études. Modifié de Affaton et al. (1980).

Les deux zones d'études se situent dans le domaine d'un grand ensemble d'une formation géologique connue sous l'appellation de "zone mobile" correspondant à la chaîne panafricaine des Dahoméyides (600 Ma) avec des présences locales de noyaux plus anciens donnant des âges représentatifs de l'orogénie éburnéenne tels les orthogneiss de Kara et d'Agbélouvé respectivement 2064 Ma et 1708 Ma (Sylvain, Aregba, Assih-Edeou, Castaing, Chevremont, Collart et Ouassane, 1986; Blot, Affaton, Seddoh, Aregba, Godonou, Lenoir, Drouet, Simpara et Magat, 1988; Affaton, Aguirre et Ménot, 1997; El-Hadj Tidjani, Affaton, Louis et Socohou, 1997; Agbossoumonde, Menot et Guillot, 2001; Agbossoumondé, Guillot et Ménot, 2004; Deynoux, Affaton, Trompette et Villeneuve, 2006; Duclaux, Ménot, Guillot, Agbossoumondé et Hilairé, 2006; Tairou, Affaton, Gélard, Aïté et Sabi, 2007; Attoh, Samson, Agbossoumondé, Nude et Morgan, 2013).

Dans le sud-ouest comme le nord-est, la collision entre la marge continentale passive du Craton Ouest africain et un ensemble de plaques orientales (les boucliers bénino-nigérian et des Touaregs) (Affaton, Sougy et Trompette, 1980; Bessoles et Trompette, 1980) a probablement conduit à l'exhumation des roches sous faciès amphibolite et schiste vert (Affaton *et al.*, 1980; Bessoles *et al.*, 1980; Agbossoumondé *et al.*, 2004) tandis que la subduction de la marge passive du craton ouest africain serait responsable de la formation des éclogites. La zone de suture s'expose nettement au sud-est du Ghana et au nord-ouest du Bénin et correspond à une bande étroite et lithologiquement diversifiée et marquée par des anomalies gravimétriques positives (El-Hadj Tidjani *et al.*, 1997).

Cette chaîne panafricaine des Dahoméyides comprend une 'zone interne', 'une zone de suture' et une 'zone externe' (Affaton *et al.*, 1980). La 'zone externe' regroupe d'ouest en est : (1) l'unité structurale du Buem, un ensemble sédimentaire à métamorphisme faible à anchizonal; (2) l'unité structurale de l'Atacora (Monts

Togo), métamorphique et (3) le domaine anatectique de Kpalimé-Amlamé constitué de granitoïdes calco-alcalins, de migmatites et de gneiss (Sylvain *et al.*, 1986; Affaton *et al.*, 2000). La ‘zone de suture’ et la ‘zone interne’ comprennent un sillon mafique-ultramafique Kabyè-Sotouboua-Agou caractérisé par l’association de roches métamorphiques du socle (orthogneisso-amphibolitique), de roches de couverture (quartzites, micaschistes), de massifs mafiques à ultramafiques (orthoamphibolites, serpentinites, schistes verts, pyroxénolites, gabbros) en abondance et de la présence locale d’éclogitoïdes et une unité structurale de la plaine bénino-togolaise plus ou moins diversifiée avec des granitoïdes, des migmatites, des séries gneissiques, des roches métasédimentaires, des orthogneiss et des roches basiques et ultrabasiques (Affaton *et al.*, 1980; Ménot et Seddoh, 1985; Affaton *et al.*, 2000; Agbossoumondé, Ménot, Paquette, Guillot, Yéssoufou et Perrache, 2007).

5.2.2 Zones d’études

La zone d’études du nord-est ou « zone nord-est » (figure 24) est située dans la région de la Kara. Lors des travaux, les conditions d’accès sont assez bonnes en dépit des montagnes qui culminent entre 500-650 m d’altitudes dans le secteur de Farendè-Kpaza. Il s’agit de la région nord-est de la partie togolaise de la zone de suture (massif kabyè) de la chaîne panafricaine des Dahoméyides. La zone du sud-ouest ou « zone sud-ouest » (figure 25) couvre, en plus de suture basique-ultrabasique, l’unité structurale de l’Atacora et l’unité structurale de la plaine bénino-togolaise.

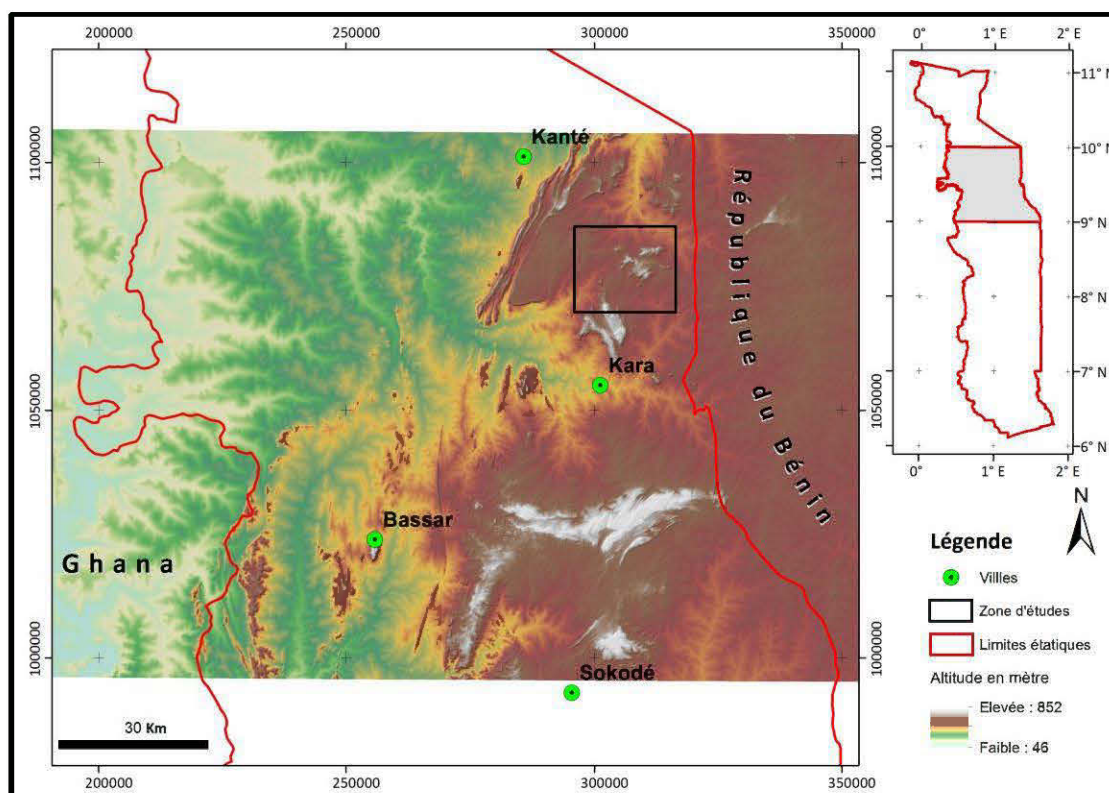


Figure 24 : Carte de localisation de la zone d'études nord-est, sur fond d'image MTN, de la Région de la Kara (Feuille Kara au 1/200 000^e).

Tableau 7 : Coordonnées des sommets de la zone d'études nord-est (Région de la Kara).

Sommets	Coordonnées géographiques
A _{NE}	N9° 48' 00.0" / E1° 09' 36.0"
B _{NE}	N9° 48' 00.0" / E1° 15' 00.0"
C _{NE}	N9° 47' 24.0" / E1° 15' 00.0"
D _{NE}	N9° 47' 24.0" / E1° 18' 36.0"
E _{NE}	N9° 42' 00.0" / E1° 18' 36.0"
F _{NE}	N9° 42' 00.0" / E1° 12' 00.0"
G _{NE}	N9° 47' 24.0" / E1° 12' 00.0"
H _{NE}	N9° 47' 24.0" / E1° 09' 36.0"

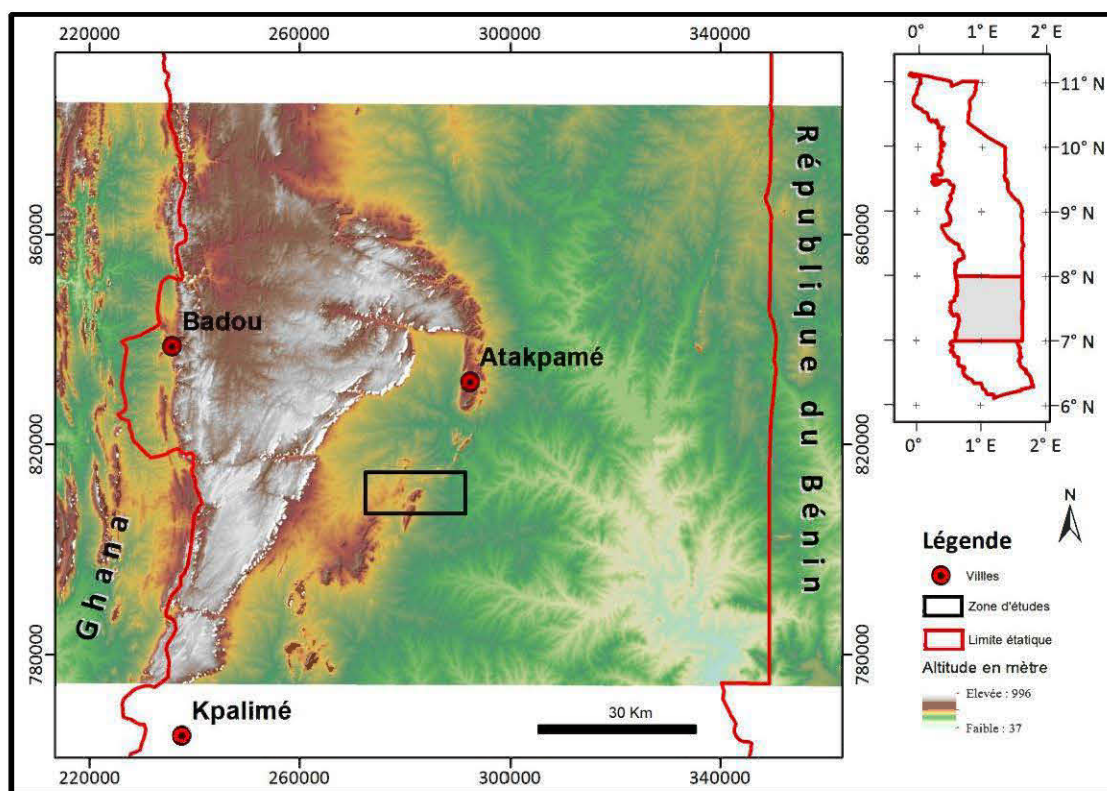


Figure 25 : Carte de localisation de la zone d'études sud-ouest, sur fond d'image MTN, de la Région des Plateaux (Feuille Atakpamé au 1/200 000°).

Tableau 8 : Coordonnées des sommets de la zone d'études sud-ouest (Région des Plateaux).

Sommets	Coordonnées géographiques
Asw	N7° 20' 39.5"/ E0° 58' 58.8"
Bsw	N7° 20' 39.5"/ E1° 04' 22.8"
Csw	N7° 19' 13.1"/ E1° 04' 22.8"
Dsw	N7° 19' 13.1"/ E0° 58' 58.8"

5.3 *Méthodologie de collecte*

5.3.1 Travaux de terrain

Les travaux de terrain (mesures de susceptibilité magnétique et de densité, descriptions lithologiques, collectes d'échantillons et analyse morphologie du terrain) ont été réalisés à l'été 2016 durant les mois de juin et de juillet. Ils ont été effectués par la reconnaissance à pied. Les mesures ont été faites à l'aide du "*Kappamètre KT-20 s/c series*" suivant une maille régulière plus ou moins grossière. Ainsi, chaque point visité a été positionné dans l'espace (GPS avec une précision spatiale de l'ordre de 4 m et altimètre barométrique ayant une précision de $\pm 0,1$ m). Ces travaux se sont déroulés suivant deux phases :

- une première phase qui s'est étendue du 09 juin au 05 juillet 2016 dans la région de la Kara avec une pause technique d'environ deux semaines (17 au 30 juin 2016) pour raison de panne du 'Kappameter' KT-20 s/c séries; et
- une seconde phase allant du 08 au 21 juillet 2016 dans la région des Plateaux.

Les mesures, pour les deux zones, ont été prises suivant un maillage régulier : (1) dans la zone nord-est, l'espacement entre deux profils est constant de même que celui entre deux points de mesure, soit une maille régulière de 1000 x 1000 m; (2) dans la région d'Atakpamé, zone d'études située au sud-ouest, l'espacement entre deux profils est constant et égal à 330 m de même que celui entre deux points de prélèvement, soit une maille régulière de 330 x 330 m. Les profils ont coupés transversalement, que ce soit dans la zone d'études nord-est que celle du sud-ouest, les formations du "complexe mafique-ultramafique" sud-ouest nord-est.

Les mesures sont prises selon les prescriptions contenues dans le manuel d'utilisation du fabricant. L'appareil dispose d'un capteur double fréquence (10 et 100 KHz), les mesures sont donc enregistrées sous les deux fréquences. Une exception a été faite

dans la zone nord-est où le nombre de mesures par point de mesure étaient inférieur à cinq, ce qui a, sans doute, réduire la précision des données puisqu'elles sont calculées suivant une moyenne arithmétique.

5.3.2 Inventaire des données collectées

Dans le secteur du nord-est, 134 points de mesures de susceptibilité magnétique sur affleurement ont été mesurés en mode mesure « *Measure Mode* » et sans PIN de l'appareil (dont 16 irrécupérables) à l'aide d'un capteur à fréquence double (10/ 100 KHz), suivant onze profils orientés est-ouest. Contrairement aux exigences du fabricant, une à cinq mesures maximum ont été faites par point de mesure et par fréquence. L'appareil mesure des susceptibilités vraies des lithologies avec une marge d'erreur d'environ 10% selon les spécifications du fabricant. Dans le secteur sud-ouest, 279 mesures de susceptibilité magnétique ont été effectuées (dont 02 irrécupérables) suivant neuf profils. Le système de mesure est resté le même que celui du secteur nord-est, avec la différence d'avoir plusieurs mesures (10 mesures et plus) par point de mesure et une maille plus réduite comme mentionné dans le sous-titre précédent. Pour ces mesures, la valeur de susceptibilité vraie équivaut à la moyenne arithmétique de toutes les mesures effectuées par point de mesure; tandis que le fabricant en recommande une moyenne de 16 mesures.

Tableau 9 : Inventaires des données collectées au niveau des deux zones d'études.

Régions	Zones	Profils (est-ouest)	Mesures
Kara	Zone NE	9	134
Atakpamé	Zone SW	11	279

5.3.3 Compilation des données

Les données sont d'abord enregistrées automatiquement après chaque mesure dans la mémoire du Kappamètre. L'appareil permet de stocker en mémoire plusieurs valeurs de susceptibilité magnétique mesurée et des autres paramètres physiques et d'en calculer leur moyenne arithmétique. La gamme des susceptibilités mesurables par l'appareil s'étend de $10^{-6} SI$ à $9999,99 \times 10^{-3} SI$ pour le capteur à double fréquence. Les données sont ensuite transférées sur la plate-forme de *"GeoView version 2.1.4"*, qui permet l'affichage et l'exportation vers d'autres périphériques. La compilation finale et l'analyse statistique a été faite sur les plateformes de Excel 2010 et *"Origin Lab"*. Les données sont interpolées et maillées sur la plate-forme *"Geosoft"*.

5.3.4 Quelques facteurs limitatifs

Ils sont essentiellement d'ordre climatique et technique. Les conditions climatiques ont été plus ou moins mauvaises avec la fréquence des orages occasionnant les crues des rivières et vallées, rendant difficiles les conditions d'accès et de pénétration des zones d'études :

Dans le domaine du sud-ouest, la couverture végétale est plus ou moins dense et est composée essentiellement d'espèces de lianes vivantes tapissant les flancs des hautes collines et rendant les conditions d'accès et de pénétration assez difficiles. Dans la région de la Kara, zone située au nord-est, les conditions d'accès et de pénétration ont été assez bonnes.

Le 'Kappametter' KT-20 s/c n'a pu fonctionner que quelques jours après le début des travaux dans la région de la Kara. Une solution a été trouvée après environ deux semaines de tractations.

En fin, certaines mesures ont été faites soit sous de fines pluies soit sur les affleurements plus ou moins humides. D'autres points de mesures ont été localisés

soit sur des zones à peu ou pas d'affleurements, soit sur des formations en cours ou profondément altérées.

5.4 Traitement des données

Les données ont été traitées afin de s'adapter à la plate-forme de "Geosoft". Elles ont ensuite été géo-référencées suivant la zone UTM 31N et maillées suivant le "Minimum curvature". Ensuite, des traitements statistiques ont été faites afin de comprendre la répartition de la susceptibilité magnétique en fonctions des diverses lithologies couvertes. Ces traitements ont été effectués dans Excel 2010 et "OrginLab Pro v9.4". Les images en deux dimensions représentant les répartitions des susceptibilités magnétiques dans l'espace horizontale (figure 27 et figure 28).

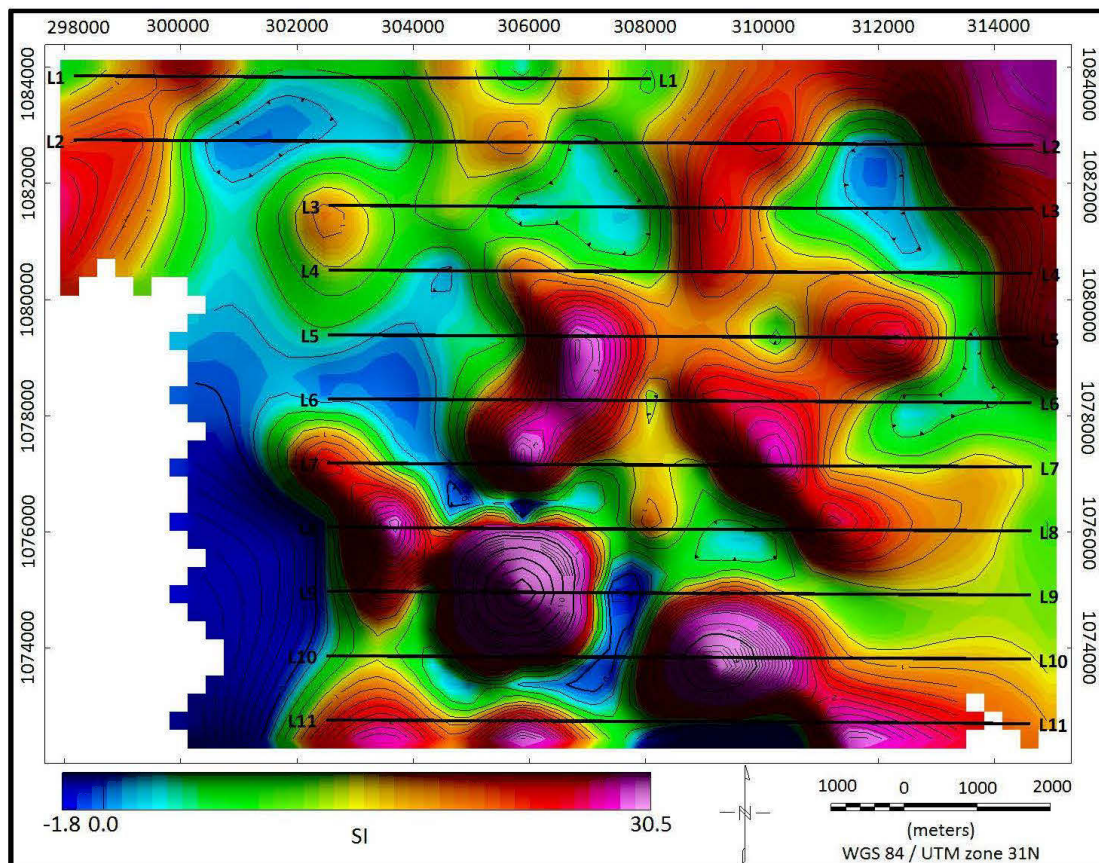


Figure 26 : Distribution de la susceptibilité dans la zone d'études nord-est (lignes noires rectilignes : profils; ligne noires courbes : courbes de niveau).

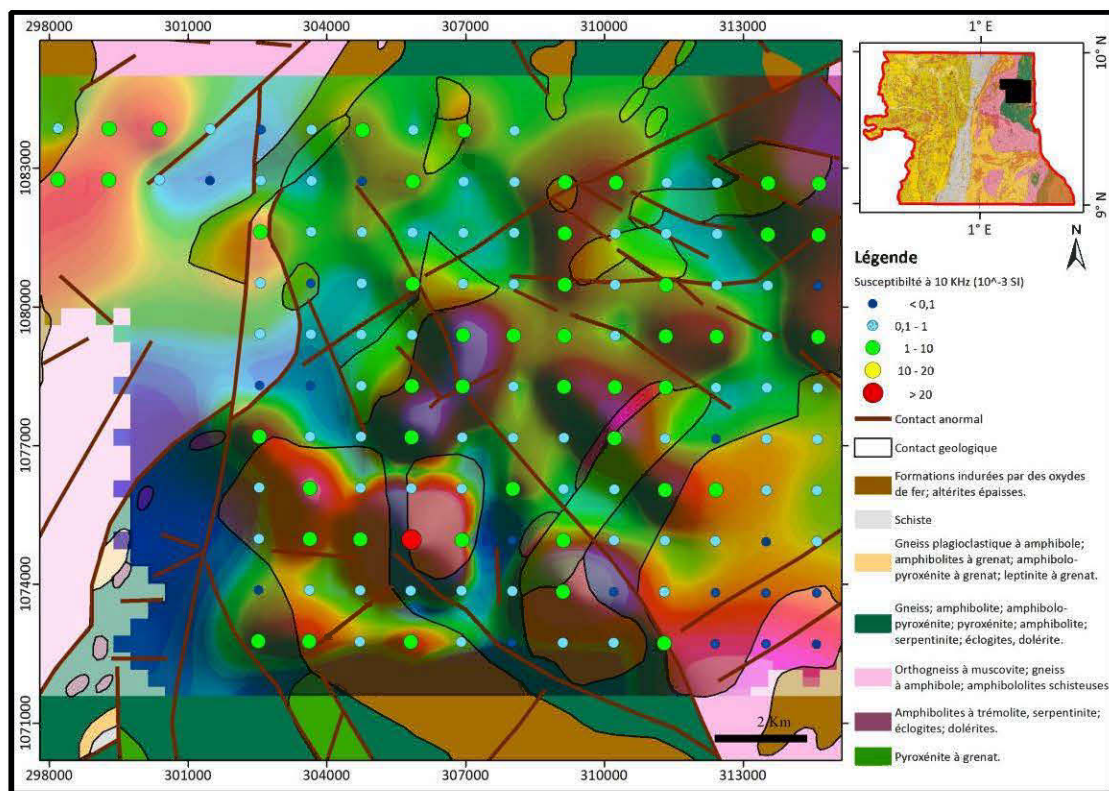


Figure 27 : Carte géologique superposée sur la carte de susceptibilité magnétique, zone d'études nord-est du Togo.

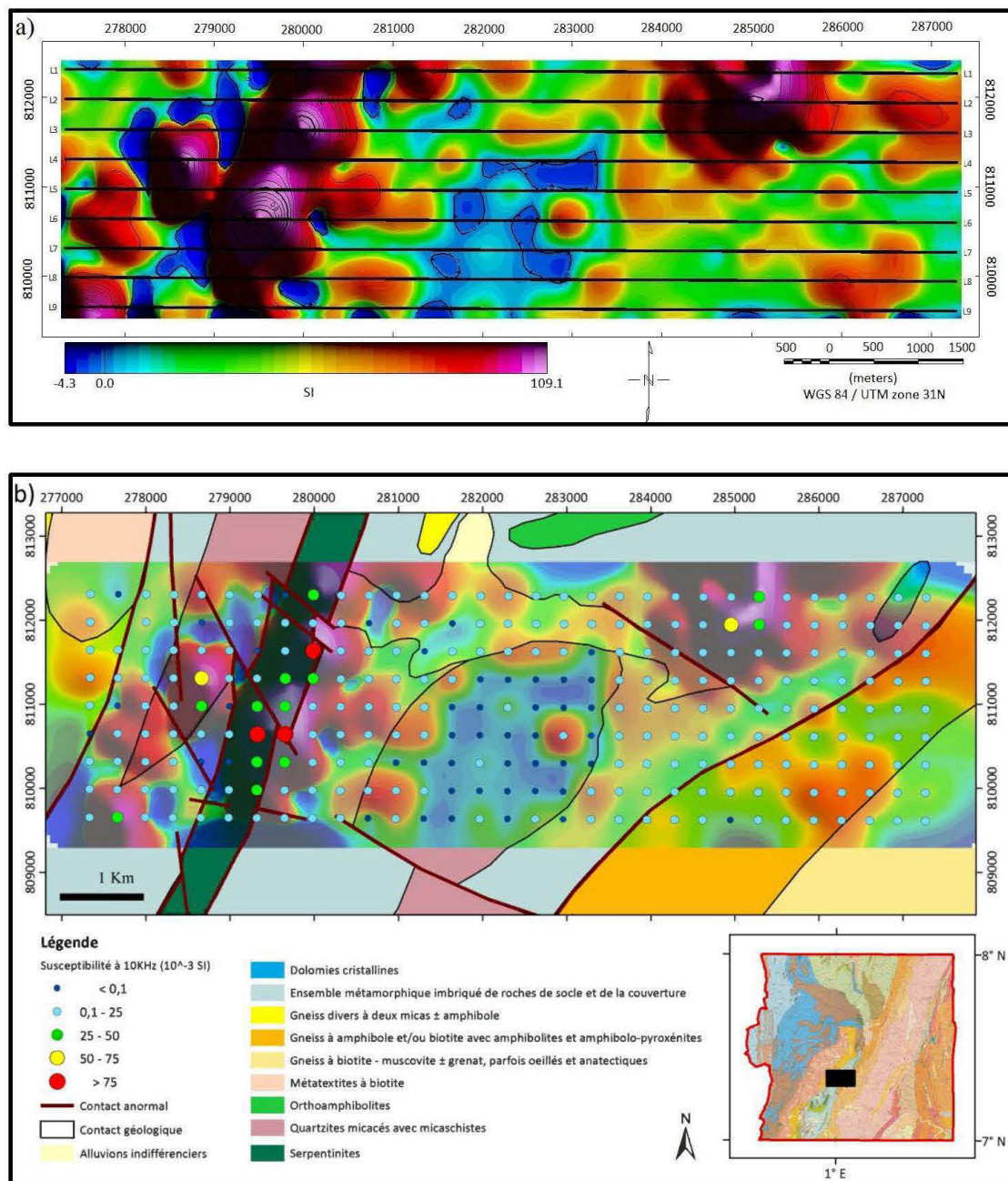


Figure 28 : Distribution de la susceptibilité dans la zone sud-ouest (a) et la carte géologique superposée sur la carte de susceptibilité (b).

5.5 Analyse des données de susceptibilité

Les propriétés statistiques de chaque famille sont calculées (tableau 10 et tableau 11). Des diagrammes de type *"Box plot"* et des histogrammes de fréquence sont réalisés à partir de l'ensemble de données afin d'analyser la représentativité des valeurs de susceptibilité pour chacune des lithologies. Cela permet de quantifier la répartition spatiale de susceptibilité et la correspondance entre cette dernière et les différents groupes lithologiques.

L'analyse des images en deux dimensions montre une répartition arbitraire de la susceptibilité magnétique au niveau de la zone nord-est avec la présence de fortes susceptibilités dans la région située au centre-sud. Les formations géologiques correspondent à un ensemble métamorphique composé de gneiss, d'amphibolites, d'amphibolo-pyroxénites, de pyroxénites, de serpentinites, d'éclogites et particulièrement de formations endurées par des oxydes de fer. Tout compte fait, la répartition reste évasive. Ceci peut s'expliquer par le fait que le maillage de la zone a été assez grossier avec des pas d'un kilomètre. De plus, les valeurs des susceptibilités mesurées à la fréquence 10KHz sont faibles. En plus, leurs médianes (tableau 10 et tableau 11) dans cette zone n'ont guère dépassées $1 \times 10^{-3} SI$. Aucune tendance ne s'est dessinée en ce qui concerne la lithologie.

Dans la zone d'études du sud-ouest (figure 31), par contre, où le maillage était plus serré avec des pas d'environ 330m, il s'est dessiné une nette ségrégation au niveau des unités lithologies. On observe sur le secteur ouest une bande orientée sud sud-ouest à nord nord-est à forte susceptibilités magnétiques. Cette bande est constituée de bandes de serpentinites formant de collines d'altitude moyenne de 400m et séparée par des talwegs. Les susceptibilités les plus élevées atteignent les valeurs $100 \times 10^{-3} SI$ pour les mesures effectuées à fréquence de 10KHz. Les valeurs des susceptibilités les

plus faibles sont rencontrées dans la partie du centre-sud de la région où les hautes collines sont essentiellement formées de quartzites (tableau 10 et tableau 11).

5.5.1 Susceptibilité dans la zone nord-est

Les données de susceptibilité magnétique de la zone nord-est ont été compilées et représentées sous forme de diagrammes de type "*Box plot*" (figure 29 et figure 30) et d'histogrammes (figure 31).

Tableau 10 : Résultats de l'analyse statistique de la susceptibilité mesurée à la 10 KHz (10^{-3} SI), zone nord-est.

Formations géologiques	Formations indurées par des oxydes de fer; altérites épaisses	Gneiss, amphibolites, amphibolo-pyroxénites, pyroxénites, amphibolites, serpentinites, éclogites, dolérites	Pyroxénites à grenat	Orthogneiss à muscovite; gneiss à amphibole; amphibolites schisteuses
Lithologie simplifiée	L	G	Pg	Om
Nombre total	37	62	12	14
Moyenne	2,12	0,999	0,691	1,127
Écart type	5,249	0,843	0,588	0,864
Somme	78,434	61,921	8,287	15,773
Minimum	0,189	0,007	0,03	0,29
Médiane	0,807	0,856	0,586	0,863
Maximum	32,024	4,068	1,473	2,938

Tableau 11 : Résultats de l'analyse statistique de la susceptibilité mesurée à la
100 KHz (10^{-3} SI), zone nord-est.

Formations géologiques	Formations indurées par des oxydes de fer; altérites épaisses	Gneiss, amphibolites, amphibolo-pyroxénites, pyroxénites, amphibolites, serpentinites, éclogites, dolérites	Pyroxénites à grenat	Orthogneiss à muscovite; gneiss à amphibole; amphibolites schisteuses
Lithologie simplifiée	L	G	Om	Pg
Nombre total	33	65	12	14
Moyenne	4,729	2,704	2,423	3,216
Écart type	9,517	1,044	0,613	0,989
Somme	156,058	175,728	29,072	45,018
Minimum	0,927	0,745	1,562	1,827
Médiane	2,8	2,656	2,279	3,012
Maximum	56,621	6,01	3,48	5,771

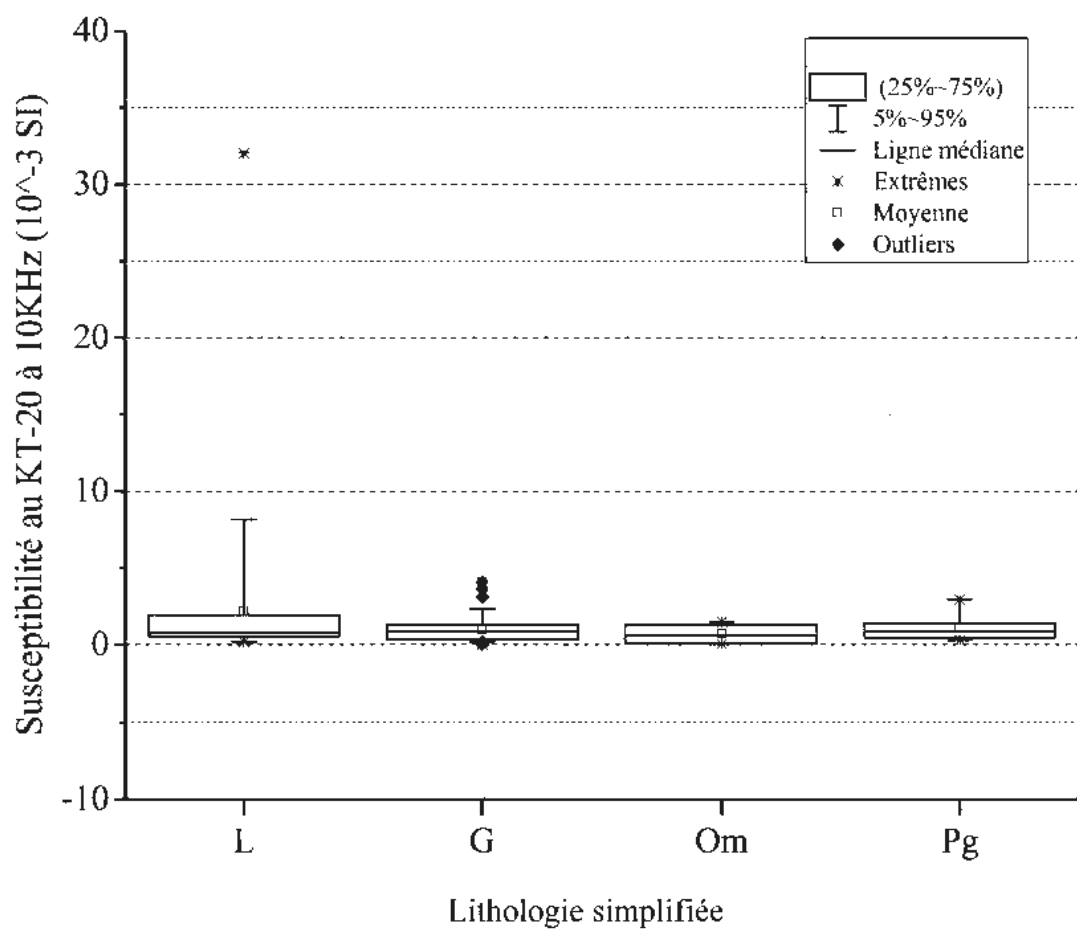


Figure 29 : Distribution des susceptibilités magnétiques en fonction de la lithologie dans la zone d'études nord-est, susceptibilités mesurée au KT-20 à 10 KHz (10^{-3} SI).

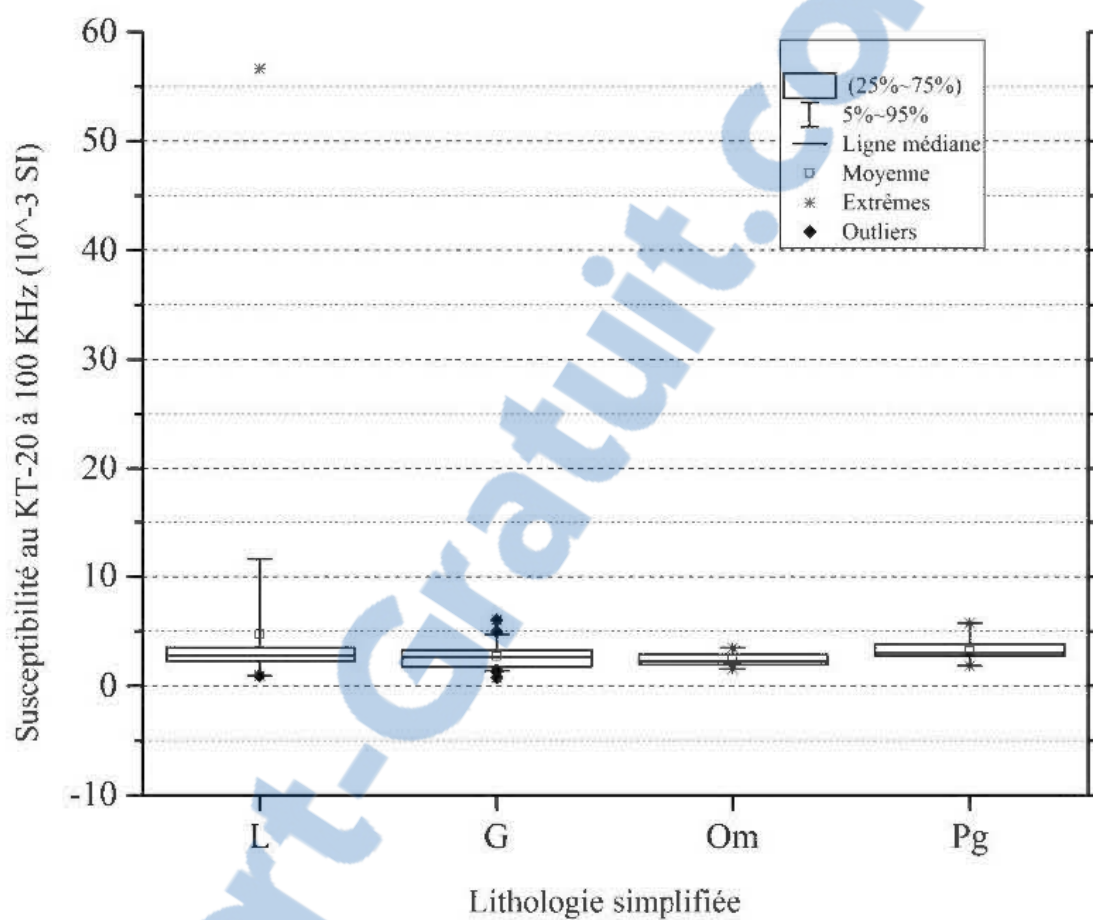


Figure 30 : Distribution des susceptibilités magnétiques en fonction de la lithologie dans la zone d'études nord-est; susceptibilités mesurées au KT-20 à 100 KHz (10^{-3} SI).

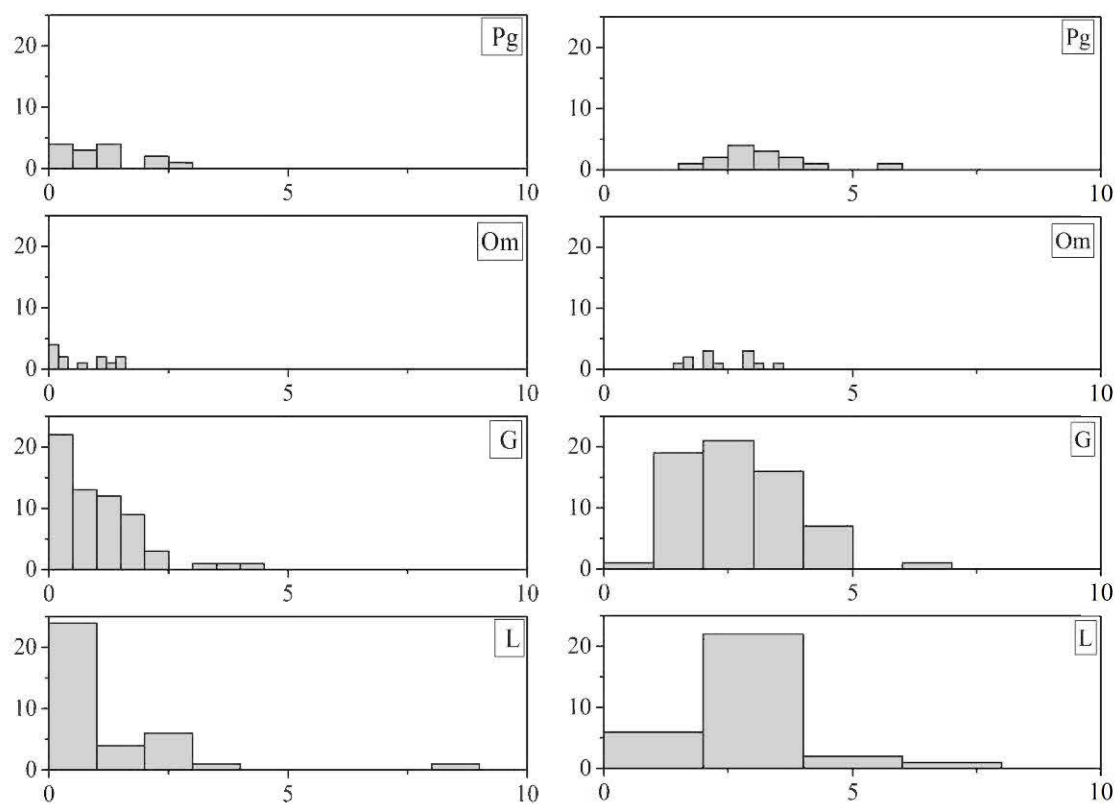


Figure 31 : Histogrammes montrant la distribution de la susceptibilité mesurée sur affleurements de roches au KT-20 à 10 KHz (10^{-3} SI) (à gauche) et au KT-20 à 100 KHz (10^{-3} SI) (à droite) dans la zone d'études nord-est.

5.5.2 Susceptibilité dans la zone sud-ouest

Les données de susceptibilité magnétique ont été compilées sur des bases arithmétique et statistique. Les diagrammes de type *"Box plot"* (figure 32 et figure 33) ont été réalisés à l'aide des logiciels *"Excel"* et *"Origin Pro"* de même que les histogrammes (figure 34) afin de montrer la distribution de la susceptibilité magnétique au sein des différentes unités lithologiques. Dans la zone du sud-ouest, du fait de leur faible représentativité, certaines lithologies n'ont pas été prises en compte.

Tableau 12 : Résultats de l'analyse statistique de la susceptibilité mesurée au KT-20 à la 10 KHz (10^{-3} SI) de la zone sud-ouest.

Formations géologiques	Alluvions indifférenciers	Dolomies cristallines	Gneiss à amphibole et/ou biotite avec amphibolites et amphibolo-pyroxénites	Gneiss à biotite - muscovite plus ou moins grenat, parfois ocellés et anatectiques	Gneiss divers à deux micas plus ou moins amphibole	Métatextites à biotite	Migmatites	Quartzites micacés et micaschistes	Serpentinites
Lithologie simplifiée	Ai	D	Ga	Gb	G	Mb	M	Qm	S
Nombre total	26,00	2,00	37,00	6,00	5,00	3,00	112,00	67,00	20,00
Moyenne	2,08	1,19	0,71	0,34	0,70	0,48	3,58	1,87	29,20
Écart type	4,62	1,38	0,58	0,16	0,88	0,50	8,66	8,03	32,31
Somme	54,18	2,37	26,17	2,05	3,49	1,44	400,44	125,58	584,09
Minimum	0,01	0,21	0,08	0,16	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Médiane	0,71	1,19	0,59	0,36	0,43	0,43	0,79	0,15	24,32
Maximum	23,18	2,16	2,28	0,50	2,23	1,00	56,24	56,58	101,73

Tableau 13 : Résultats de l'analyse statistique de la susceptibilité mesurée au KT-20 à la 100 KHz (10^{-3} SI) de la zone sud-ouest.

Formations géologiques	Alluvions indifférenciers	Dolomies cristallines	Gneiss à amphibole et/ou biotite avec amphibolites et amphibolo-pyroxénites	Gneiss à biotite - muscovite plus ou moins grenat, parfois oeillés et anatectiques	Gneiss divers à deux micas plus ou moins amphibole	Métatextites à biotite	Migmatites	Quartzites micacés et micaschistes	Serpentinites
Lithologie simplifiée	Ai	D	Ga	Gb	G	Mb	M	Qm	S
Nombre total	26	2	37	6	5	3	112	67	20
Moyenne	4,366	3,16	2,794	2,184	3,047	2,726	5,987	4,028	34,958
Écart type	4,878	1,184	0,74	0,163	0,893	0,879	8,554	7,442	37,456
Somme	113,528	6,321	103,382	13,102	15,236	8,179	670,585	269,851	699,156
Minimum	1,752	2,323	1,832	2,036	1,954	1,934	1,737	1,287	2,034
Médiane	2,973	3,16	2,543	2,126	3,033	2,573	3,081	2,588	29,246
Maximum	26,785	3,997	4,296	2,456	4,408	3,672	46,743	57,094	121,427

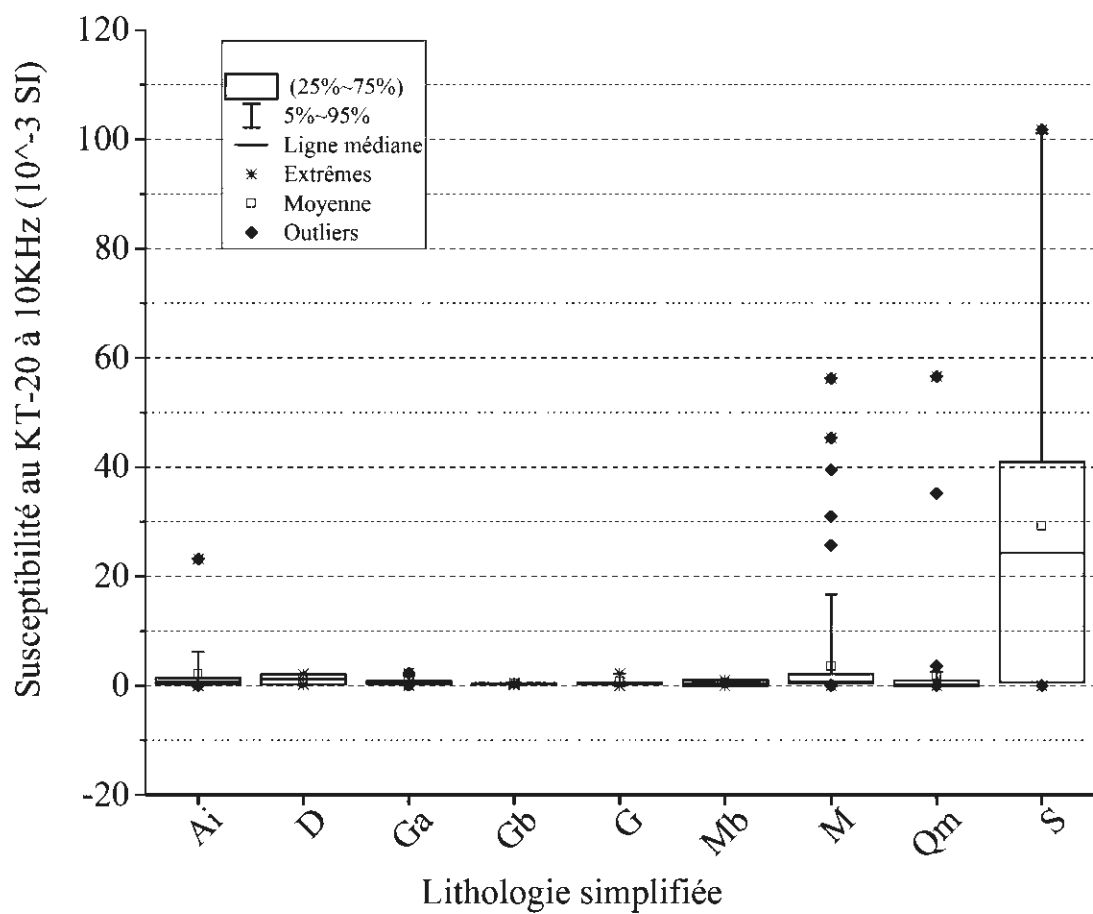


Figure 32 : Distribution des susceptibilités magnétiques en fonction de la lithologie dans la zone d'études sud-ouest; susceptibilités mesurées au KT-20 à 10 KHz (10^{-3} SI).

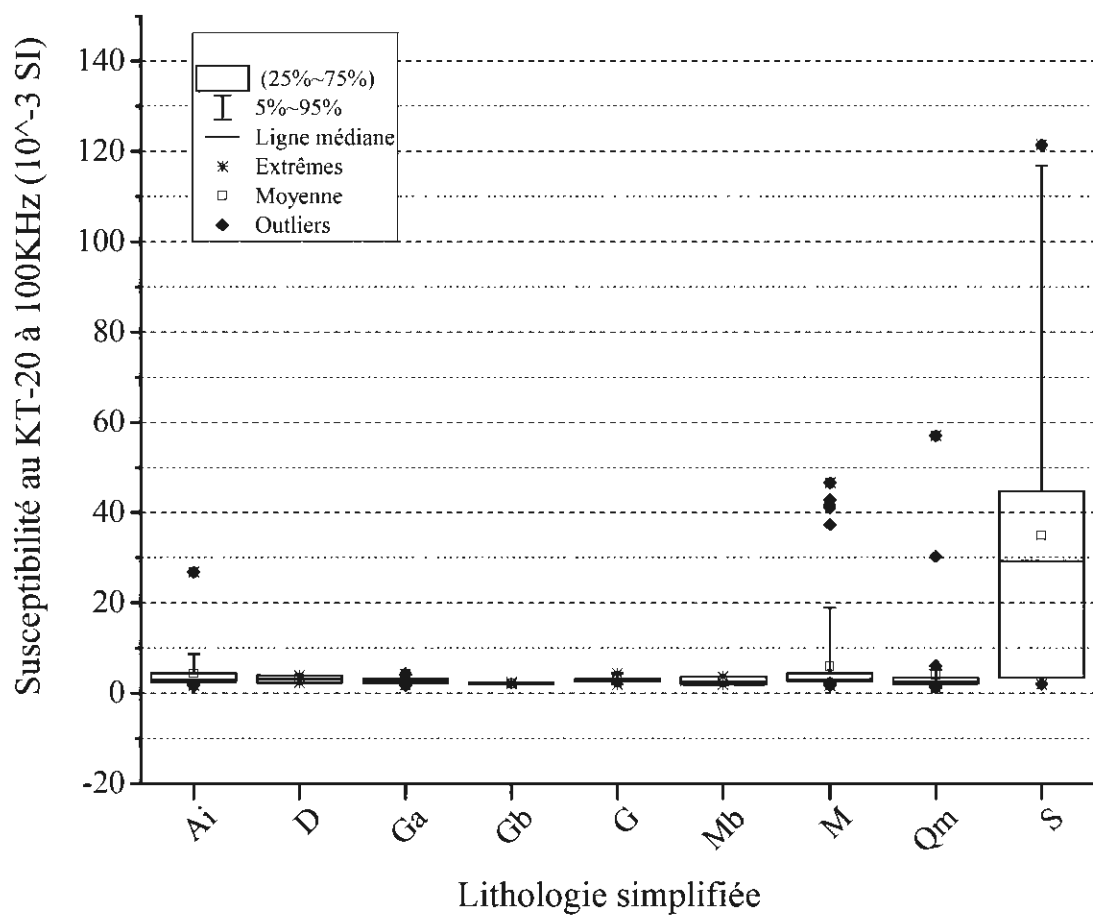


Figure 33 : Distribution des susceptibilités magnétiques en fonction de la lithologie dans la zone d'études sud-ouest; susceptibilités mesurées au KT-20 à 100 KHz (10^{-3} SI).

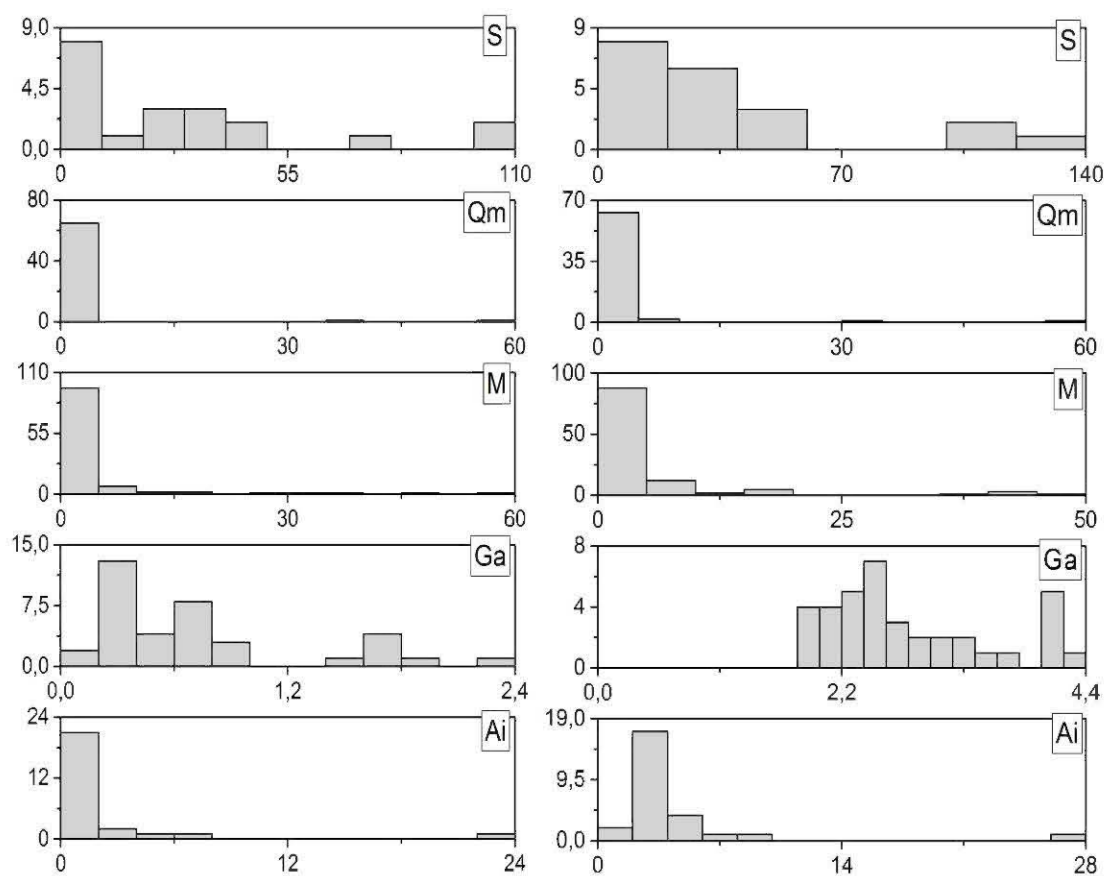


Figure 34 : Histogrammes montrant la distribution de la susceptibilité mesurée sur affleurements de roches au KT-20 à 10 KHz (10^{-3} SI) (à gauche) et au KT-20 à 100 KHz (10^{-3} SI) (à droite) dans la zone d'études sud-ouest.

5.6 Apport des données de susceptibilités magnétiques

Les mesures des susceptibilités dans les zones d'études et les images composites générées peuvent constituer des indicateurs pour la prospection minière. Les signatures magnétiques plus visibles dans la zone d'études du sud-ouest permettent de conclure sur la présence d'anomalies magnétiques dans ce secteur.

L'ensemble des données collectées, et en dépit des conditions climatiques peu favorables qui ont prévalu durant ces travaux de terrain, ont été compilées suivant les formations géologiques. L'analyse des résultats donne des éléments importants en matière de cartographie géologique dans les deux zones d'études. Les unités lithologiques, surtout celles de la zone d'études du sud-ouest, ont été clairement définies par la distribution de susceptibilité magnétique à travers les images composites 2D. Ces résultats sont forts intéressants et peuvent servir d'indicateurs dans la discrimination des formations géologiques.

Nous présumons que si les mesures de susceptibilité avaient été faites dans les mêmes conditions dans la zone du nord-est, les résultats seraient intéressants. Les mesures de susceptibilité dans la zone sud-ouest avec une maille plus serrée représentent une résolution spatiale plus élevée que celle dans la zone nord-est, qui sont probablement des résultats assez pertinents.

De toute évidence, l'existence de données de forages et/ou de carottes pourrait donner lieu à des techniques de traitement plus poussées et renseigner davantage sur les formations géologiques sous-jacentes dans la 3^e dimension, ce qui n'est malheureusement, pas le cas.

Toutefois, au vu de ces résultats et de ceux des travaux antérieurs, la zone de suture apparaît comme une zone à fort potentiel en métaux de base et minéralisations connexes. Quelques travaux de prospection et de recherche effectués ont pu

répertorier plusieurs indices de minéralisations dans la zone du sillon mafique-ultramafique notamment des minéralisations de chromite, de nickel, de platine, de bauxite etc.

Les mesures des susceptibilités dans les zones d'études peuvent constituer des indicateurs pour la prospection minière. Des levés magnétiques de couverture nationale seraient donc d'un intérêt inestimable pour le secteur minier togolais. De plus, au-delà de leur l'importance dans le secteur minier, comme mentionnées ci-avant, les données magnétiques, en particulier, constituent un outil très efficace en cartographie géologique et dans le domaine de la gestion environnementale (tableau 3).

Cependant, s'il faut tenir compte des facteurs pouvant affecter (La nature des échantillons, degré d'altération des roches, les aléas climatiques, les conditions liées à l'outil de mesure...), il convient de rappeler l'importance que revêt les données de susceptibilité magnétique qui corrèlent souvent bien avec le données du vecteur champ magnétique total sans tenir compte de la profondeur.

En effet, La zone de suture avec ces massifs mafiques et ultramafiques est susceptible de regorger d'énormes potentialités géologiques et minières. Avec le développement des dernières technologies dans les traitements de signaux et la modélisation, l'acquisition de vecteur champ magnétique total dévoilerait des informations importantes sur des formations encore trop peu explorées et donc mal connues.

CHAPITRE 6

DISCUSSION ET CONCLUSION

6.1 *Sommaire*

Cette étude basée sur deux exemples réels indique la nécessité de l'utilisation de la magnétométrie dans la cartographie géologique en particulier et dans le secteur minier en général. Le but ultime de cette recherche est d'utiliser des techniques de filtrages adéquates pour le traitement des données magnétiques et de faire une modélisation inverse (non contrainte) afin d'analyser la distribution tridimensionnelle de la susceptibilité magnétique des deux zones d'études du Québec. L'étude n'a pas pris en compte l'intégration des contraintes; les modèles 3D sont alors non contraintes et renseignent beaucoup moins que les modèles à inversion contrainte. L'aimantation rémanente n'est pas en générale pris en compte dans le bouclier canadien, et donc pareillement dans cette présente étude. Le but ultime de cette recherche est d'inverser les données magnétiques dans le cadre de la géophysique appliquée à la cartographie géologique et donc à l'exploration des ressources naturelles afin de récupérer les distributions tridimensionnelles de susceptibilité magnétique souterraine de toute magnitude et de complexité géométrique.

Une technique automatisée utilisant le logiciel *Geosoft de Oasis montaj* au sein duquel est incorporé l'algorithme VOXI a été mise en œuvre en utilisant une discrétisation de volume fini et la méthode des moindres carrées. Les deux zones d'intérêt localisées sur le territoire de la province du Québec ont été discrétisées en de nombreuses cellules parallélépipédiques, chacune avec une susceptibilité constante, ce qui permet de générer des modèles de complexité géométrique arbitraire. Cette méthode de modélisation par la méthode des volumes finis est valable pour tout

milieu linéaire et convient le mieux à la modélisation directe et/ou inverse de la réponse des unités fortement magnétiques.

La magnétométrie constitue une des méthodes géophysiques les mieux adaptées dans la réalisation de la cartographie géologique. La magnétométrie aéroportée facilite l'accès à des régions morphologiquement complexe, densément couvertes et difficilement accessibles. Tout ceci, soutenu par des coûts d'exploitation concurrentiel des techniques plus pointues et à champ d'action trop réduit.

6.2 Lien intrinsèque entre la géologie et le champ magnétique

De toute évidence, la géologie ne peut se défaire de la géophysique. Les roches de la croûte terrestre peuvent être classées sous diverses formes parmi lesquelles les caractéristiques physiques présentent presque dans tous les matériaux de l'écorce terrestre.

Dans le cadre des travaux effectués, en dépit de la résolution faible des inversions, il ressort, néanmoins, clairement dans la zone d'études 2 du Québec que certaines structures qui sont non visibles à la surface sont apparues à de grandes profondeurs allant jusqu'à 10 km. Les diverses anomalies dans les formations volcaniques ont été interprétées comme étant des dykes associés au système de faille. L'hypothèse d'une circulation de fluides hydrothermaux dans ce système de faille est à l'origine de diverses minéralisations notamment celles de métaux de base.

Pour se faire, le processus d'analyse, d'interprétation et de déduction implique un équilibre judicieux entre la rigueur mathématique du géophysicien et les compétences descriptives du géologue. À deux, ils forment une source intellectuelle légitime pouvant contribuer à la meilleure connaissance géologique de base d'une zone et permettent la réduction du facteur de risque d'exploration. Les individus auront des idées différentes quant à l'endroit où le processus s'optimise. La rigueur

mathématique à elle seule serait moins efficace à contribuer à la compréhension de la géologie.

6.3 Possibilités de transposition de la méthode en zone intertropicale

À partir des résultats obtenus de ces différents travaux dans les deux régions (polaire et intertropicale), tout porte à croire que la géologie ne peut mieux se faire qu'avec la géophysique. Ces travaux confirment alors le rôle et l'importance que revêtent les données du champ magnétique dans l'interprétation de la géologie.

En dépit de la faible résolution des inversions a conduit à l'obtention de moins de détails des modèles générés. Par contre, les résultats des travaux ont permis de concilier les données géologiques et géophysiques disponibles. Ceci permettra également aux lecteurs d'ouvrir plusieurs perspectives sur les zones d'études.

Les travaux effectués en République togolaise, du moins ceux de la région des plateaux au sud-ouest sont très satisfaisants et corréleront assez bien avec la géologie de surface. Les massifs à bancs quartzitiques à faibles valeurs de susceptibilité magnétique ont été bien discriminés. Par ailleurs, les mesures faites sur les collines de serpentinites ont affichées des valeurs beaucoup plus importantes et confirment ainsi les valeurs théoriques. Il est évident que la zone apparaît être une zone mafique-ultramafique comme le soutient les travaux antérieurs et constitue une zone potentielle de minéralisations. En effet, quelques indices de minéralisations ont été découverts dans la zone du sillon mafique-ultramafique; on peut citer entre autres: (1) les chromites du mont Haïto et des collines de Farendè dont les réserves prouvées restent encore faibles avec, respectivement, des teneurs de 25% Cr métal (un ratio Cr/Fe de 2,46) et 15% (un ratio Cr/Fe de 1); (2) le nickel saprolitique, mis en évidence sur le mont Kpoté (région du sud-ouest du sillon basique-ultrabasique); (3) le platine des monts Toldja et Soto;(4) le bauxite du mont Agou etc.

Des travaux de levés magnétiques sont fortement suggérés. Ces travaux s'ils sont faits pourraient éclairer davantage sur cette zone susceptible d'être économiquement intéressante. Ces données sont particulièrement efficaces pour compléter les données de surface et confirmer les hypothèses formulées pour la profondeur. Du fait de l'orientation de la zone de suture et de ses massifs mafiques et ultramafiques, une campagne de levé magnétique combinée de la gravimétrie et de la radiométrie sur toute l'étendue du territoire (superficie modeste) serait d'une importance inestimable sur plusieurs plans à savoir :

- l'actualisation de la carte géologique;
- le ciblage des zones potentielles pour l'exploration des ressources naturelles (ressources minérales et hydrauliques); et
- la gestion environnementale durable.

Des vols orientés est-ouest, donc recoupant transversalement le domaine mafique-ultramafique et l'ensemble de la chaîne des monts du Togo pourraient s'avérer efficaces, non seulement, pour mieux circonscrire les structures sous-jacentes mais permettre de déterminer leur pendage.

BIBLIOGRAPHIE

- Abbass, A. A. et Mallam, A. (2013). Estimating the Thickness of Sedimentation within Lower Benue Basin and Upper Anambra Basin, Nigeria, Using Both Spectral Depth Determination and Source Parameter Imaging. *ISRN Geophysics*.
- Abedi, M., Gholami, A. et Norouzi, G.-H. (2013). A stable downward continuation of airborne magnetic data: A case study for mineral prospectivity mapping in Central Iran. *Computers & Geosciences*, 52, 269-280.
- Affaton, P., Kröner, A. et Seddoh, K. F. (2000). Pan-African granulite formation in the Kabye Massif of northern Togo (West Africa): Pb–Pb zircon ages. *International Journal of Earth Sciences*, 88 (4), 778-790.
- Agbossoumondé, Y., Guillot, S. et Ménot, R. P. (2004). Pan-African subduction–collision event evidenced by high-P coronas in metanorites from the Agou massif (southern Togo). *Precambrian Research*, 135 (1–2), 1-21.
- Agbossoumonde, Y., Menot, R. P. et Guillot, S. (2001). Metamorphic evolution of Neoproterozoic eclogites from south Togo (West Africa). *Journal of African Earth Sciences*, 33 (2), 227-244.
- Agbossoumondé, Y., Ménot, R. P. et Nude, P. M. (2013). Geochemistry and Sm–Nd isotopic composition of the Agou Igneous Complex (AIC) from the Pan-African orogen in southern Togo, West Africa: Geotectonic implications. *Journal of African Earth Sciences*, 82, 88-99.
- Agbossoumondé, Y., Ménot, R. P., Paquette, J. L., Guillot, S., Yéssoufou, S. et Perrache, C. (2007). Petrological and geochronological constraints on the origin of the Palimé–Amlamé granitoids (South Togo, West Africa): A segment of the West African Craton Paleoproterozoic margin reactivated during the Pan-African collision. *Gondwana Research*, 12 (4), 476-488.
- Allard, M. et Bois, D. (1999). *La géophysique appliquée à l'exploration minérale*. Montréal: Rouyn-Noranda : Centre collégial de développement de matériel didactique, Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue.
- Aster, R. C., Thurber, C. H. et Borchers, B. (2005). *Parameter Estimation and Inverse Problems*. Amsterdam: Academic Press.

- Astic, T. et Chouteau, M. (2012). Modélisation 3D et interprétation géologique du flanc nord du camp minier de Matagami par intégration de données et inversions géophysiques: ProQuest Dissertations Publishing.
- Attoh, K., Samson, S., Agbossoumondé, Y., Nude, P. M. et Morgan, J. (2013). Geochemical characteristics and U–Pb zircon LA-ICPMS ages of granitoids from the Pan-African Dahomeyide orogen, West Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 79, 1-9.
- Baranov, V. (1957). A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, 22 (2), 359-382.
- Barnes, J. W. (1981). *Basic geological mapping*. Milton Keynes, Angleterre: Open University Press.
- Barton, C. E. (1988). Global and regional geomagnetic reference fields. *Exploration Geophysics*, 19 (3), 401-416.
- Bean, R. J. (1966). A Rapid Graphical Solution For The Aeromagnetic Anomaly Of The Two-Dimensional Tabular Body. *Geophysics*, 31 (5), 963-970.
- Bhattacharyya, B. K. (1965). Two-Dimensional Harmonic Analysis As A Tool For Magnetic Interpretation. *Geophysics*, 30 (5), 829-857.
- Bhattacharyya, B. K. (1966). Continuous Spectrum of the Total-Magnetic-Field Anomaly Due to a Rectangular Prismatic Body. *Geophysics*, 31 (1), 97-121.
- Blot, A., Affaton, P., Seddoh, K. F., Aregba, A. P., Godonou, S. K., Lenoir, F., Drouet, J.-J., Simpara, N. et Magat, P. (1988). Phosphates du Protérozoïque supérieur dans la chaîne des Dahomeyides (circa 600 Ma) de la région de Bassar (Nord-Togo, Afrique de l'Ouest. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 7 (1), 159-166.
- Boszczuk, P., Cheng, L. Z., Hammouche, H., Roy, P., Lacroix, S. et Cheillett, A. (2011). A 3D gravity data interpretation of the Matagami mining camp, Abitibi Subprovince, Superior Province, Québec, Canada: Application to VMS deposit exploration: Application to VMS deposit exploration. *Journal of Applied Geophysics*, 75 (1), 77-86.
- Briggs, I. C. (1974). Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39 (1), 39-48.

- Broome, J. (1996). «Représentation et rehaussement des données aéromagnétiques: exemples empruntés au comté de Guysborough (Nouvelle-Écosse)», dans Broome, J., et al., *Interprétation des anomalies gravimétriques et magnétiques à l'intention des non-spécialistes. Note d'un séminaire de l'Union canadienne de Géophysique*, Ottawa, Commission géologique du Canada. [Chap 11], p. 11.01-11.44.
- Broome, J., Feininger, T., Goodacre, A. K., Irvine, J., Keating, P., Losier, L., McGrath, P. H., Pilkington, M., Reford, M. S., Riddihough, R. et Teskey, D. J. (1996). *Interprétation des anomalies gravimétriques et magnétiques à l'intention des non-spécialistes. Note d'un séminaire de l'Union canadienne de Géophysique*, Ottawa, Commission géologique du Canada.
- Cella, F. et Fedi, M. (2012). Inversion of potential field data using the structural index as weighting function rate decay. *Geophysical Prospecting*, 60 (2), 313-336.
- Chala, D., Tairou, M. S., Wenmenga, U., Kwékam, M., Affaton, P., Kalsbeek, F., Tossa, C. et Houéto, A. (2015). Pan-African deformation markers in the migmatitic complexes of Parakou–Nikki (Northeast Benin). *Journal of African Earth Sciences*, 111, 387-398.
- Cheng, L. Z. et Mareschal, J.-C. (1999). *Interprétation des données de flux de chaleur et de gravité dans le bouclier canadien*. Université du Québec à Montréal,.
- Chouteau, M., Marcotte, D. et Shamsipour, P. (2011). 3D stochastic inversion and joint inversion of potential fields for multi scale parameters: ProQuest Dissertations Publishing.
- Da Costa, P. Y. D., Nguetnkam, J.-P., Mvoubou, C. M., Togbé, K. A., Ettien, J.-B. et Yao-Kouame, A. (2015). Old landscapes, pre-weathered materials, and pedogenesis in tropical Africa: How can the time factor of soil formation be assessed in these regions? *Quaternary International*, 376, 47-74.
- Dai, X. et Cheng, L. Z. (2013). *A research on three-dimensional response features of borehole electromagnetic method*.
- Deynoux, M., Affaton, P., Trompette, R. et Villeneuve, M. (2006). Pan-African tectonic evolution and glacial events registered in Neoproterozoic to Cambrian cratonic and foreland basins of West Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 46 (5), 397-426.

- Dobrin, M. B. et Savit, C. H. (1988). *Introduction to geophysical prospecting* (4th ed. ed.). New York: McGraw-Hill.
- Du Trémolet de Lacheisserie, É. et Cyrot, M. (2000). *Magnétisme*: EDP sciences.
- Dubois, J. (1997). *Géophysique*. Paris: Masson.
- Duclaux, G., Ménot, R. P., Guillot, S., Agbossoumondé, Y. et Hilairret, N. (2006). The mafic layered complex of the Kabyé massif (north Togo and north Benin): Evidence of a Pan-African granulitic continental arc root. *Precambrian Research*, 151 (1–2), 101-118.
- Dufréchoy, G., Harris, L. B. et Corriveau, L. (2014). Tectonic reactivation of transverse basement structures in the Grenville orogen of SW Quebec, Canada: Insights from gravity and aeromagnetic data. *Precambrian Research*, 241, 61-84.
- El-Hadj Tidjani, M., Affaton, P., Louis, P. et Socohou, A. (1997). Gravity characteristics of the Pan-African Orogen in Ghana, Togo and Benin (west Africa). *Journal of African Earth Sciences*, 24 (3), 241-258.
- Fedi, M., Hansen, P. C. et Paoletti, V. (2005). Analysis of depth resolution in potential-field inversion. *GEOPHYSICS*, 70 (6), A1-A11.
- Fedi, M. et Rapolla, A. (1999). 3-D inversion of gravity and magnetic data with depth resolution. *GEOPHYSICS*, 64 (2), 452-460.
- Foudil-Bey, N., Cheng, L. Z. et Royer, J.-J. (2012). *Développement d'outils d'interprétation de données géophysiques*.
- Gallardo-Delgado, L. A., Pérez-Flores, M. A. et Gómez-Treviño, E. (2003). A versatile algorithm for joint 3D inversion of gravity and magnetic data. *Geophysics*, 68 (3), 949-959.
- Ganerod, G. V., Ronning, J. S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Holmøy, K., Nilsen, B. et Braathen, A. (2006). Comparison of geophysical methods for sub-surface mapping of faults and fracture zones in a section of the Viggja road tunnel, Norway. [journal article] *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65 (3), 231-243.

- Guillen, A., Calcagno, P., Courrioux, G., Joly, A. et Ledru, P. (2008). Geological modelling from field data and geological knowledge. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171 (1-4), 158-169.
- Guillen, A., Calcagno, P., Courrioux, G., Joly, A. et Ledru, P. (2008). Geological modelling from field data and geological knowledge: Part II. Modelling validation using gravity and magnetic data inversion. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171 (1-4), 158-169.
- Hinse, J. W. (1985). The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps.
- Hinze, W. J. (1985). *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps*.
- Hocq, M., Dubé, C. et Caty, J. L. (1994). *Géologie du Québec* (Vol. 94): Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles.
- Hood, P., McGrath, P. et Teskey, D. (1985). Evolution of Geological Survey of Canada magnetic-anomaly maps: A Canadian perspective. *The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK*, 62-68.
- Hood, P. J. et Teskey, D. J. (1989). Aeromagnetic gradiometer program of the Geological Survey of Canada. *GEOPHYSICS*, 54 (8), 1012-1022.
- Hunt, C. P., Moskowitz, B. M. et Banerjee, S. K. (1995). Magnetic properties of rocks and minerals. *Rock physics & phase relations: a handbook of physical constants*, 189-204.
- Ignjatović, S., Vasiljević, I., Burazer, M., Banješević, M., Strmbanović, I. et Cvetković, V. (2014). 2D geological–geophysical model of the Timok Complex (Serbia, SE Europe): a new perspective from aeromagnetic and gravity data. [journal article] *Swiss Journal of Geosciences*, 107 (1), 101-112.
- Irvine, J. (1996). «Les levés aéromagnétiques et leur utilité», dans Broome, J., et al., *Interprétation des anomalies gravimétriques et magnétiques à l'intention des non-spécialistes. Note d'un séminaire de l'Union canadienne de Géophysique*, Ottawa, Commission géologique du Canada. [Chap 7], p. 7.1-7.19.
- Jakosky, J. J. (1950). *Exploration Geophysics*. Los Angeles, Trija Publishing Co., 1195.

- James, D. T., Connelly, J. N., Wasteneys, H. A. et Kilfoil, G. J. (1996). Paleoproterozoic lithotectonic divisions of the southeastern Churchill Province, western Labrador. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 33 (2), 216-230.
- Keating, P. (1997). Automated trend reinforcement of aeromagnetic data. *Geophysical Prospecting*, 45 (3), 521-534.
- Kuhnke, F., Menvielle, M., Musmann, G., Karczewski, J. F., K gler, H., Cavot, C. et Schibler, P. (1998). The OPTIMISM/MAG Mars-96 experiment: magnetic measurements onboard landers and related magnetic cleanliness program. *Planetary and Space Science*, 46 (6), 749-767.
- Lelièvre, P. G. et Oldenburg, D. W. (2009). A 3D total magnetization inversion applicable when significant, complicated remanence is present. *Geophysics*, 74 (3), L21-L30.
- Lelièvre, P. G., Oldenburg, D. W. et Williams, N. C. (2009). Integrating geological and geophysical data through advanced constrained inversions*. *Exploration Geophysics*, 40 (4), 334-341.
- Li, Y. et Oldenburg, D. W. (1996). 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 61 (2), 394-408.
- Li, Y. et Oldenburg, D. W. (2000). Joint inversion of surface and three-component borehole magnetic data. *Geophysics*, 65 (2), 540-552.
- Li, Y. et Oldenburg, D. W. (2003). Fast inversion of large-scale magnetic data using wavelet transforms and a logarithmic barrier method. *Geophysical Journal International*, 152 (2), 251-265.
- Liu, C., Cheng, L. Z., Cloutier, V. et Chouteau, M. (2014). *New algorithm to localize magnetic anomaly sources*.
- Lowes, F. J. (1974). Do Magnetometers Measure B or H? *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 37 (1), 151-155.
- MacLeod, I. N., Jones, K. et Dai, T. F. (1993). 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. *Exploration Geophysics*, 24 (4), 679-688.
- McGrath, P. H. (1996). «Le magnétisme terrestre, sa terminologie et ses manifestations vus sous l'angle de l'interprétation des données», dans Broome,

- J., et al., Interprétation des anomalies gravimétriques et magnétiques à l'intention des non-spécialistes. Note d'un séminaire de l'Union canadienne de Géophysique, Ottawa, Commission géologique du Canada. [Chap 10], p. 10.01-10.68.
- Ménot, R. P. et Seddoh, K. F. (1985). The eclogites of the Lato hills, south Togo, West Africa: Relics from the early tectonometamorphic evolution of the Pan-African orogeny. *Chemical Geology*, 50 (1-3), 313-330.
- Merrill, R. T. (1983). *The Earth's Magnetic Field : Its History, Origin and Planetary Perspective*. London: Academic Press.
- Mooney, H. M. et Bleifuss, R. (1953). Magnetic susceptibility measurements in Minnesota part II: Analysis of field results. *Geophysics*, 18 (2), 383-393.
- Myers, D. E. (1982). Matrix formulation of co-kriging. [journal article] *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 14 (3), 249-257.
- Nabighian, M. N. (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37 (3), 507-517.
- Nabighian, M. N. (1974). Additional Comments on the Analytic Signal of Two-Dimensional Magnetic Bodies with Polygonal Cross-Section. *Geophysics*, 39 (1), 85-92.
- Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., Phillips, J. D. et Ruder, M. E. (2005). The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70 (6), 33ND-61ND.
- Natland, J. H. (2002). *Magnetic susceptibility as an index of the lithology and composition of gabbros, ODP Leg 176, Hole 735B, Southwest Indian Ridge*. Communications présentées au Proc. ODP, Sci. Results.
- Nelson, J. B. (1988). Calculation of the magnetic gradient tensor from total field gradient measurements and its application to geophysical interpretation. *Geophysics*, 53 (7), 957-966.
- Nunes, T. M., Barbosa, V. C. F. et Silva, J. B. C. (2008). Magnetic Basement Depth Inversion in the Space Domain. *Pure and Applied Geophysics*, 165 (9-10), 1891-1911.

- Oladunjoye, M. A., Olayinka, A. I., Alaba, M. et Adabanija, M. A. (2016). Interpretation of high resolution aeromagnetic data for lineaments study and occurrence of Banded Iron Formation in Ogbomoso area, Southwestern Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 114, 43-53.
- Oruç, B. et Selim, H. H. (2011). Interpretation of magnetic data in the Sinop area of Mid Black Sea, Turkey, using tilt derivative, Euler deconvolution, and discrete wavelet transform. *Journal of Applied Geophysics*, 74 (4), 194-204.
- Peters, L. J. (1949). The direct approach to magnetic interpretation and its practical application. *Geophysics*, 14 (3), 290-320.
- Pilkington, M. (2007). Locating geologic contacts with magnitude transforms of magnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, 63 (2), 80-89.
- Pilkington, M. et Keating, P. (1996). «Innovation en matière d'interprétation des anomalies magnétiques et gravimétriques», dans Broome, J., et al., *Interprétation des anomalies gravimétriques et magnétiques à l'intention des non-spécialistes. Note d'un séminaire de l'Union canadienne de Géophysique, Ottawa, Commission géologique du Canada. [Chap 13], p. 13.01-13.36.*
- Porter, S. M., Knoll, A. H. et Affaton, P. (2004). Chemostratigraphy of Neoproterozoic cap carbonates from the Volta Basin, West Africa. *Precambrian Research*, 130 (1), 99-112.
- Portniaguine, O. et Zhdanov, M. S. (2002). 3-D magnetic inversion with data compression and image focusing. *GEOPHYSICS*, 67 (5), 1532-1541.
- Rahman, M. M. et Ullah, S. E. (2009). Inversion of Gravity Data for Imaging of a Sediment-basement Interface: A Case Study in the Northwestern Part of Bangladesh. *Pure and Applied Geophysics*, 166 (12), 2007-2019.
- Rahman, M. M. et Ullah, S. E. (2009). Inversion of Gravity Data for Imaging of a Sediment-basement Interface: A Case Study in the Northwestern Part of Bangladesh. [Journal article] *Pure and Applied Geophysics*, 166 (12), 2007-2019.
- Reeves, C. (2005). Aeromagnetic surveys: principles, practice and interpretation. *Course unit i*, 50, 150 pages.
- Reford, M. (1980). Magnetic method. *Geophysics*, 45 (11), 1640-1658.

- Reford, M. et Sumner, J. (1964). Aeromagnetism. *Geophysics*, 29 (4), 482-516.
- Reford, M. S. (1996). «Introduction à la prospection aéromagnétique», dans Broome, J., et al., *Interprétation des anomalies gravimétriques et magnétiques à l'intention des non-spécialistes. Note d'un séminaire de l'Union canadienne de Géophysique*, Ottawa, Commission géologique du Canada. [Chap 8], p. 8.1-8.36.
- Regan, R. D. et Rodriguez, P. (1981). An overview of the external magnetic field with regard to magnetic surveys. *Surveys in Geophysics*, 4 (3), 255-296.
- Reid, A. B., Allsop, J., Granser, H., Millett, A. t. et Somerton, I. (1990). Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55 (1), 80-91.
- Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*: Wiley.
- Rivers, T., Culshaw, N., Hynes, A., Indares, A., Jamieson, R. et Martignole, J. (2012). The Grenville Orogen – A post-LITHOPROBE perspective. *Tectonic Styles in Canada: The LITHOPROBE Perspective*, 97-236.
- Rivers, T., Martignole, J., Gower, C. F. et Davidson, A. (1989). New tectonic divisions of the Grenville Province, Southeast Canadian Shield. *Tectonics*, 8 (1), 63-84.
- Robert, F. (1989). Internal structure of the Cadillac tectonic zone southeast of Val d'Or, Abitibi greenstone belt, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26 (12), 2661-2675.
- Roest, W. R., Verhoef, J. et Pilkington, M. (1992). Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57 (1), 116-125.
- Rozimant, K., Büyüksaraç, A. et Bektaş, Ö. (2009). Interpretation of Magnetic Anomalies and Estimation of Depth of Magnetic Crust in Slovakia. *Pure and Applied Geophysics*, 166 (3), 471-484.
- Rozimant, K., Büyüksaraç, A. et Bektaş, Ö. (2009). Interpretation of Magnetic Anomalies and Estimation of Depth of Magnetic Crust in Slovakia. [journal article] *Pure and Applied Geophysics*, 166 (3), 471-484.

- Sánchez, M. G., Allan, M. M., Hart, C. J. R. et Mortensen, J. K. (2014). Extracting ore-deposit-controlling structures from aeromagnetic, gravimetric, topographic, and regional geologic data in western Yukon and eastern Alaska. *Interpretation*, 2 (4), SJ75-SJ102.
- Sarma, B. S. P. et Verma, B. K. (2001). Aeromagnetic lineaments, basement structure and Kimberlite emplacement in Andhra Pradesh, India. *Geophysical Research Letters*, 28 (22), 4307-4310.
- Serway, R. A. (1988). *Physique* (2e ed. ed.). Montréal: Éditions HRW.
- Serway, R. A. (1992). *Physique* (3e éd. ed.). Laval: Études vivantes.
- Shamsipour, P., Marcotte, D. et Chouteau, M. (2012). 3D stochastic joint inversion of gravity and magnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, 79, 27-37.
- Sheriff, R. E. (1989). *Geophysical methods*. Englewood Cliffs, Nj: Prentice-Hall.
- Sheriff, R. E. et Scherrer, E. F. (2001). *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*.
- Simpara, N. K., Sougy, J. et Trompette, R. (1985). Lithostratigraphie et structure du Buem unité externe de la chaine panafricaine des Dahomeyides dans la region de Bassar (Togo). *Journal of African Earth Sciences* (1983), 3 (4), 479-486.
- Soulaimani, A., Jaffal, M., Maacha, L., Kchikach, A., Najine, A. et Saidi, A. (2006). Modélisation magnétique de la suture ophiolitique de Bou Azzer–El Graara (Anti-Atlas central, Maroc). Implications sur la reconstitution géodynamique panafricaine. *Comptes Rendus Geoscience*, 338 (3), 153-160.
- Soulaimani, A., Jaffal, M., Maacha, L., Kchikach, A., Najine, A. et Saidi, A. (2006). Modélisation magnétique de la suture ophiolitique de Bou Azzer–El Graara (Anti-Atlas central, Maroc). Implications sur la reconstitution géodynamique panafricaine. *Comptes Rendus Geoscience*, 338 (3), 153-160.
- Spector, A. et Grant, F. S. (1970). Statistical Models For Interpreting Aeromagnetic Data. *Geophysics*, 35 (2), 293-302.
- Spector, A., Hood, P. J., Farah, A. et Ahmed, W. (1985). 12. Applications of Aeromagnetic Data to Mineral-Resources Exploration—Baluchistan, Pakistan. Dans *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps* (pp. 132-143).

- Stanley, J. M. (1977). Simplified magnetic interpretation of the geologic contact and thin dike. *Geophysics*, 42 (6), 1236-1240.
- Strangway, D. W. (1966). Rock Magnetism and Geologic Correlation. *Society of Exploration Geophysicists, Mining Geophysics: Case histories*, 1, 54-66.
- Sylvain, J. P., Aregba, A. P., Assih-Edeou, P., Castaing, C., Chevrement, P., Collart, J. et Ouassane, I. (1986). Notice explicative de la carte géologique 1/200 000, Feuille Atakpamé (Mémoire No 4).
- Tairou, M. S., Affaton, P., Gélard, J.-P., Aïté, R. et Sabi, B. E. (2007). Panafrican brittle deformation and palaeostress superposition in northern Togo (West Africa). *Comptes Rendus Geoscience*, 339 (13), 849-857.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. et Keys, D. A. (1976). *Applied geophysics*. Cambridge: Harvard University Press.
- Terraplus. (2009). The Use of Magnetic Susceptibility of Rocks in Geological Exploration (Case histories study).
- Thériault, R. et Beauséjour, S. (2012). Geological map of Québec (pp. 8 pages-écrans). 2012 ed. --[Québec (Province)]: Géologie Québec, Ressources naturelles Québec.
- Thomas, M. D., Lowe, C., Morris, W. A., Ascough, G. et Canada, A. g. d. (1999). *Geophysics in mineral exploration: fundamentals and case histories*. St. John's, Nfld.: Geological Association of Canada.
- Thompson, D. T. (1982). EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47 (1), 31-37.
- Thurston, J. B. et Smith, R. S. (1997). Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI (TM) method. *Geophysics*, 62 (3), 807-813.
- Togbe, K. et Besnus, Y. (1994). Les chapeaux de fer de Pagala, Togo (Afrique de l'ouest). Un exemple de minéralisation supergène à protore sidéritique en Chaîne Dahomeyenne. *Journal of African Earth Sciences*, 19 (1-2), 43-49.
- Triantafilis, J. et Buchanan, S. M. (2010). Mapping the spatial distribution of subsurface saline material in the Darling River valley. *Journal of Applied Geophysics*, 70 (2), 144-160.

- Urquhart, W. E. S. et Strangway, D. W. (1985). 32. Interpretation of Part of an Aeromagnetic Survey in the Matagami Area of Quebec. Dans *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps* (pp. 426-438).
- Vacquier, V., Steenland, N. C., Henderson, R. G. et Zietz, I. (1951). Interpretation of Aeromagnetic Maps. *Geological Society of America Memoirs*, 47, 1-150.
- Verduzco, B., Fairhead, J. D., Green, C. M. et MacKenzie, C. (2004). New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23 (2), 116-119.
- Wardle, R. J., James, D. T., Scott, D. J. et Hall, J. (2002). The southeastern Churchill Province: Synthesis of a Paleoproterozoic transpressional orogen. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 39 (5), 639-663.
- Xiong, S.-Q., Tong, J., Ding, Y.-Y. et Li, Z.-K. (2016). Aeromagnetic data and geological structure of continental China: A review. [Journal article] *Applied Geophysics*, 13 (2), 227-237.

ANNEXES

ANNEXE A - BASE DE DONNÉES DES MESURES DE SUSCEPTIBILITÉS
MAGNÉTIQUES APPARENTES, PRISES SUR AFFLEUREMENTS AU KT-20
(10^{-3}SI) À 10KHZ ET À 100KHZ (ZONE D'ÉTUDES NORD-EST).

X_UTM31N	Y_UTM31N	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	LIGNE	LITHOLOGIE SIMPLIFIÉE
298189,27	1083851,62	378,00	0,46	1,82	1	L
303674,97	1083822,03	379,00	0,50	3,42	1	L
304772,10	1083816,21	379,00	1,09	4,97	1	G
305869,22	1083810,42	379,00	0,29	2,52	1	G
308063,44	1083798,95	383,00	0,52	2,98	1	G
299286,43	1083845,64	379,00	1,06	2,86	1	Om
300383,57	1083839,69	379,00	1,44	2,39	1	Om
301480,71	1083833,77	378,00	0,34	2,17	1	Om
302577,85	1083827,88	379,00	0,00	0,00	1	Om
306966,33	1083804,67	379,00	1,15	3,06	1	Pg
302571,94	1082721,75	0,00	0,21	0,94	2	L
312446,19	1082670,31	489,00	0,29	2,34	2	G
311349,07	1082675,89	472,00	0,28	1,59	2	G
310251,95	1082681,51	517,00	1,70	4,15	2	G
308057,69	1082692,84	384,00	0,89	1,44	2	G
306960,55	1082698,56	386,00	0,20	1,91	2	G
305863,41	1082704,31	470,00	1,16	2,66	2	G
304766,25	1082710,09	470,00	0,00	0,00	2	G
303669,09	1082715,90	471,00	0,19	1,41	2	G
301474,77	1082727,63	405,00	0,05	1,73	2	Om
300377,59	1082733,54	470,00	0,15	1,56	2	Om
299280,41	1082739,49	470,00	1,47	2,90	2	Om
298183,23	1082745,46	470,00	1,38	3,48	2	Om

X_UTM31N	Y_UTM31N	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	LIGNE	LITHOLOGIE SIMPLIFIÉE
314640,41	1082659,23	386,00	2,43	3,80	2	Pg
313543,30	1082664,75	546,00	2,33	3,95	2	Pg
309154,83	1082687,16	394,00	1,38	3,23	2	Pg
303663,22	1081609,77	484,00	0,56	2,21	3	G
304760,41	1081603,96	409,00	0,85	2,06	3	G
305857,60	1081598,18	441,00	0,17	0,75	3	G
306954,77	1081592,44	429,00	0,43	2,33	3	G
308051,94	1081586,73	421,00	0,37	1,59	3	G
309149,11	1081581,05	404,00	1,74	3,44	3	G
312440,57	1081564,21	400,00	0,20	2,55	3	G
313537,72	1081558,67	415,00	1,08	3,50	3	G
314634,87	1081553,15	400,00	1,77	3,62	3	G
302566,03	1081615,61	423,00	1,15	3,14	3	Om
310246,27	1081575,41	601,00	0,51	3,46	3	Pg
311343,43	1081569,79	548,00	0,29	2,97	3	Pg
303657,35	1080503,63	398,00	0,00	0,00	4	L
314629,32	1080447,07	391,00	0,00	0,00	4	G
313532,15	1080452,58	404,00	0,37	1,61	4	G
312434,97	1080458,12	402,00	0,34	1,85	4	G
311337,79	1080463,70	445,00	1,04	2,84	4	G
310240,60	1080469,30	478,00	1,00	3,50	4	G
309143,41	1080474,94	466,00	1,51	2,67	4	G
308046,21	1080480,62	465,00	0,54	2,80	4	G
305851,79	1080492,06	402,00	1,24	3,07	4	G
304754,57	1080497,83	406,00	0,16	2,34	4	G
302560,13	1080509,47	381,00	0,78	2,81	4	Om

X_UTM31N	Y_UTM31N	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	LIGNE	LITHOLOGIE SIMPLIFIÉE
306949,00	1080486,32	630,00	0,61	2,85	4	Pg
303651,49	1079397,51	397,00	0,13	1,49	5	G
304748,74	1079391,71	381,00	0,41	2,39	5	G
306943,23	1079380,21	458,00	3,61	4,28	5	G
308040,48	1079374,51	459,00	1,31	3,14	5	G
309137,71	1079368,85	571,00	1,07	2,98	5	G
310234,93	1079363,21	526,00	0,48	3,31	5	G
311332,16	1079357,61	527,00	1,54	3,58	5	G
312429,37	1079352,04	491,00	2,17	4,69	5	G
313526,58	1079346,50	409,00	0,20	1,41	5	G
314623,79	1079341,00	393,00	1,99	4,95	5	G
302554,23	1079403,33	389,00	0,39	1,70	5	Om
305846,00	1079385,94	471,00	0,45	2,42	5	Pg
314618,26	1078234,92	405,00	0,38	2,52	6	L
313521,02	1078240,42	426,00	0,39	2,16	6	G
312423,77	1078245,95	428,00	0,23	2,71	6	G
310229,27	1078257,11	592,00	1,82	4,08	6	G
309132,02	1078262,74	559,00	2,07	3,86	6	G
308034,75	1078268,40	553,00	0,60	2,75	6	G
306937,47	1078274,09	430,00	3,10	6,01	6	G
305840,20	1078279,82	473,00	1,53	3,27	6	G
303645,63	1078291,37	408,00	0,01	2,04	6	G
302548,34	1078297,19	387,00	0,03	2,17	6	Om
311326,53	1078251,52	489,00	1,20	4,10	6	Pg
304742,92	1078285,58	406,00	0,44	1,83	6	Pg
313515,46	1077134,34	429,00	0,94	2,90	7	L

X_UTM31N	Y_UTM31N	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	LIGNE	LITHOLOGIE SIMPLIFIÉE
314612,74	1077128,84	433,00	0,77	3,60	7	L
302542,46	1077191,05	433,00	1,95	3,47	7	G
303639,78	1077185,24	402,00	0,34	1,35	7	G
304737,10	1077179,45	421,00	0,26	3,19	7	G
305834,42	1077173,70	436,00	4,07	3,24	7	G
306931,72	1077167,98	447,00	0,60	3,04	7	G
308029,03	1077162,29	442,00	0,90	2,20	7	G
309126,33	1077156,63	586,00	0,76	3,10	7	G
312418,18	1077139,86	426,00	0,00	0,00	7	G
310223,62	1077151,01	569,00	2,94	5,77	7	Pg
311320,91	1077145,42	484,00	0,61	2,75	7	Pg
314607,22	1076022,77	422,00	0,61	1,60	8	L
313509,91	1076028,26	422,00	0,98	2,80	8	L
312412,60	1076033,78	410,00	1,28	2,57	8	L
306925,97	1076061,87	427,00	0,97	2,58	8	L
305828,64	1076067,59	422,00	0,62	1,36	8	L
304731,29	1076073,33	426,00	0,47	2,17	8	L
303633,93	1076079,11	436,00	3,47	6,70	8	L
302536,58	1076084,92	436,00	0,19	0,93	8	L
311315,29	1076039,34	426,00	2,34	4,36	8	G
309120,65	1076050,54	410,00	0,35	1,93	8	G
308023,31	1076056,19	423,00	1,17	3,20	8	G
310217,97	1076044,92	437,00	0,31	2,11	8	Pg
302530,71	1074978,79	437,00	0,27	1,12	9	L
303628,09	1074972,98	441,00	1,70	3,49	9	L
304725,48	1074967,21	418,00	2,16	5,73	9	L

X_UTM31N	Y_UTM31N	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	LIGNE	LITHOLOGIE SIMPLIFIÉE
305822,86	1074961,46	407,00	32,02	56,62	9	L
306920,23	1074955,75	433,00	1,39	3,12	9	L
311309,68	1074933,24	403,00	0,55	2,01	9	L
312407,02	1074927,69	416,00	0,77	2,49	9	L
313504,37	1074922,18	0,00	0,00	0,00	9	L
314601,71	1074916,70	394,00	0,71	3,29	9	L
308017,61	1074950,08	0,00	0,00	0,00	9	G
310212,35	1074944,36	398,00	0,86	2,32	9	G
309114,97	1074944,43	428,00	1,11	2,73	9	Pg
313498,83	1073816,10	0,00	0,00	0,00	10	L
312401,45	1073821,61	0,00	0,00	0,00	10	L
311304,08	1073827,15	389,00	0,96	3,97	10	L
309109,30	1073838,33	412,00	8,15	11,61	10	L
304719,68	1073861,08	393,00	0,62	2,27	10	L
303622,26	1073866,85	444,00	0,59	2,43	10	L
310206,69	1073832,72	390,00	0,00	0,00	10	G
308011,90	1073843,97	397,00	0,91	2,76	10	G
306914,50	1073849,64	409,00	0,59	1,58	10	G
305817,10	1073855,34	383,00	0,71	1,60	10	G
302524,84	1073872,65	446,00	0,00	0,00	10	G
314596,20	1073810,62	0,00	0,00	0,00	10	Om
303616,43	1072760,72	430,00	1,94	3,13	11	L
304713,89	1072754,96	414,00	0,92	2,33	11	L
305811,33	1072749,23	423,00	2,24	4,19	11	L
306908,77	1072743,53	421,00	0,81	2,84	11	L
309103,64	1072732,24	384,00	0,58	3,02	11	L

X_UTM31N	Y_UTM31N	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	LIGNE	LITHOLOGIE SIMPLIFIÉE
310201,06	1072726,63	381,00	0,19	2,64	11	L
311298,48	1072721,07	376,00	2,46	3,86	11	L
312395,88	1072715,53	0,00	0,00	0,00	11	L
302518,98	1072766,52	446,00	1,16	1,76	11	G
308006,21	1072737,87	0,00	0,00	0,00	11	G
313493,29	1072710,03	0,00	0,00	0,00	11	Om
314590,70	1072704,55	0,00	0,00	0,00	11	Om

ANNEXE B - BASE DE DONNÉES DES MESURES, DE SUSCEPTIBILITÉS
MAGNÉTIQUES, PRISES SUR AFFLEUREMENTS AU KT-20 (10-3SI) À 10KHZ
ET À 100KHZ (ZONE D'ÉTUDES SUD-OUEST).

X (UTM31N)	Y (UTM31N)	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	DENS.	LIGNE	Lithologie simplifiée
280324,48	812298,13	280,00	23,18	26,78		1	Ai
280655,79	812296,66	261,00	0,60	3,03		1	Ai
281318,39	812293,73	256,00	5,88	7,98		1	Ai
281649,68	812292,26	256,00	0,80	3,19		1	Ai
281980,97	812290,80	246,00	0,76	2,96		1	Ai
282312,27	812289,34	240,00	1,57	4,48		1	Ai
282974,86	812286,43	241,00	0,36	2,72		1	Ai
286950,35	812269,14	211,00	0,21	2,32		1	D
277342,78	812311,46	289,00	0,43	2,57		1	Mb
277674,08	812309,97	282,00	0,00	1,93		1	Mb
278005,39	812308,49	291,00	0,56	3,10		1	M
278336,68	812307,00	306,00	0,56	3,27		1	M
280987,08	812295,19	261,00	0,32	2,76		1	M
282643,56	812287,88	243,00	0,27	2,64		1	M
283306,15	812284,98	242,00	0,51	2,48		1	M
283637,44	812283,53	243,00	1,03	2,72		1	M
283968,74	812282,08	240,00	0,75	2,28		1	M
284300,03	812280,63	243,00	1,39	3,21		1	M
284631,32	812279,19	248,00	11,17	14,61		1	M
284962,62	812277,75	252,00	5,93	37,37		1	M
285293,90	812276,31	251,00	45,29	41,67		1	M
285625,20	812274,87	238,00	5,84	7,10		1	M

X (UTM31N)	Y (UTM31N)	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	DENS.	LIGNE	Lithologie simplifiée
285956,48	812273,44	230,00	0,75	2,97		1	M
286287,77	812272,00	227,00	0,66	2,95		1	M
286619,06	812270,57	220,00	0,79	3,13		1	M
287281,64	812267,72	207,00	0,61	2,65		1	M
278667,98	812305,52	295,00	2,31	5,23		1	Qm
278999,29	812304,03	308,00	0,15	2,92		1	Qm
279330,59	812302,55	322,00	0,79	3,26		1	Qm
279661,89	812301,08	314,00	0,01	2,28		1	S
279993,19	812299,60	341,00	38,17	41,56		1	S
283635,99	811951,70	241,00	1,02	2,99		2	Ai
283304,70	811953,15	237,00	0,79	2,73		2	Ai
282973,41	811954,60	248,00	0,67	3,03		2	Ai
282642,11	811956,05	248,00	0,17	2,70		2	Ai
282310,81	811957,51	258,00	0,56	2,67		2	Ai
281979,51	811958,97	255,00	0,22	2,47		2	Ai
281648,21	811960,43	247,00	0,04	1,75		2	Ai
281316,92	811961,89	259,00	0,74	3,20		2	Ai
280985,61	811963,36	262,00	1,39	4,76		2	Ai
280654,32	811964,82	265,00	0,01	2,05		2	Ai
280323,01	811966,29	282,00	6,20	8,66		2	Ai
286948,92	811937,32	222,00	2,16	4,00		2	D
277341,28	811979,62	282,00	1,00	3,67		2	Mb
287280,21	811935,89	212,00	1,72	4,48		2	M
286617,63	811938,75	226,00	2,75	4,74		2	M
286286,33	811940,18	225,00	0,94	2,98		2	M

X (UTM31N)	Y (UTM31N)	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	DENS.	LIGNE	Lithologie simplifiée
285955,05	811941,61	227,00	2,12	4,12		2	M
285623,76	811943,04	239,00	6,52	7,79		2	M
285292,46	811944,48	246,00	39,47	46,74		2	M
284961,17	811945,92	249,00	56,24	42,80		2	M
284629,87	811947,36	239,00	8,78	5,02		2	M
284298,58	811948,80	237,00	6,76	8,32		2	M
283967,29	811950,25	230,00	0,65	2,68		2	M
278335,20	811975,16	315,00	0,31	3,22		2	M
278003,90	811976,65	293,00	0,79	3,50		2	M
279329,11	811970,72	317,00	0,49	2,88		2	Qm
278997,81	811972,20	307,00	0,34	3,07		2	Qm
278666,50	811973,68	316,00	0,00	2,18		2	Qm
279991,71	811967,77	293,00	22,57	27,05		2	S
279660,41	811969,24	324,00	5,27	8,61		2	S
281315,45	811630,05	267,00	0,06	1,99		3	Ai
281646,75	811628,59	255,00	0,24	2,41		3	Ai
281978,05	811627,13	269,00	0,38	2,58		3	Ai
283634,54	811619,86	241,00	0,84	2,99		3	Ai
283965,84	811618,41	235,00	0,19	2,26		3	Ai
284297,14	811616,97	231,00	3,72	5,21		3	Ai
287278,79	811604,06	216,00	1,72	3,35		3	Ga
277339,79	811647,77	280,00	0,43	2,68		3	G
277671,09	811646,28	296,00	0,53	3,16		3	G
278002,41	811644,80	301,00	0,49	2,91		3	M
280321,54	811634,45	289,00	15,26	18,86		3	M

X (UTM31N)	Y (UTM31N)	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	DENS.	LIGNE	Lithologie simplifiée
280652,85	811632,98	273,00	1,24	3,66		3	M
280984,15	811631,51	270,00	0,41	2,77		3	M
284628,43	811615,52	236,00	4,35	5,84		3	M
284959,73	811614,08	240,00	16,73	15,78		3	M
285291,02	811612,64	241,00	2,48	4,42		3	M
285622,32	811611,21	233,00	4,74	7,44		3	M
285953,61	811609,77	215,00	1,51	3,50		3	M
286284,90	811608,34	217,00	0,60	2,49		3	M
286616,20	811606,91	219,00	0,49	2,64		3	M
286947,49	811605,49	218,00	1,85	4,15		3	M
278333,71	811643,31	312,00	0,33	3,22		3	Qm
278665,01	811641,83	338,00	1,62	4,31		3	Qm
278996,33	811640,35	344,00	1,23	3,93		3	Qm
279327,63	811638,87	325,00	0,01	1,96	2,38	3	Qm
282309,35	811625,67	272,00	1,21	3,62		3	Qm
282640,65	811624,21	276,00	0,95	2,90		3	Qm
282971,95	811622,76	279,00	0,81	3,09		3	Qm
283303,25	811621,31	251,00	0,02	1,29	2,27	3	Qm
279658,94	811637,39	367,00	19,48	24,15		3	S
279990,24	811635,92	319,00	78,91	104,28		3	S
284626,99	811283,69	226,00	3,27	5,30		4	Ai
284295,69	811285,14	236,00	0,52	2,64		4	Ai
287277,36	811272,24	211,00	0,86	3,12		4	Ga
286946,06	811273,66	211,00	0,89	3,10		4	Ga
286614,77	811275,09	211,00	1,55	4,10		4	Ga

X (UTM31N)	Y (UTM31N)	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	DENS.	LIGNE	Lithologie simplifiée
277338,30	811315,93	249,00	2,23	4,41		4	G
286283,47	811276,52	210,00	0,13	2,72		4	M
285952,18	811277,95	214,00	0,17	2,54		4	M
285620,89	811279,38	226,00	0,30	2,68		4	M
285289,58	811280,82	232,00	1,93	4,40		4	M
284958,29	811282,25	232,00	1,51	3,46		4	M
283964,40	811286,58	221,00	0,78	2,08		4	M
281313,99	811298,21	263,00	0,18	2,69		4	M
280982,68	811299,68	262,00	0,79	3,30		4	M
280651,38	811301,15	278,00	0,81	2,95		4	M
280320,07	811302,61	285,00	1,54	3,61		4	M
278000,92	811312,96	260,00	0,46	2,88		4	M
277669,60	811314,44	260,00	0,70	2,74		4	M
283633,09	811288,03	240,00	1,03	2,49		4	Qm
283301,80	811289,48	377,00	0,02	2,20		4	Qm
282970,50	811290,93	383,00	0,03	2,39		4	Qm
282639,19	811292,38	433,00	0,01	1,88		4	Qm
282307,89	811293,84	305,00	0,02	2,22		4	Qm
281976,59	811295,29	293,00	0,01	1,79		4	Qm
281645,29	811296,75	273,00	1,13	3,92		4	Qm
278994,84	811308,51	353,00	1,00	4,02		4	Qm
278663,53	811309,99	330,00	56,58	57,09		4	Qm
278332,22	811311,47	318,00	0,19	2,38		4	Qm
279988,76	811304,08	316,00	26,07	31,44		4	S
279657,46	811305,56	393,00	31,96	35,29		4	S

X (UTM31N)	Y (UTM31N)	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	DENS.	LIGNE	Lithologie simplifiée
279326,15	811307,03	340,00	5,11	7,65		4	S
286282,04	810944,68	208,00	0,24	2,79		5	Ga
286613,34	810943,26	208,00	0,36	2,54		5	Ga
286944,63	810941,83	205,00	0,20	2,51		5	Ga
287275,93	810940,41	204,00	0,18	1,83		5	Ga
277336,80	810984,08	301,00	0,32	3,03		5	G
277668,11	810982,59	306,00	0,07	2,64		5	M
277999,43	810981,11	317,00	5,70	10,21		5	M
278993,36	810976,66	342,00	0,01	1,92		5	M
279987,29	810972,24	297,00	14,07	18,33		5	M
280318,59	810970,77	282,00	3,27	4,47		5	M
280649,91	810969,30	266,00	4,46	6,97		5	M
280981,21	810967,84	269,00	0,49	3,10		5	M
283631,64	810956,19	271,00	1,20	3,89		5	M
283962,95	810954,74	255,00	0,67	2,84		5	M
284294,25	810953,30	245,00	1,03	3,54		5	M
284625,54	810951,86	231,00	0,59	2,64		5	M
284956,85	810950,42	215,00	1,04	3,37		5	M
285288,14	810948,98	219,00	0,13	2,24		5	M
285619,45	810947,55	217,00	0,33	2,93		5	M
285950,74	810946,11	214,00	1,46	3,07		5	M
278330,74	810979,62	331,00	0,91	3,35		5	Qm
278662,05	810978,14	353,00	35,21	30,26		5	Qm
281312,52	810966,37	271,00	0,85	3,22		5	Qm
281643,82	810964,91	346,00	0,00	2,47		5	Qm

X (UTM31N)	Y (UTM31N)	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	DENS.	LIGNE	Lithologie simplifiée
281975,13	810963,45	0,00	0,00	0,00		5	Qm
282306,44	810961,99	364,00	0,33	3,46		5	Qm
282637,74	810960,54	419,00	0,00	1,82		5	Qm
282969,04	810959,09	400,00	0,01	2,34		5	Qm
283300,34	810957,64	363,00	0,00	2,17		5	Qm
279324,67	810975,19	336,00	33,48	33,28	2,43	5	S
279655,98	810973,71	370,00	49,02	53,15		5	S
287274,51	810608,58	204,00	0,28	1,88		6	Ga
286943,21	810610,01	206,00	0,30	0,00		6	Ga
286611,91	810611,43	210,00	0,21	2,06		6	Ga
286280,61	810612,86	212,00	0,64	2,24		6	Ga
285949,31	810614,29	212,00	0,20	2,12		6	Ga
285618,01	810615,72	213,00	0,61	2,44		6	Ga
277335,31	810652,24	307,00	0,00	1,95		6	G
285286,71	810617,15	214,00	0,84	3,00		6	M
284955,41	810618,59	223,00	0,19	2,12		6	M
284624,10	810620,03	234,00	0,82	2,71		6	M
284292,80	810621,47	251,00	0,66	3,89		6	M
283961,50	810622,91	264,00	0,80	3,04		6	M
283630,19	810624,36	281,00	0,75	3,36		6	M
280648,44	810637,47	280,00	0,94	3,02		6	M
280317,12	810638,93	270,00	2,37	3,97		6	M
279985,82	810640,40	283,00	2,84	5,47		6	M
278660,56	810646,30	329,00	1,52	2,99		6	M
277666,63	810650,75	316,00	4,43	18,98		6	M

X (UTM31N)	Y (UTM31N)	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	DENS.	LIGNE	Lithologie simplifiée
283298,89	810625,81	343,00	0,00	1,78		6	Qm
282967,59	810627,26	397,00	2,17	4,50		6	Qm
282636,28	810628,71	309,00	0,00	1,99		6	Qm
282304,98	810630,16	430,00	0,01	2,48		6	Qm
281973,67	810631,62	500,00	0,00	2,37		6	Qm
281642,36	810633,08	344,00	0,00	2,75		6	Qm
281311,06	810634,54	317,00	1,12	3,56		6	Qm
280979,74	810636,00	291,00	1,36	3,67		6	Qm
278329,26	810647,78	334,00	0,56	2,94		6	Qm
277997,95	810649,27	338,00	2,54	4,65		6	Qm
279654,51	810641,87	298,00	101,73	112,26		6	S
279323,19	810643,35	319,00	100,52	121,43		6	S
278991,88	810644,83	316,00	0,22	2,42		6	S
284953,97	810286,76	231,00	0,85	3,22		7	Ga
285285,27	810285,33	224,00	0,67	2,98		7	Ga
285616,80	810284,44	220,00	0,78	2,83		7	Ga
285947,88	810282,46	221,00	0,60	2,16		7	Ga
286279,18	810281,03	222,00	0,61	2,33		7	Ga
286610,48	810279,61	215,00	1,72	2,70		7	Ga
286941,78	810278,18	208,00	0,33	2,29		7	Ga
287273,09	810276,76	203,00	0,19	2,30		7	Gb
277333,82	810320,40	311,00	0,48	2,92		7	M
277665,14	810318,91	326,00	0,42	3,10		7	M
278327,77	810315,95	321,00	1,08	3,45		7	M
278659,08	810314,47	318,00	0,01	1,74		7	M

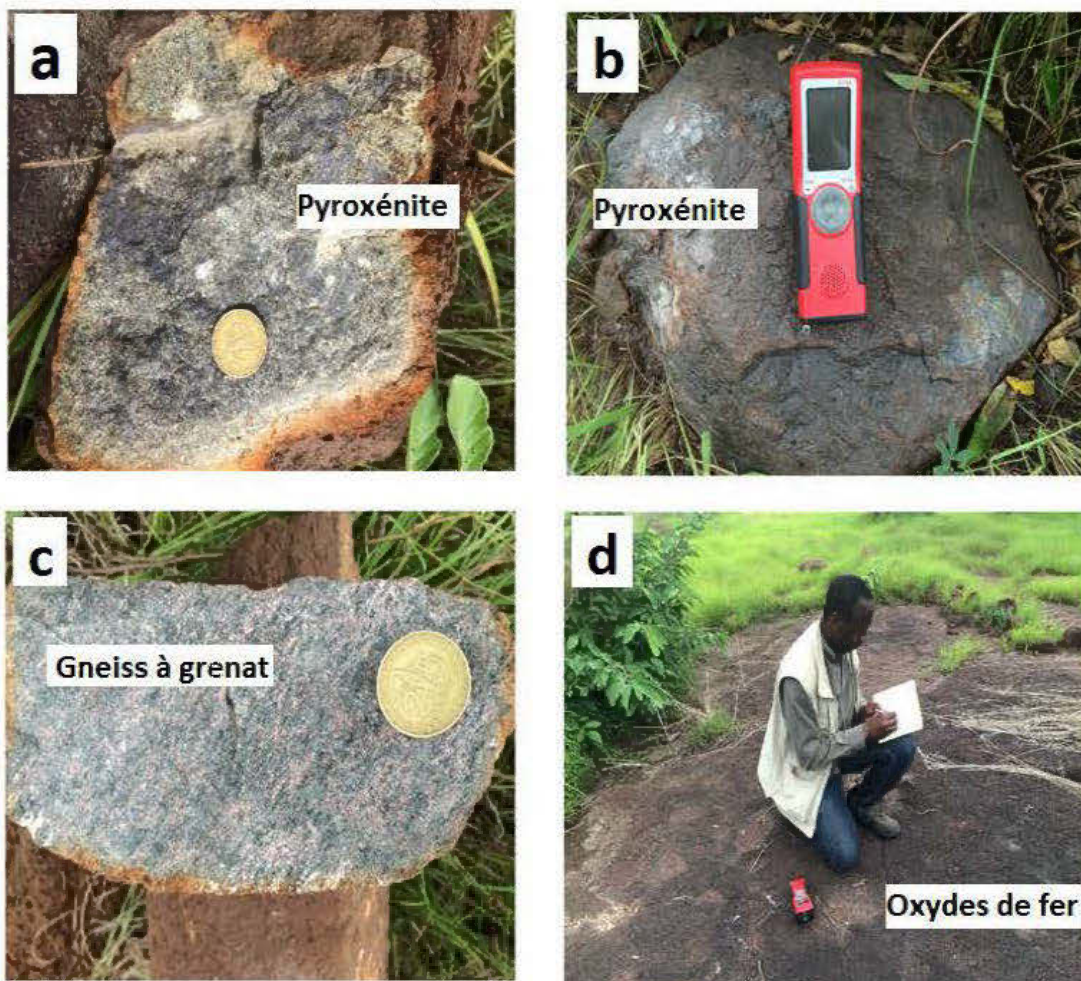
X (UTM31N)	Y (UTM31N)	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	DENS.	LIGNE	Lithologie simplifiée
279653,03	810310,04	298,00	31,00	41,05		7	M
279984,34	810308,57	281,00	8,18	9,72		7	M
280315,65	810307,10	269,00	0,37	2,56		7	M
280646,97	810305,63	285,00	0,18	2,49		7	M
283628,74	810292,53	280,00	0,69	2,68		7	M
283960,06	810291,08	264,00	0,57	3,00		7	M
284291,36	810289,64	223,00	0,42	2,92		7	M
284622,66	810288,20	233,00	0,11	2,87		7	M
277996,46	810317,43	347,00	3,59	6,13		7	Qm
280978,28	810304,17	313,00	0,02	2,39		7	Qm
281309,59	810302,70	365,00	0,03	2,55		7	Qm
281640,90	810301,24	481,00	0,02	2,41		7	Qm
281972,21	810299,79	536,00	0,17	2,74		7	Qm
282303,52	810298,33	448,00	0,05	2,06		7	Qm
282634,82	810296,88	426,00	0,01	1,80		7	Qm
282966,14	810295,42	431,00	0,00	1,70		7	Qm
283297,44	810293,98	347,00	0,00	2,22		7	Qm
278990,40	810312,99	308,00	0,00	2,03	1,96	7	S
279321,71	810311,51	348,00	43,61	47,99	2,64	7	S
286609,06	809947,77	218,00	1,61	3,60		8	Ga
286277,75	809949,20	225,00	1,63	3,67		8	Ga
285946,45	809950,63	231,00	2,28	4,30		8	Ga
285615,14	809952,06	226,00	0,72	0,00		8	Ga
285283,83	809953,49	229,00	0,40	2,46		8	Ga
284952,53	809954,93	237,00	0,55	2,39		8	Ga

X (UTM31N)	Y (UTM31N)	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	DENS.	LIGNE	Lithologie simplifiée
284621,22	809956,36	243,00	0,34	2,44		8	Ga
284289,91	809957,80	224,00	0,27	2,55		8	Ga
287271,66	809944,93	212,00	0,50	2,46		8	Gb
286940,35	809946,35	213,00	0,48	2,06		8	Gb
283958,61	809959,25	258,00	0,52	2,64		8	M
283627,30	809960,69	272,00	0,54	2,96		8	M
283295,99	809962,14	299,00	1,39	3,73		8	M
280314,18	809975,25	285,00	1,00	2,88		8	M
279982,87	809976,72	277,00	0,43	3,25		8	M
279651,56	809978,19	293,00	2,80	5,51		8	M
278657,60	809982,62	297,00	0,40	3,36		8	M
278326,29	809984,10	310,00	0,20	2,55		8	M
277994,97	809985,58	317,00	0,53	2,95		8	M
277663,65	809987,06	312,00	2,10	5,05		8	M
277332,33	809988,55	303,00	0,37	2,61		8	M
282964,69	809963,58	388,00	0,00	1,91		8	Qm
282633,37	809965,04	362,00	0,02	1,71		8	Qm
282302,06	809966,49	361,00	0,04	1,78		8	Qm
281970,75	809967,94	478,00	0,06	2,59		8	Qm
281639,44	809969,40	475,00	0,00	2,30		8	Qm
281308,13	809970,86	372,00	0,25	2,70		8	Qm
280976,81	809972,32	351,00	1,66	3,90		8	Qm
280645,50	809973,79	305,00	1,99	3,81		8	Qm
279320,24	809979,67	312,00	26,09	34,36	2,56	8	S
278988,92	809981,14	302,00	0,62	3,52		8	S

X (UTM31N)	Y (UTM31N)	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	DENS.	LIGNE	Lithologie simplifiée
283957,17	809627,42	251,00	0,58	2,67		9	Ga
284289,03	809626,52	233,00	0,59	2,44		9	Ga
284619,78	809624,54	228,00	0,20	2,07		9	Ga
284951,09	809623,10	221,00	0,08	1,88		9	Ga
285282,40	809621,66	218,00	0,20	2,20		9	Ga
285613,71	809620,23	216,00	0,30	1,93		9	Ga
285945,01	809618,80	218,00	0,70	0,00		9	Ga
286276,32	809617,37	217,00	1,91	4,05		9	Ga
286607,63	809615,95	216,00	0,49	2,16		9	Gb
286938,93	809614,52	215,00	0,24	2,09		9	Gb
287270,24	809613,10	216,00	0,16	2,04		9	Gb
277330,84	809656,71	297,00	0,39	2,41		9	M
277662,16	809655,22	303,00	25,72	16,92		9	M
277993,49	809653,74	298,00	0,67	3,85		9	M
278324,81	809652,26	311,00	0,34	2,70		9	M
279318,76	809647,83	288,00	0,88	3,66		9	M
279650,09	809646,36	283,00	2,69	5,12		9	M
279981,40	809644,89	282,00	0,17	2,53		9	M
280312,71	809643,42	296,00	0,82	2,83		9	M
282963,23	809631,75	304,00	0,00	0,00		9	M
283294,54	809630,31	286,00	0,73	3,02		9	M
283625,85	809628,86	272,00	0,34	2,52		9	M
280644,03	809641,95	350,00	0,05	2,15		9	Qm
280975,35	809640,49	335,00	0,89	3,47		9	Qm
281306,67	809639,03	441,00	0,00	2,02		9	Qm

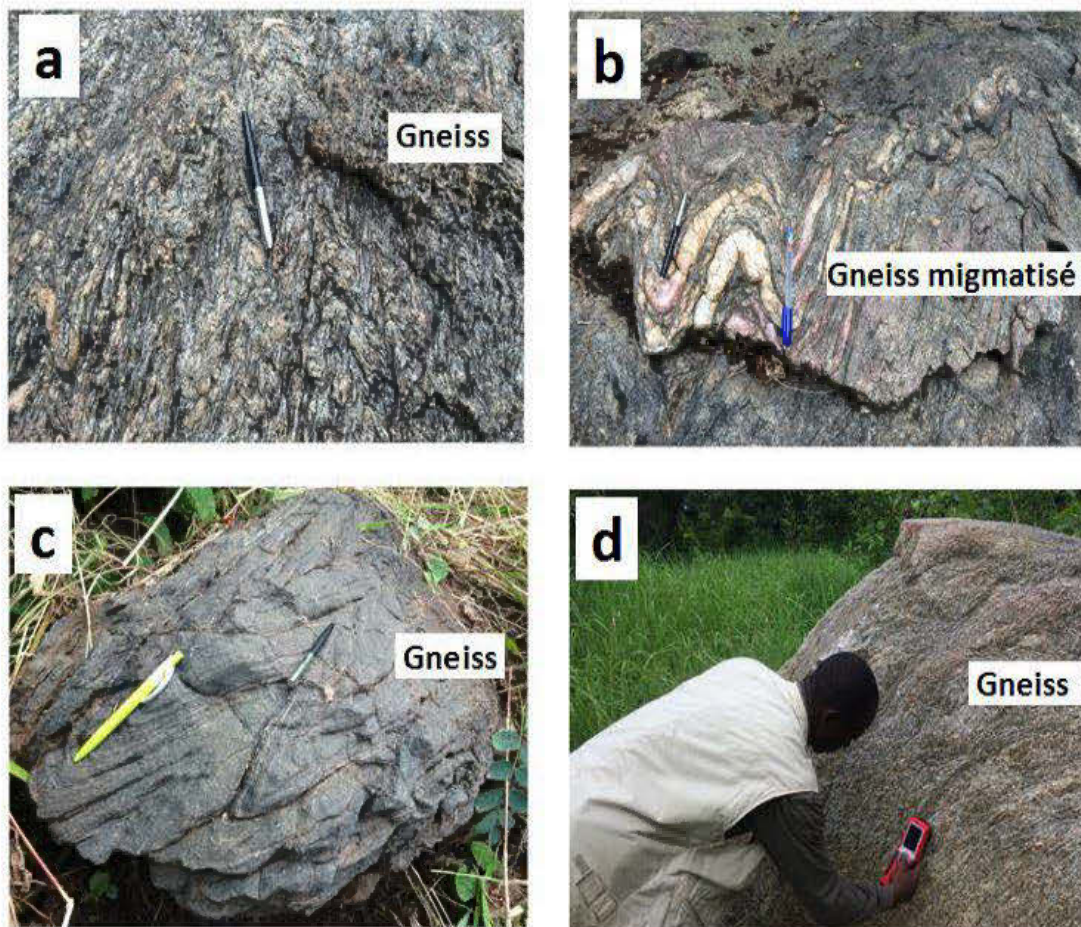
X (UTM31N)	Y (UTM31N)	ELE.	SUSC. (10KHz)	SUSC. (100KHz)	DENS.	LIGNE	Lithologie simplifiée
281637,98	809637,57	528,00	0,00	2,56		9	Qm
281969,29	809636,11	471,00	0,37	3,19		9	Qm
282300,61	809634,66	335,00	0,03	2,19		9	Qm
282631,92	809633,20	330,00	0,47	2,76		9	Qm
278656,12	809650,78	297,00	0,63	2,89		9	S
278987,45	809649,30	290,00	0,60	3,50		9	S

ANNEXE C – IMAGES DES ÉCHANTILLONS DE ROCHES DE LA ZONE
D'ÉTUDES NORD-EST (RÉGION DE LA KARA, RÉPUBLIQUE TOGOLAISE).



(a) et (b) : Pyroxénite à surface plus ou moins altérée et à augite dominant; (c) : Gneiss à grain fin à grenat; (d) : Concrétions ferrugineuses sur un sol latéritique.

ANNEXE D – IMAGES DES ÉCHANTILLONS DE ROCHES DE LA ZONE DU
SUD-OUEST (RÉGION DES PLATEAUX, RÉPUBLIQUE TOGOLAISE).



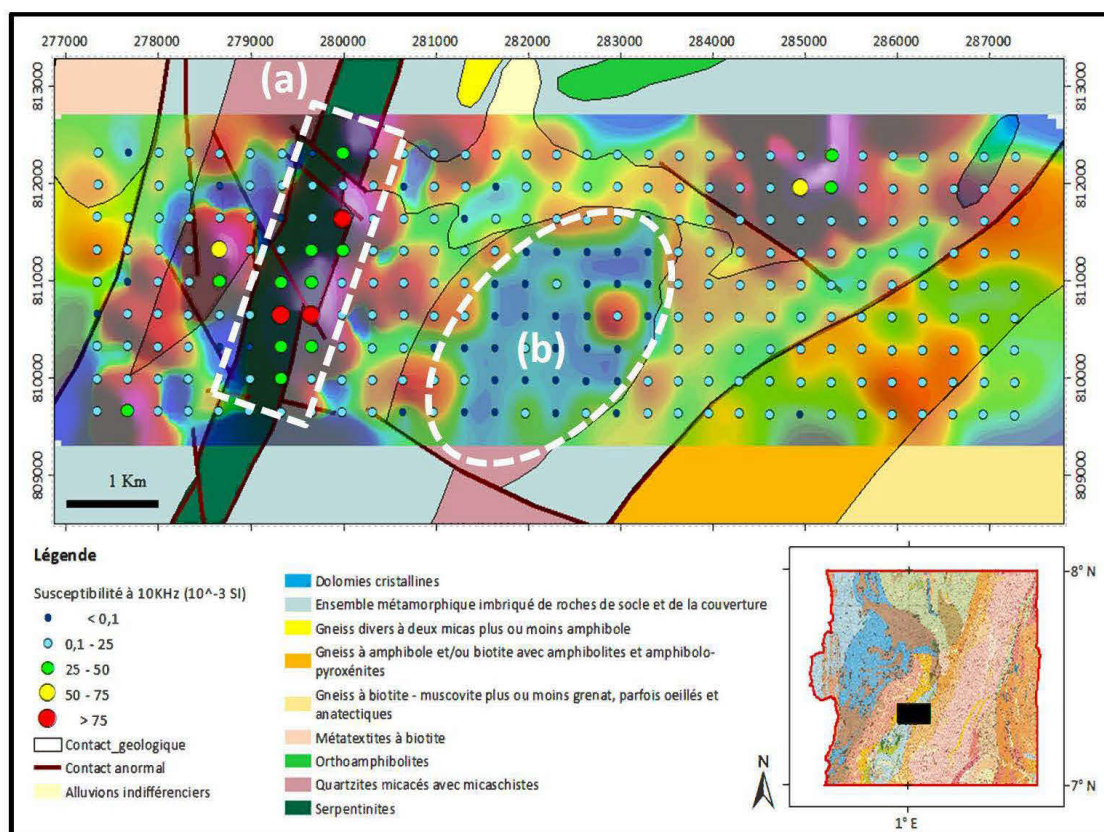
(a) Gneiss hétérogène et migmatisé; (b) : Orthogneiss migmatisé, folié, rubané et plissé à grain moyen, à texture granoblastique avec des enclaves quartzofeldspathiques; (c) : Gneiss plissé à grain fin; (d) : Gneiss granitique plagioclassique à grenat.

ANNEXE E - IMAGES DES ÉCHANTILLONS DE ROCHES DE LA ZONE SUD-OUEST (RÉGION DES PLATEAUX, RÉPUBLIQUE TOGOLAISE).



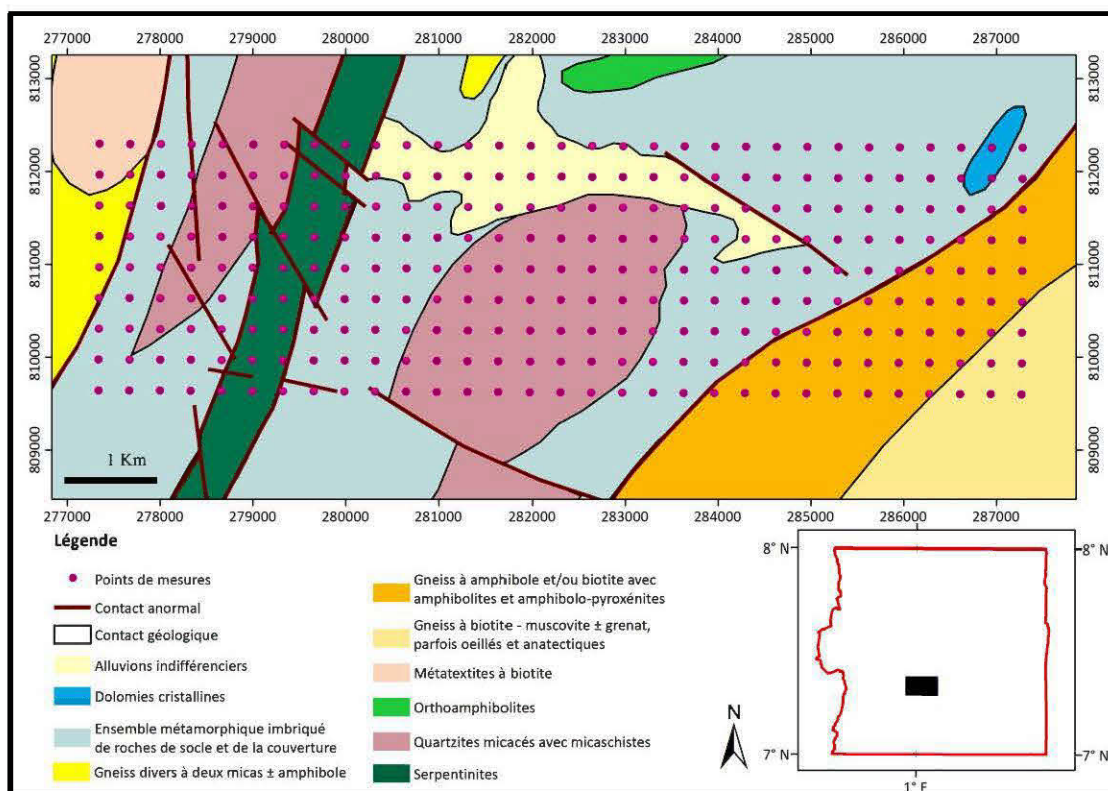
(a) : Bancs de quartzite déformé affleurant dans le lit de la rivière; (b) : Serpentine à grains grossiers de teinte verdâtre en début d'altération; (c) : Roche plutonique mafique à grains grossiers (pyroxénite ?); (d) : Quartzite en dalle mylonitisé affleurant sur le flanc supérieure de montagne.

ANNEXE F - CARTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE DE LA ZONE D'ÉTUDES DU SUD-OUEST (RÉGION DES PLATEAUX, RÉPUBLIQUE TOGOLAISE) SUPERPOSÉE D'UNE IMAGE DE SUSCEPTIBILITÉS MAGNÉTIQUES MESURÉES MONTRANT LES ZONES DE FORTES ET FAIBLES SUSCEPTIBILITÉS MAGNÉTIQUES.

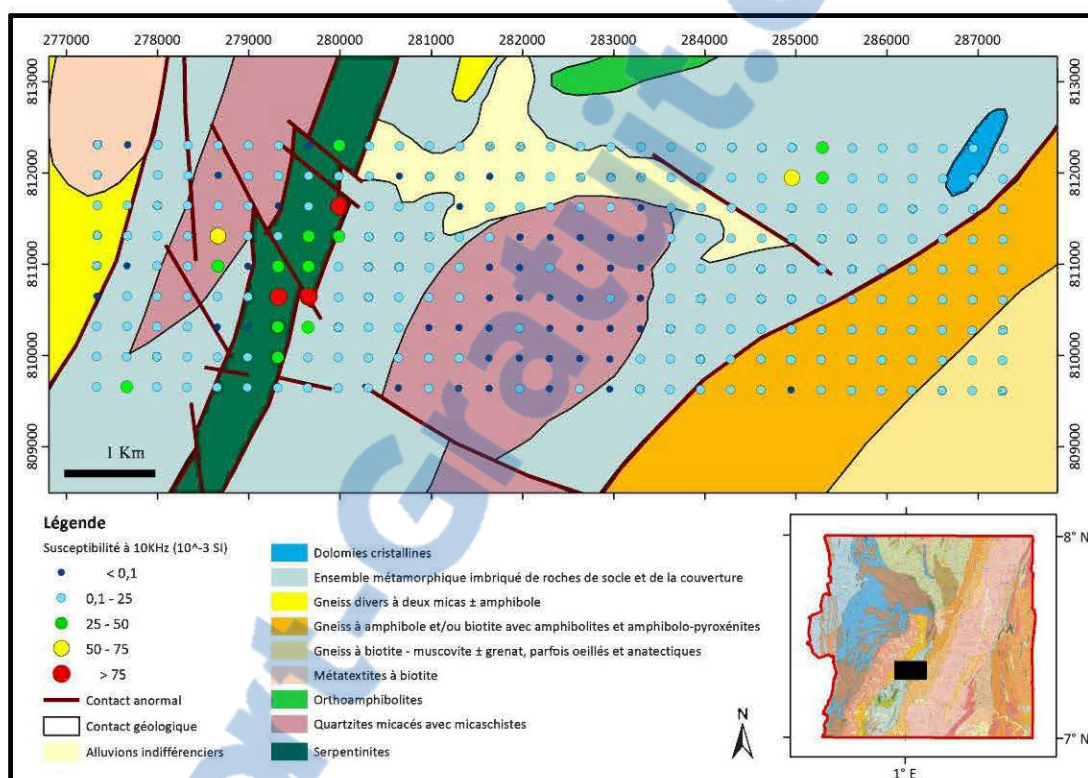


(a) Zone de collines essentiellement formées de serpentinites enregistrant les valeurs élevées de susceptibilités magnétiques; (b) Zone formée de quartzite avec de faibles valeurs de susceptibilités magnétiques.

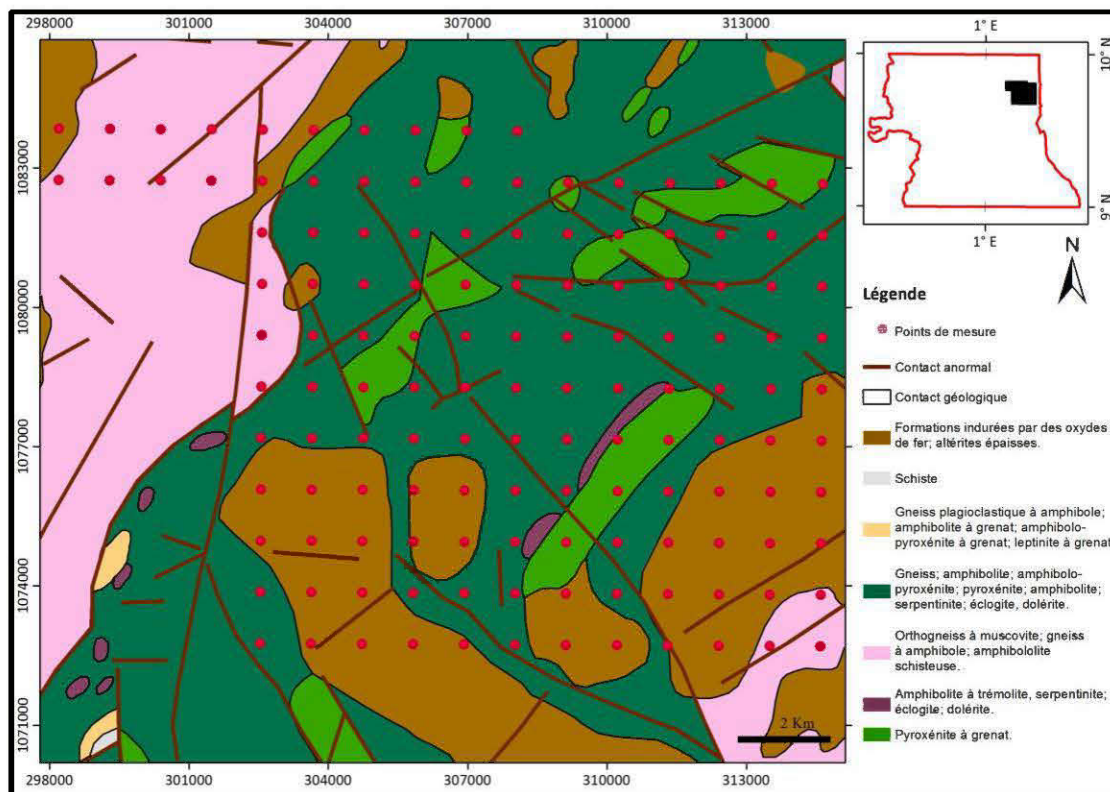
**ANNEXE G - CARTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE DE LA ZONE D'ÉTUDES
SUD-OUEST (RÉGION DES PLATEAUX, RÉPUBLIQUE TOGOLAISE)
MONTRANT LES POINTS DE MESURES.**



ANNEXE H - CARTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE DE LA ZONE D'ÉTUDES
SUD-OUEST DU TOGO MONTRANT LES SUSCEPTIBILITÉS MAGNÉTIQUES
MESURÉES AU KT-20 À LA FRÉQUENCE DE 10KHZ (10^{-3} SI).



ANNEXE I - CARTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE DE LA ZONE D'ÉTUDES
NORD-EST DU TOGO MONTRANT LES POINTS DE MESURES.



ANNEXE J - CARTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE DE LA ZONE D'ÉTUDES
NORD-EST DU TOGO MONTRANT LES SUSCEPTIBILITÉS MAGNÉTIQUES
MESURÉES AU KT-20 À LA FRÉQUENCE DE 10KHZ (10^{-3} SI).

