
Forecasting tools for mineral exploration in high grade metamorphic terrains: The Grenville parautochthonous belt, a high-potential zone

PROJECT 2003-2B

STÉPHANE FAURE, PH.D. GÉO.

JUNE 2007



WARNING

This document describes results from CONSOREM research and is made public for the benefit of the geological community, after the regulation confidentiality period has expired.

Although the document has been reviewed internally, it could still contain errors and omissions. These errors and omissions are CONSOREM's responsibility.

The contents of the document remain the intellectual property of its author and of CONSOREM, but the document can be reproduced for non-commercial purposes, wholly or in part, citing it as:

Faure, S. 2007 Forecasting tools for mineral exploration in high grade metamorphic terrains: The Grenville parautochthonous belt, a high-potential zone. Report, CONSOREM's project 2003-2B, 37 p.

Reproducing this document for commercial purposes, wholly or in part, is strictly forbidden, except with the Consortium's written permission.

CONSOREM

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

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@uqac.ca
Site Web: www.consorem.ca

NOTE: all the figures are combined at the end of the document, with captions in English. These captions have been enhanced so that a basic understanding of the full study could be gained without reading the main text in French.

ABSTRACT

In Quebec, geological field mapping and mineral exploration in the Grenville Province have historically been far less comprehensive than in the Abitibi subprovince. The structural history of the Grenville is complex, and very few mineral deposits are known there compared to the Abitibi. Nevertheless, because the parautochthonous belt of the Grenville just east of the Abitibi is interpreted to consist of equivalent Archean rocks metamorphosed to higher grades, one could hypothesise that the same types of mineral deposits famous in the Abitibi could also have survived there. One could also suggest the possible existence of other types of precious metal deposits typical of high-grade terrains, such as hypozonal gold deposits (e.g., Yilgarn craton in Australia). In order to improve the odds of finding mineralization in the Grenville, forecasting tools are needed to delineate the most favourable areas for exploration.

With this in a mind, a geophysical interpretation was made in the parautochthonous and allochthonous belts of the Grenville Province east of the Abitibi. The study comprises four main themes: (1) identification of rocks favourable for mineral exploration in the Grenville; (2) discussion of the complex relationships between metamorphism and magnetic signature; (3) discussion of geophysical lineaments; (4) an outline of regional exploration guides for volcanogenetic mineralization and hypozonal gold deposits.

Most gold and base metal mineralized occurrences in the parautochthonous belt are associated with mafic gneisses and amphibolites. Geophysical interpretation allowed this study to extend the distribution of these units, opening up new areas to base metal exploration, mainly between Senneterre and Chibougamau and ESE of Chibougamau. According to regional geophysical signatures (using both the magnetic and gravity data), the greatest density of mafic units lies east of Senneterre, in the Lac Témiscamingue terrain and the Serpent Complex. The gravimetric signature of this mafic rocks-bearing domain demonstrates that favourable Archean lithologies continue underneath the allochthonous belt over 100 km eastward. Consequently, the parautochthonous-allochthonous limit (i.e., the Granulite Front) represents a prime exploration target, most notably for Renco-type gold mineralization (see the last two figures for details).

Geophysical interpretations help to constrain the metamorphic and tectonic history of the region. The amphibolite-grade parautochthonous belt and the granulite-grade allochthonous belt can be readily distinguished on magnetic maps. However, local granulitic rocks in the parautochthonous belt do not stand out. Partial retrograde metamorphism (to amphibolite-grade) of these granulitic rocks could explain the lack of a contrasting geophysical signature. A gently dipping thrust fault (with a SE dip) is interpreted to separate the parautochthonous belt from the allochthonous belt. The decrease in metamorphic grade in the hanging wall is interpreted as a rehydration of the granulites. This is the setting that is favourable for Renco-type gold as mentioned above.

Geophysical lineaments can be divided into several families. E-W lineaments, present everywhere along the Grenville Front, are interpreted as relict Archean structures. One of these structures is over 100 km long and is interpreted here as the continuation of the Cadillac–Larder Lake fault into the parautochthonous belt. This constitutes a major metalotect for gold exploration. Other E-W to ENE lineaments represent good exploration targets for hypozonal gold. In both the parautochthonous belt and the allochthonous belt, NE-trending lineaments are mostly interpreted as brittle-ductile structures. These are parallel to the Grenville Front and are interpreted as grenvillian in age. Mineralized occurrences or sulphides are locally associated with such structures. A regional tectonic model can be proposed based on the relative chronology of the lineament families. Other lineaments cross-cut the Grenville and Granulite fronts; these are interpreted as post-grenvillian brittle faults. NW-trending lineaments are correlated with the Saguenay rift, ESE dikes in the parautochthonous belt east of Chibougamau, carbonatite occurrences in the Grenville Province, and kimberlite occurrences in the Abitibi subprovince.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	ii
Table des matières	iv
Liste des figures	iv
1. Introduction.....	1
2. Méthodologie.....	1
2.1 Traitements géophysiques.....	2
2.2 Compilation de données géologiques	3
2.3 Interprétation géologique et linéaments	3
3. Analyse et interprétation géophysique	3
3.1 Front de Grenville et limite Parautochtone.....	4
3.2 Extension des gneiss mafiques et amphibolites dans le Parautochtone	4
3.2.1 Extension du Terrain du Lac Témiscamingue sous l'Allochtone.....	5
3.2.2 Extension des gneiss mafiques entre Senneterre et Chibougamau	5
3.3 Signature géophysique d'intrusions.....	6
3.4 Métamorphisme et magnétisme	7
3.5 Linéaments géophysiques	8
3.5.1 Linéaments d'entraînement	8
3.5.2 Interprétation tectonique basée sur les linéaments et la géophysique.....	10
3.5.3 Linéaments francs	10
4. Guides et modèles d'exploration pour le Parautochtone	11
4.1 Les minéralisations dans le Parautochtone	11
4.2 Potentiel pour les minéralisations en métaux de base	12
4.3 Potentiel pour les minéralisations en or.....	12
5. Conclusions.....	13
Remerciements	14
Références	15
Cahier des figures	18

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation de la région d'étude montrant les limites des principaux domaines lithotectoniques de la Province de Grenville	18
Figure 2. La trace du front de Grenville est nettement perceptible A) sur projection vers le haut à 1 km du champ magnétique total et B) sur le gradient vertical de la gravité	19
Figure 3. Les deux limites proposées pour la frontière entre le Parautochtone et l'Allochtone dans le Grenville selon le Ministère des Ressources naturelles ou la Commission géologique du Canada.....	20
Figure 4. Connaissance actuelle des amphibolites dans le Parautochtone selon compilation de Goutier et Melançon (en préparation) sur le champ magnétique total	20
Figure 5. Le Terrain du Lac Témiscamingue dans le Parautochtone à l'est de Val-d'Or.	21
Figure 6. Extension proposée pour l'Archéen sous l'Allochtone grenvillien et basée sur le gradient vertical de la gravité	21
Figure 7. Localisation des gneiss mafiques et amphibolites cartographiés et interprétation géophysique de l'extension possible de ces unités	22
Figure 8. Carte synthèse montrant les gneiss mafiques et amphibolites sur les cartes géologiques du ministère provincial et leur extension proposée par l'interprétation géophysique	23

Figure 9. Signatures du gradient vertical de la gravité au sud de Chibougamau montrant l'enracinement des plutons Du Sud, La Dauversière et de Boisvert	23
Figure 10. L'intégration verticale du champ magnétique total montrant les signatures de certaines intrusions, tant dans la Sous-province d'Abitibi que dans le Grenville	24
Figure 11. Tableau montrant l'effet du métamorphisme sur la recristallisation ou le remplacement de certains minéraux et les réponses magnétiques	24
Figure 12. Section métamorphique NO-SE dans le Grenville le long de la route 117 entre le Front de Grenville (GF) et les terrains à granulites	25
Figure 13. Champ total montrant la signature magnétique des différents domaines métamorphiques.....	25
Figure 14. Cartographie des isogrades métamorphiques dans le Parautochtone à l'est de Val-d'Or	26
Figure 15. Front des granulites marqué par un contraste géophysique prononcé entre le Parautochtone et l'Allochtonne en utilisant le signal analytique de l'intégration verticale du champ magnétique.....	27
Figure 16. Front des granulites exprimé par une zone démagnétisée de plusieurs kilomètres en utilisant un filtre passe-bas à 1 km.....	27
Figure 17. Localisation des failles cartographiées ou interprétées par géophysique sur les cartes à l'échelle 1 :50000 du gouvernement provincial.....	27
Figure 18. Carte géologique à l'est de Senneterre montrant le contour des différentes unités, les failles cartographiées/interprétées et les principaux domaines lithotectoniques	28
Figure 19. Interprétation des linéaments géophysiques d'entraînement à l'est de Senneterre	28
Figure 20. Interprétation des linéaments géophysiques d'entraînement à l'est de Senneterre	29
Figure 21. Cohérence entre les linéaments géophysiques interprétés et la géologie à l'est de Senneterre	29
Figure 22. Carte géologique régionale montrant les roches volcaniques, les couloirs de déformation de l'Abitibi et les métasédiments de la Sous-province du Pontiac	30
Figure 23. Les failles cartographiées dans le feuillet 32B14 par Bandyayera et al. (2003, 2004) ont une expression magnétique. Les linéaments d'entraînement sont en partie interprétés à l'extérieur de ce feuillet avec le champ magnétique total	30
Figure 24. Linéaments d'entraînement interprétés à partir de la 1 ^{ière} dérivée horizontale du champ magnétique dans la direction N-S.....	31
Figure 25. Compilation des linéaments géophysiques d'entraînement archéens dans le Parautochtone avec histogramme de distribution des longueurs et rosette des directions	31
Figure 26. Compilation des linéaments géophysiques d'entraînement protérozoïques dans le Parautochtone et l'Allochtonne avec histogramme de distribution des longueurs et rosette des directions	32
Figure 27. Interprétation tectonique et séquence de mise en place des terrains archéens et grenvilliens sur la Province du Lac Supérieur d'après la géophysique et la chronologie relative entre les linéaments E-O et NE.....	33
Figure 28. Linéaments francs interprétés par géophysique au SE du Front de Grenville	34
Figure 29. Les linéaments francs interprétés par géophysique sont mis en relation avec les rifts avortés du Protérozoïque tardif – Cambrien inférieur sur un modèle numérique de terrain	34
Figure 30. A) Localisation des indices, gîtes et mines d'or dans la Sous-province d'Abitibi. B) Localisation des indices, gîtes et mines de métaux usuels dans la Sous-province d'Abitibi.....	35
Figure 31. Carte de localisation des indices à Cu-Zn ou rouillés dans le Parautochtone à l'est de Senneterre avec les gneiss mafiques/amphibolites et les linéaments d'entraînement	35
Figure 32. Carte de localisation des indices aurifères ou rouillés dans le Parautochtone à l'est de Senneterre avec les gneiss mafiques/amphibolites et les linéaments d'entraînement	36
Figure 33. Modèle de minéralisation à la Mine Renco (Zimbabwe) impliquant une nappe de granulites chaude chevauchant un bloc archéen froid contenant des ceintures de roches vertes.....	37

1 INTRODUCTION

Le Parautochtone de la Province de Grenville à l'est de la Sous-province de l'Abitibi ([figure 1](#)) est actuellement une des régions les moins bien connues du Québec sur le plan géologique. Avant 1990, seuls des travaux de reconnaissance à une échelle régionale ont permis de distinguer des différences pétrographiques, métamorphiques et structurales entre les roches de la Sous-province de l'Abitibi à l'ouest du Front de Grenville (FG) et les roches archéennes du Parautochtone à l'est (Faessler, 1935; Tiphane et Dawson, 1950; Gilbert, J.E. 1959; Charbonneau, 1973; Laurin et Sharma, 1975; Ciesielski et Ouellette, 1985). Depuis 1991, particulièrement entre Senneterre et Chibougamau, les travaux de cartographie faits par les gouvernements provincial et fédéral ont permis d'établir certaines corrélations stratigraphiques entre les roches du Parautochtone et celles de la Sous-province d'Abitibi (Ciesielski 1988, Birkett et al., 1991; Girard et Moorhead, 1994). Actuellement, il est possible d'estimer que moins de 50% du Parautochtone à l'est de l'Abitibi a été cartographié d'une manière systématique. Ce rapport vise à combler ce vide cartographique dans le Parautochtone, en documentant essentiellement par la géophysique (levés magnétiques et gravimétriques) la continuité des principales roches hôtes de la minéralisation (gneiss mafiques et amphibolites) et les principaux linéaments.

Dans le Grenville, le potentiel pour les minéralisations aurifères et les métaux de base dans le prolongement de la prolifique Ceinture de roches vertes de l'Abitibi a été souligné par Birkett et al. (1991), Moorhead et al. (1991) et Girard et Moorhead (1993a). L'assemblage volcano-sédimentaire, métamorphisé généralement au faciès amphibolite, montre un assemblage lithologique et des altérations favorables pour des minéralisations de type volcanogène (Girard et Moorhead, 1993b). La présence dans le Parautochtone de zones de déformation ductile et cassante (Girard et Moorhead, 1994) suggère également un potentiel pour des minéralisations aurifères de type mésozonal et hypozonal. Jusqu'à présent, seuls quelques indices aurifères et de métaux de bases ont été trouvés dans le Parautochtone. Le manque de levés géologiques, la complexité structurale de la Province de Grenville et le peu d'exploration minérale expliquent probablement ce faible taux de découvertes. Par contre, plusieurs dépôts sont connus et exploités en Australie, en Afrique du Sud, au Zimbabwe et aux Indes dans des terrains archéens de haut grade métamorphique comparables à ceux connus dans le Grenville (Mueller, 1988 ; Siva Siddaiah et Rajami, 1989 ; Van Reenen et al., 1994 ; Kisters et al., 1998).

Les observations géophysiques présentées dans ce document permettent d'interpréter de nouvelles bandes de gneiss mafiques et d'amphibolites dans la continuité des séries connues. La géophysique permet également de préciser la position de la limite entre l'Allochtone et le Parautochtone et de suggérer la nature probable de ce contact. Pour la première fois, plusieurs familles de linéaments géophysiques ont été mises en relief dans le Parautochtone et l'Allochtone. Des hypothèses sur les effets du métamorphisme et sur l'évolution tectonique du FG sont également présentées. Le potentiel pour les minéralisations en métaux de base et en or est aussi discuté à la lumière des traitements, observations et interprétations géophysiques. Des modèles d'exploration à une échelle régionale sont proposés pour le Parautochtone et l'Allochtone à l'est du FG.

2 MÉTHODOLOGIE

Contrairement à la cartographie, la géophysique a l'avantage d'avoir une base d'information uniforme pour l'ensemble d'une région. Elle pénètre le mort-terrain et devient donc un outil indispensable pour les régions avec peu d'affleurements. L'approche préconisée est d'utiliser des données magnétiques et gravimétriques et des filtres géophysiques afin de générer des images de qualité supérieure. Une approche géo-intégrée, combinant les données géophysiques et géologiques, est réalisée par la suite. À partir d'images géophysiques, il est possible d'établir des corrélations entre la signature géophysique et certaines unités ou ensembles géologiques. Généralement, la rupture du grain magnétique et la limite entre deux domaines géophysiques distincts sont soulignées par des linéaments géophysiques. Ces linéaments sub-concordants ou sécants par rapport au grain magnétique témoignent généralement de la

présence d'une faille. Par la suite, une corrélation spatiale peut être faite entre des minéralisations connues et des unités favorables ou des linéaments interprétés par géophysique.

2.1 Traitements géophysiques

Les données magnétiques proviennent du gouvernement fédéral : http://qdcinfo.agq.nrcan.gc.ca:80/cat/cat2_f.html. Les levés aéroportés utilisés ont été faits à une altitude moyenne de 300 m avec un espacement des lignes de vol aux 800m. Le levé gravimétrique du gouvernement fédéral est le seul disponible pour le secteur. Il est disponible gratuitement sur Internet : http://qdcinfo.agq.nrcan.gc.ca:80/cat/cat3_f.html.

Les traitements faits sur le champ magnétique total ont été effectués avec le logiciel Geosoft. La signification des filtres mathématiques est décrite ici. La signification de ces filtres provient du logiciel Geosoft et des auteurs Allard et Bois (1999).

1^{ères} dérivées et gradient vertical

La 1^{ière} dérivée verticale (selon l'axe Z), ou gradient vertical, est communément appliquée sur le champ magnétique total. Elle permet de rehausser les anomalies de faible profondeur en amplifiant les hautes fréquences. La 1^{ière} dérivée horizontale permet de mettre en évidence des accidents géologiques selon une composante horizontale, soit nord-sud (axe Y) ou est-ouest (axe X). Le gradient vertical est communément appliqué sur la gravité. Il s'agit de calculer la 1^{ière} dérivée sur les anomalies de Bouguer.

Projection vers le haut

La projection vers le haut est un filtre mathématique qui permet de simuler les résultats d'un levé aéroporté fait à X m au-dessus de l'altitude du levé original. C'est un filtre sans artefact dans le sens où il ne produit pas d'effet de bordure. Ce traitement sert à diminuer l'effet des anomalies dont les sources se trouvent près de la surface, ce qui met en valeur les anomalies magnétiques profondes.

Filtre passe-bas

Ce filtre permet d'enlever certaines longueurs d'ondes d'un levé magnétique afin de mettre en valeur les basses fréquences. Ce filtre permet entre autres de faire ressortir les grands domaines magnétiques en surface ou enfouis.

Le signal analytique

Le signal analytique est la racine carrée de la somme des dérivées X, Y et Z au carré. Le signal analytique est utile pour localiser la marge des anomalies de source magnétique, en particulier où la rémanence complique l'interprétation.

Intégration verticale

Ce filtre calcule l'intégral des données selon l'axe Z. C'est l'inverse de la 1^{ière} dérivée verticale. Combiné au signal analytique (signal analytique intégré), ce filtre permet de rehausser le contraste dans les régions de faibles reliefs magnétiques.

En plus des filtres mathématiques appliqués sur les données, des filtres directionnels d'ombrage sont utilisés sur des images afin de faire rehausser des ruptures ou des contrastes dans le grain magnétique.

2.2 Compilation de données géologiques

Une synthèse géologique régionale couvrant le Parautochtone et une partie de l'Allochtone dans la Province de Grenville nous a été fournie par Goutier et Melançon (carte en préparation) du Ministère des Ressources naturelles du Québec. La carte de compilation couvre le FG entre les latitudes 47° et 51° et a été géoréférencée dans un logiciel SIG. Comme toutes cartes de compilation, cette carte comporte une certaine part d'interprétation géologique puisque la nomenclature et la définition des roches varient beaucoup d'une carte ou d'une région à l'autre et en fonction de l'époque et des auteurs.

Les indices minéralisés et les anomalies aurifères ou en métaux de base (Cu, Zn) ont été répertoriés en utilisant l'information du SIGEOM du Ministère des Ressources naturel du Québec. Les chapeaux de fer et autres indices rouillés identifiés par Girard et Moorhead (1993a, 1993b, 1994) ont été également intégrés dans la base de données numérique.

2.3 Interprétation géologique et linéaments

L'interprétation des unités mafiques et des linéaments par géophysique est faite en utilisant différentes images géophysiques. Les extensions de gneiss mafiques et d'amphibolites à partir de la signature géophysique des bandes mafiques connues ont été tracées directement dans un SIG. En général, on note que les amphibolites sont situées en bordures des anomalies magnétiques positives engendrées par les gneiss à biotite ou les paragneiss.

Deux types de linéaments sont distingués dans cette étude : les linéaments d'entraînement et les linéaments francs. Un linéament d'entraînement se définit comme étant un creux magnétique continu et linéaire recoupant une fabrique magnétique à faible angle. Un mouvement apparent d'entraînement et de plissement de la fabrique magnétique est observé de part et d'autre ou d'un seul côté de cette dépression. Ce type de linéaments peut atteindre plusieurs centaines de mètres de largeur et plusieurs dizaines de kilomètres de longueur. Les linéaments d'entraînement sont interprétés comme des corridors de déformation ductiles séparant des domaines magnétiques ou gravimétriques distincts. Un linéament franc se définit comme étant une rupture avec déplacement apparent ou un bris net de susceptibilité magnétique à l'intérieur d'un domaine magnétique. Ce type de linéaments est généralement à un angle supérieur à 30 degrés par rapport au grain magnétique et montre un déplacement apparent faible par rapport aux linéaments d'entraînement. Les linéaments francs sont interprétés comme des failles formées en régime cassant parce qu'il n'y a pas de plissement apparent en bordure de ces linéaments.

3 ANALYSE ET INTERPRÉTATION GÉOPHYSIQUE

Cette section présente les résultats de l'analyse et des interprétations faites à partir des données magnétiques et gravimétriques. Les caractéristiques géophysiques régionales de la frontière géologique entre la Province du Lac Supérieur et de celle de Grenville ainsi que la limite entre le Parautochtone-Allochtone seront brièvement abordées. L'extension latérale des gneiss mafiques et des amphibolites dans le Parautochtone, en utilisant les signatures géophysiques, est discutée pour trois secteurs en particulier. La signature gravimétrique d'intrusions bordant le FG ainsi que la présence possible d'intrusions non-cartographiées ou non-affleurantes sont analysées à l'échelle du FG. La signature magnétique des roches archéennes est aussi comparée aux données de la cartographie métamorphique du Parautochtone. L'interprétation des linéaments géophysiques dans le Parautochtone et l'Allochtone

montre des résultats significatifs quant à la continuité des couloirs de déformation de la Sous-province d'Abitibi dans le Grenville de même que sur la tectonique grenvillienne.

3.1 Front de Grenville et limite Parautochtone-Allochtone

Le FG est un accident lithotectonique majeur séparant la Province de Supérieur à l'ouest de celle de Grenville à l'est (Rivers et Chown, 1986). Cette frontière, reconnue d'abord par Faessler (1935) et Norman (1940) et nommée par Derry (1950), délimite les roches métamorphisées au faciès des schistes verts de l'Abitibi à l'ouest des domaines métamorphisés aux grades amphibolites et granulites de la Province de Grenville à l'est. À une échelle régionale, cette limite est marquée à la fois par un contraste magnétique et gravimétrique ([figure 2](#)) et un contraste topographique. Le contraste magnétique de part et d'autre du FG a déjà été étudié par MacLaren et Charbonneau (1969) et Charbonneau (1973). Le champ magnétique de la Sous-province d'Abitibi est caractérisé par un plateau magnétique d'intensité supérieure par rapport au magnétisme de l'ensemble du Parautochtone ([figure 2a](#)). À l'est du FG, une bonne partie du Parautochtone est située dans un domaine relativement homogène et faiblement magnétique, tandis que les terrains granulitiques (Allochtone) situés plus à l'est montrent de forts contrastes magnétiques.

Le FG est bien délimité par le gradient vertical de la gravité ([figure 2b](#)). Une importante anomalie gravimétrique positive située au SE du FG marque l'interface Grenville-Supérieur. Entre Senneterre et Chibougamau, l'intensité de la gravité est similaire de part et d'autre du front mais une modification linéaire du patron gravimétrique est nettement perceptible.

Dans la Province de Grenville, la frontière entre les roches archéennes (Parautochtone) et protérozoïques (Allochtone) n'est pas clairement établie, en particulier dans la région du Réservoir Gouin ([figure 3](#)). Le Ministère des Ressources naturelles du Québec met cette limite à une cinquantaine de kilomètres au SE du FG alors que la Commission géologique du Canada place cette frontière beaucoup plus au SE. La géophysique ne permet pas de déterminer l'âge de ces roches. Cependant, le grain magnétique au SE du Parautochtone, tel que défini par le ministère provincial, montre clairement qu'il existe deux domaines distincts.

Les fortes anomalies magnétiques positives dans l'Allochtone sont caractéristiques des roches métamorphisées au faciès des granulites. À ce faciès métamorphique, la disparition de minéraux ferromagnésiens, comme la biotite et l'amphibole, favorise la formation de magnétite secondaire (Grant, 1984a). La limite Parautochtone-Allochtone fixée par le ministère provincial est nette sur les cartes magnétiques ([figure 3](#)) et délimite des roches métamorphisées au faciès des amphibolites à l'ouest et des roches granulitiques à l'est (Ciesielski, 1988). Cette limite correspond probablement à un plan de chevauchement majeur, ce qui implique que les roches à l'est ont été transportées vers le NO et remontées vers la surface sur une certaine distance. Alors, il est logique de penser que la limite proposée par le Ministère des Ressources naturelles du Québec représente la frontière entre les domaines Parautochtone et Allochtone.

3.2 Extension des gneiss mafiques et amphibolites dans le Parautochtone

L'extension des gneiss mafiques et des amphibolites dans le Parautochtone archéen est l'un des deux thèmes les plus importants de cette étude avec l'interprétation des linéaments géophysiques. La présence de ces roches mafiques métamorphisées, surtout si ces roches sont d'origine volcanique, est un métallotecte de première importance pour l'exploration minérale dans le Parautochtone. Ces roches, formées en proportions variables de hornblende, de diopside, d'hypersthène, de grenat et de plagioclase, sont interprétées comme étant le prolongement des unités volcaniques de la Ceinture de roches vertes archéennes de l'Abitibi (Allard, 1978; Lacoste, 1986; Birkett et al., 1991). La majorité des indices minéralisés dans le Parautochtone, à l'est de Val-d'Or et de Senneterre, sont localisés près ou à

l'interface de gneiss mafiques et de gneiss quartzofeldspathiques ou de paragneiss (Girard et Moorhead, 1994).

La [figure 4](#) montre la connaissance actuelle de l'étendue des gneiss mafiques et des amphibolites dans le Parautochtone (Goutier et Melançon, en préparation). À une échelle régionale, le champ magnétique total montre que les amphibolites cartographiées sont localisées dans un domaine magnétique (en vert pomme sur la [figure 4](#)) plus élevé et légèrement plus contrasté que le reste du Parautochtone (en bleu sur la [figure 4](#)). À partir de cette signature géophysique, il est possible de proposer une étendue probable des domaines de gneiss mafiques et d'amphibolites vers le SE ([figure 4](#)).

3.2.1 Extension du Terrain du Lac Témiscamingue sous l'Allochtone

À l'est de Val-d'Or, le Terrain du Lac Témiscamingue (Indarès et Martignole, 1989) se compose d'environ 45% de paragneiss et de gneiss quartzofeldspathiques, 20% de gneiss tonalitiques, près de 20% de gneiss mafiques, intermédiaires et d'amphibolites, de 10% de diatexites et de 5% de gneiss de composition variée (Girard et al., 1993). La signature magnétique de ce terrain est caractérisée par l'alternance d'anomalies magnétiques positives et négatives ([figure 5a](#)). En cartographie et en géophysique, le grain structural et magnétique E-O de ce terrain se bute à l'est sur la limite Parautochtone-Allochtone orientée NE ([figure 5a](#)).

Le Terrain du Lac Témiscamingue est également marqué par une anomalie gravimétrique positive orientée E-O qui s'incurve vers l'ouest parallèlement au FG ([figure 5b](#)). Dans le Parautochtone, la marge nord de l'anomalie gravimétrique correspond à la limite entre le Terrain du Lac Témiscamingue au sud et le Complexe de Serpent au nord. Le Complexe de Serpent est caractérisé par une alternance de gneiss quartzofeldspathiques et de 30% de gneiss mafiques et amphibolites à grenat (Girard et Moorhead, 1994). Il présente également une plus grande complexité structurale que le Terrain du Lac Témiscamingue. L'anomalie gravimétrique de ce terrain ne peut pas être expliquée uniquement que sur la base d'une proportion de roches mafiques. Si on considère que les paragneiss dans ce terrain contiennent environ 10% de lambeaux, d'enclaves et de rubans de gneiss mafiques, le total des roches mafiques et des amphibolites présentes dans ce domaine lithotectonique est d'environ 30%, ce qui est comparable à la proportion de roches mafiques du Complexe de Serpent. Le Terrain du Lac Témiscamingue contient plus de paragneiss à biotite et grenat que dans le Complexe de Serpent. Il serait surprenant qu'une plus grande proportion de métasédiments puisse générer une anomalie gravimétrique positive. La seule explication plausible pour expliquer cette anomalie gravimétrique est que le Terrain du Lac Témiscamingue est enraciné alors que le Complexe de Serpent ne l'est pas. Ainsi la quantité de gneiss mafiques et d'amphibolites dans le Terrain du Lac Témiscamingue serait la plus importante considérant l'importance de l'enracinement. Le fait saillant est que cette anomalie gravimétrique se poursuit au-delà de la limite Parautochtone-Allochtone en plongeant sous l'Allochtone. Cette observation démontre la possibilité que des terrains archéens se poursuivent à plus de 100 km vers l'est ([figure 6](#)).

3.2.2 Extension des gneiss mafiques entre Senneterre et Chibougamau

L'interprétation géophysique de l'extension des gneiss mafiques et des amphibolites dans le Parautochtone entre Senneterre et Chibougamau n'est pas évidente. D'abord parce que le contraste magnétique est généralement faible. Ensuite parce que la signature magnétique des gneiss mafiques et des amphibolites n'est pas constante d'une région à l'autre. Finalement, parce que la proportion de gneiss mafiques et d'amphibolites semblent diminuer considérablement au nord du Complexe de Serpent ([figure 4](#) et [figure 5](#)). Cependant, il semble possible d'extrapoler par géophysique certaines bandes de gneiss mafiques et d'amphibolites connues. À l'est de Senneterre, les anomalies magnétiques positives se corrèlent principalement aux gneiss quartzofeldspathiques, alors que les anomalies négatives sont principalement corrélées aux paragneiss à biotite-grenat. Les gneiss mafiques et les amphibolites sont localisés à l'interface des ces deux types d'anomalies magnétiques (d'après carte de Girard et Moorhead,

1994), dans des zones de forts gradients magnétiques. Le feuillet SNRC 32B11, qui n'a jamais été cartographié à une échelle de 1:50000, est présenté à titre d'exemple d'extrapolation des unités mafiques par géophysique ([figure 7](#)). La même observation est faite plus au NE, dans la région du Lac Lagacé (SNRC 32B/14; Bandyayera et al., 2004), où les gneiss mafiques sont préférentiellement localisés en bordure d'anomalies magnétiques positives.

La [figure 8](#) montre l'étendue possible des gneiss mafiques et des amphibolites dans le Parautochtone par interprétation géophysique. Au SE de Senneterre, près de la limite Parautochtone-Allochtone, seulement quelques bandes de gneiss mafiques ont été interprétées à l'aide du signal analytique intégré. D'ailleurs, la quantité d'unités mafiques cartographiées par Girard et Moorhead (1994) diminue progressivement vers le SE.

À l'ENE de Senneterre et dans la continuité NE du Complexe de Serpent ([figure 5a](#) et [figure 8](#)), les gneiss mafiques et les amphibolites semblent se poursuivre jusqu'à mi-chemin entre Senneterre et Chibougamau. Par contre, il semble y avoir un secteur de forme ovale avec absence de roches mafiques tel que cartographié en partie par Bandyayera et al. (2004). Il pourrait s'agir, à l'image de ce qu'on connaît en Abitibi, d'intrusions tonalitiques gneissiques autour desquelles sont concentrées des roches volcaniques.

La continuité des gneiss mafiques et des amphibolites à l'est de Chibougamau ([figure 8](#)) est très spéculative à cause du faible contraste magnétique. Il existe donc une plus grande marge d'erreur en ce qui concerne l'interprétation de ces roches dans ce domaine magnétique. Par contre, de faibles ondulations magnétiques de formes allongées et montrant une signature géophysique similaire à celle qu'on note au sud et au NE de Chibougamau, suggèrent la présence de bandes mafiques. Cette série interprétée de gneiss mafiques et d'amphibolites à l'est de Chibougamau s'inscrit directement dans le prolongement des formations volcaniques d'Obatgamau et de Gilman de la Sous-province de l'Abitibi.

3.3 Signature géophysique d'intrusions

Deux anomalies gravimétriques négatives au sud de Chibougamau permettent d'interpréter les plutons Du Sud et de La Dauversière de la Sous-Province de l'Abitibi, de même que celui de Boisvert dans le Parautochtone, comme des intrusions enracinées ([figure 9](#)). Le pluton Du Sud est présent uniquement dans la Sous-province d'Abitibi et sa bordure orientale est nettement coupée par le FG. Par contre, le pluton de La Dauversière semble connecté avec celui du Boisvert de l'autre côté du FG. Dans ce dernier cas, il pourrait s'agir d'une intrusion unique chevauchée en son centre.

L'intégration verticale du champ magnétique au SE du FG montre des pics magnétiques dans le Parautochtone qui pourraient être attribuables à des intrusions ([figure 10](#)). Ce filtre géophysique permet de reconnaître plusieurs intrusions dans la Sous-province d'Abitibi ([figure 10a](#)). Dans la Province de Grenville, les intrusions granitiques et les gneiss granitiques ne sont pas clairement exprimés avec ce traitement géophysique. Par contre, les intrusions archéennes tardives dans le Parautochtone, dont la Carbonatite du Lac Mercier (Charbonneau, 1973) et un groupe de syénites près du Front des Granulites (Laurin, 1965), sont nettement visibles. Une série d'intrusions tardives sont interprétées par géophysique dans le Grenville avec cette approche ([figure 10b](#)). En particulier, deux intrusions syénitiques sont interprétées respectivement à 40 et 100km au NE des syénites cartographiées par Laurin (1965) près du Front des Granulites ([figure 10a](#) et [figure 10b](#)). Plusieurs autres pics magnétiques sont interprétés comme des intrusions archéennes tardives ou grenvilliennes. Certaines intrusions s'inscrivent d'ailleurs dans le prolongement de chapelets de petites intrusions de la Sous-province d'Abitibi ([figure 10b](#)).

3.4 Métamorphisme et magnétisme

Les effets du métamorphisme sur le magnétisme des roches sont variables et dépendent de deux principaux facteurs : 1) du contenu initial en fer des roches et 2) de la fugacité de l'oxygène (Grant, 1984a). Le premier facteur fixe le potentiel de production maximale de magnétite. Par exemple, les roches intermédiaires et mafiques sont réputées être plus magnétiques que les roches felsiques. Le deuxième facteur contrôle la répartition du fer entre les oxydes et les silicates. Le remplacement de certains silicates de Fe-Mg pour former de la magnétite secondaire est un exemple. Les faciès à amphibolites, granulites et écolites sont généralement les plus distinctifs en termes de signatures magnétiques ([figure 11](#)).

Le métamorphisme dans le Parautochtone a atteint au minimum le faciès des amphibolites supérieur dans un régime de haute pression (Ciesielski, 1988; Girard et Moorhead, 1994). Indarès et Martignole (1989) ont observé au SE de Val-d'Or une progression des températures et des pressions depuis le FG vers les terrains granulitiques au SE ([figure 12](#) et [figure 13](#)). De manière générale, la signature magnétique entre la Sous-province d'Abitibi, le Parautochtone et l'Allochtone est très distincte ([figure 13](#)). À l'intérieur du Parautochtone, on note une diminution de la réponse magnétique depuis le FG vers le Front des Granulites. Ce dégradé magnétique pourrait s'expliquer par le fait que la quantité de migmatites augmente dans le Parautochtone vers le SE (Bandyayera et al., 2004). En effet, la susceptibilité magnétique décroît rapidement avec le taux de migmatisation et de granitisation à cause de la transformation des oxydes de fer et de titane en silicates (Krutikhovskaya et al., 1979; Grant, 1984a). Au SE de Chibougamau, l'ensemble du Parautochtone est dans un domaine de très faible contraste magnétique (figure 4 et figure 13). Deux hypothèses peuvent expliquer le faible magnétisme dans ce secteur. Il se peut que les lithologies et les compositions géochimiques des roches soient plus homogènes qu'à l'est de Senneterre. L'autre hypothèse est que le degré de migmatisation soit plus élevé qu'ailleurs vers le SO.

Cependant, dans le détail, la relation entre la réponse magnétique et le métamorphisme n'est pas directe parce que l'histoire métamorphique du Parautochtone est complexe. La [figure 14](#) montre le champ magnétique total dans le Terrain du Lac Témiscamingue et le Complexe de Serpent et les isogrades métamorphiques cartographiés par Girard et Moorhead (1994). Il ne semble pas y avoir de correspondance entre la réponse magnétique et les isogrades à orthopyroxène des granulites. Théoriquement, les faciès à granulites ont une réponse magnétique forte et contrastée, telle qu'elle est documentée dans l'Allochtone (figure 11 et figure 13). La signature magnétique inhabituelle des granulites observée dans le Terrain du Lac Témiscamingue pourrait s'expliquer par un rétro-métamorphisme au faciès des amphibolites supérieurs, tel qu'il est proposé pour le Complexe de Serpent (Girard et Moorhead, 1994) et, plus au SO, par Indarès et Martignole (1989). Cependant, Girard et al. (1993) démontrent par l'absence de texture de corrosion autour des porphyroblastes d'orthopyroxène que les granulites dans le Terrain du Lac Témiscamingue n'ont pas été affectées par un rétro-métamorphisme.

Le Front des Granulites définit la limite entre le Parautochtone et l'Allochtone (Ciesielski, 1988). Cette limite lithotectonique est clairement identifiable avec le signal analytique intégré ([figure 15](#)). Avec ce filtre, le Parautochtone métamorphisé au faciès des amphibolites supérieurs est marqué par un plateau homogène. Par contre, l'Allochtone granulitisé montre un relief très prononcé. La limite entre les deux domaines lithotectoniques semble très nette, ce qui suggère un plan de décollement relativement circonscrit en surface. Un filtre passe-bas (1 km) sur le champ magnétique vient apporter une information complémentaire au sujet de cette limite ([figure 16](#)). Contrairement au signal analytique intégré, le filtre passe-bas (1 km) montre une enveloppe de démagnétisation de quelques kilomètres qui épouse le Front des Granulites. Cette signature peut s'expliquer de trois manières :

- 1) Il pourrait s'agir d'une zone à écolite (roche à grenat et pyroxène) qui est présente à la base de certaines nappes dans la région de Manicouagan (Cox et al., 1998, 2002 et Indarès et Dunning, 2004). Dans ce faciès métamorphique de haute pression – basse température, l'ilménite et la magnétite se transforment en grenat et autres ferro-silicates, ce qui produit une démagnétisation (figure 11). Si cette hypothèse s'avère positive sur le terrain, il pourrait s'agir du second cas d'écolite documenté dans le Grenville après Manicouagan (Eaton et al., 1995);

- 2) Cette enveloppe faiblement magnétique pourrait également représenter une zone de rétro-métamorphisme au faciès des amphibolites. Ce type de rétro-métamorphisme à la limite de deux blocs est bien documenté dans la Ceinture du Sud Limpopo (Van Reenen et al., 1994). La circulation de fluides générée par un rétro-métamorphisme au faciès des amphibolites produit une réhydratation des granulites. Ce processus impliquant des fluides peut engendrer une démagnétisation partielle ou complète des roches dans les zones de failles (Henkel et Guzman, 1977; Grant, 1984b);
- 3) L'enveloppe de démagnétisation pourrait s'expliquer aussi par une faille de chevauchement à faible pendage. L'enveloppe épouse le tracé du front surtout du côté SE dans l'Allochtone, alors que la démagnétisation du côté NO est moins perceptible à cause du faible contraste magnétique dans le Parautochtone. Une faille à faible pendage vers le SE laisserait passer la faible signature magnétique du Parautochtone sous-jacent, produisant ainsi un bas magnétique du côté Allochtone. Cette hypothèse est en partie confirmée car la position du Front des Granulites telle qu'elle est montrée sur la figure 16, coïncide sur la carte de Laurin (1965) avec des foliations à faibles pendages (~30°) vers le SE.

Les hypothèses 2 et 3 sont privilégiées et peuvent être combinées. Ainsi, l'éponte supérieure du chevauchement au Front des Granulites pourrait représenter une zone de réhydratation majeure propice à des circulations métamorphiques et hydrothermales.

3.5 Linéaments géophysiques

L'interprétation des linéaments géophysiques est le second volet important de cette étude. Un creux magnétique continu marquant la rupture et l'entraînement du grain magnétique témoigne généralement de la présence d'une faille. La connaissance de ces failles est capitale dans le Grenville. D'abord du point de vue de l'histoire structurale et tectonique et, deuxièmement, parce que les failles dans les terrains de haut grade métamorphique sont le principal guide d'exploration pour les minéralisations aurifères de type hypozonal (Groves et al., 1995).

Actuellement, dans tout le Parautochtone au SE de la Sous-province d'Abitibi, à peine une cinquantaine de failles ont été compilées sur les cartes géologiques ([figure 17](#)). La majorité de celles-ci sont des failles cassantes ou ductiles cassantes. À l'est de Senneterre, près de la moitié des failles sur les cartes géologiques ont été interprétées par géophysique ([figure 18](#); Girard et Moorhead, 1994). Les roches du Parautochtone ont un rubanement et une foliation bien développés qui témoignent d'un profond enfouissement. Cela n'empêche pas de reconnaître sur le terrain, parmi la gneissosité, des zones de cisaillement hypozonales syn-métamorphiques où se bute le grain tectonique avec un angle variable (Girard et Moorhead, 1994).

3.5.1 Linéaments d'entraînement

Les linéaments géophysiques d'entraînement (voir définition section 2.3) ont été interprétés dans le Parautochtone et en partie dans l'Allochtone. Si peu de failles ont été cartographiées/interprétées à l'est de Senneterre ([figure 18](#)), les linéaments géophysiques sont par contre abondants ([figure 19](#) et [figure 20](#)). Les linéaments E-O sont généralement plus courts et plus ondulants que les linéaments NE qui sont plus longs et rectilignes. L'ensemble des linéaments géophysiques interprétés est cohérent avec l'organisation géologique et semble correspondre à un réseau de failles anastomosées ([figure 21](#)). Par exemple, certains linéaments géophysiques correspondent à l'amincissement de bandes gneissiques le long d'un corridor structural. D'autres linéaments délimitent ou isolent des domaines plissés ou complexes au niveau structural. Quelques linéaments marquent une augmentation ou une diminution brusque de l'épaisseur de certaines unités géologiques.

À l'est de Senneterre, un linéament majeur et orienté E-O traverse tout le Parautochtone. Il délimite un domaine magnétique contrasté au sud et un domaine magnétique plus homogène au nord ([figure 19](#) et [figure 20](#)). Cette discontinuité marque également la limite nord de l'anomalie gravimétrique positive associée au Terrain du lac Témiscamingue (figure 2b). Ce linéament d'une longueur de plus de 110 km est marqué par une démagnétisation mesurant entre 1 et 2 km de largeur. D'après la cartographie de Girard et Moorhead (1994), cette zone correspond à des bandes gneissiques rectilignes, à des foliations parallèles et à une plus forte concentration d'unités à grenat, ce qui laisse croire que cette zone représente une zone de déformation ductile et d'altération hydrothermale.

Girard et al. (1993) et Girard et Moorhead (1993a) ont proposé que le Terrain du Lac Témiscamingue serait l'équivalent des métasédiments de la Sous-province du Pontiac, alors que le Complexe de Serpent serait l'équivalent des volcanites de Villebon, de Val-d'Or et de Carpentier de la Sous-province d'Abitibi ([figure 18](#) et [figure 22](#)). Si, dans la Province de Supérieur, la limite entre ces deux sous-provinces est marquée par la Faille de Cadillac-Larder Lake, aucune faille d'ampleur équivalente n'a été proposée du côté est du FG dans le Parautochtone. Le linéament majeur E-O mis en évidence par la présente étude ne semble pas correspondre à la limite entre le Terrain du Lac Témiscamingue et le Complexe de Serpent tel que définie par Girard et Moorhead (1994), puisqu'elle est située à environ 10 km plus au sud (figure 18 et figure 19). Il semble plutôt correspondre au sud à un domaine principalement composé de paragneiss à biotite-grenat avec quelques bandes courtes, étroites et plissées de gneiss mafiques et d'amphibolites, et d'un domaine plutôt volcanique au nord avec des bandes de gneiss mafiques plus épaisses et continues dans des gneiss quartzofeldspathiques ([figure 22](#)). Cette image est analogue à celle proposée par Girard et al. (1993), avec les équivalents sédimentaires de la Sous-province de Pontiac au sud et les équivalents volcaniques de Sous-province d'Abitibi au nord. Cependant, il est proposé que cette limite géophysique soit l'équivalent de la Faille de Cadillac-Larder Lake. Cette limite entre le domaine métasédimentaire au sud et le domaine métavolcanique au nord serait par contre plus progressive et moins nette que dans la Province de Supérieur. Ceci s'expliquerait par le fait que dans le Parautochtone, ce sont les racines des ceintures de roches vertes qui sont exposées.

Il y a correspondance entre certains linéaments géophysiques et certaines failles cartographiées sur le terrain. Par exemple, entre Senneterre et Chibougamau (Feuillet SNRC 32B14), les failles ductiles cartographiées par Bandyayera et al. (2004) ont des expressions magnétiques nettes et se corrèlent avec des linéaments d'entraînement ([figure 23](#) et [figure 24](#)). Notamment, la Faille Amiskotci est une zone de déformation intense orientée E-O et d'une largeur de 1 km. Cette faille pentée à $\sim 75^\circ$ sud qui est entre autres caractérisée par des plis en fourreaux, délimite des gneiss mafiques au nord et des gneiss tonalitiques migmatisés au sud. D'autres linéaments d'entraînement sont proposés pour ce secteur, notamment une série de failles ENE à intervalle régulier au sud de la Faille Amiskotci. La 1^{ière} dérivée horizontale du champ magnétique selon une direction N-S ([figure 24](#)) montre que l'extrémité est de la Faille Amiskotci est entraînée le long d'une faille orientée NE. Ceci suggère que le réseau de linéaments NE est plus jeune que le réseau E-O et ENE. Cette chronologie relative paraît se confirmer dans le coin NO du feuillet SNRC 32B10 ([figure 24](#)). Un linéament géophysique ENE vient se buter sur une anomalie magnétique circulaire. Cette anomalie a été cartographiée comme une syénite à néphéline massive (Laurin, 1965) apparemment tardive par rapport à la gneissosité grenvillienne. Il semble donc que le linéament ENE est antérieur par rapport à cette intrusion. Par contre un linéament rectiligne NE segmente l'intrusion en deux corps distincts (Laurin, 1965), ce qui lui conférerait un âge relatif plus jeune.

La compilation des linéaments géophysiques à l'échelle du FG est présentée sur la [figure 25](#) et la [figure 26](#). Les linéaments E-O et ENE sont généralement ondulants, ont des longueurs moyennes comprises entre 10 et 20 km et s'alignent entre eux avec un léger décalage selon un axe E-O. Ils sont interprétés comme des reliques de structures archéennes. Plusieurs de ces linéaments géophysiques s'inscrivent, avec un décalage variable le long du FG, dans la continuité de failles majeures de la Sous-province d'Abitibi (Travaux de Daigneault), notamment les failles Cadillac – Larder Lake (figure 22), Rémick, Guercheville et Kapunapotagen ([figure 25](#)).

Les linéaments géophysiques NE sont par contre plus longs, avec une moyenne entre 15 et 40 km, mais certains linéaments dépassent les 100 km ([figure 26](#)). Dans le Parautochtone, ces linéaments sont plus rectilignes et sont orientés parallèlement au FG, à l'exception de ceux situés à l'est de Chibougamau. La

plupart d'entre eux recoupent ou entraînent les linéaments E-O dans un mouvement apparent senestre (figure 19 et figure 24). À l'est de Senneterre, les isogrades métamorphiques des granulites interprétés par Girard et Moorhead (1994) sont recoupés, ou en partie délimités, par des linéaments NE. Dans l'Allochtonne, l'orientation des linéaments d'entraînement est plus variée ce qui reflète la complexité structurale de ce domaine (figure 26). Cependant, au sud de la région étudiée, on note un parallélisme dans la direction des linéaments NE dans le Parautochtone et l'Allochtonne. Ceci suggère que l'ensemble des linéaments NE sont d'âge grenvillien. D'ailleurs, d'autres linéaments NE sont également présents sur l'ensemble de la Sous-province d'Abitibi (Faure, 2001; Faure et al., 2001). Ces linéaments recoupent les couloirs de déformation archéens de cette sous-province (figure 26). Tant dans le Parautochtone à l'est de Chibougamau qu'au centre de l'Abitibi, des linéaments géophysiques orientés NE s'inscrivent dans le prolongement de la Faille Gwillim, une structure archéenne qui a rejoué au Protérozoïque (Daigneault et Allard, 1989).

3.5.2 Interprétation tectonique basée sur les linéaments et la géophysique

La chronologie relative entre les deux grandes familles de linéaments d'entraînement et les interprétations qui en sont faites du point de vue structural, permettent de proposer une séquence de mise en place des terrains archéens et grenvilliens sur la Province de Supérieur.

Les linéaments d'entraînement E-O dans le Parautochtone sont interprétés comme des vestiges de failles archéennes. Ils représenteraient les extensions vers l'est des corridors de déformation de la Sous-province d'Abitibi (figure 27a; section 3.5.1). L'ensemble de ces failles se serait formé au cours de l'orogénie kénoréenne (~2,8 milliards d'années) suite à un raccourcissement N-S généralisée à l'ensemble de l'Abitibi (Daigneault et al., 2003). Probablement qu'à cette époque, les failles E-O, de part et d'autre de l'actuel FG, étaient au même niveau structural (schistes verts). Au cours des premiers stades de déformation de l'orogénie grenvillienne (~1,4 milliards d'années; Gower et Krogh, 2002), les terrains archéens à l'est de l'actuel FG se seraient déracinés et auraient été transportés vers le NO le long d'un plan majeur de chevauchement correspondant au même plan que le FG actuel (figure 27b). Le chevauchement frontal aurait poursuivi sa course jusqu'à sa position actuelle (figure 27c). En analogie avec la chaîne himalayenne, le front structural se serait déplacé progressivement vers le SE afin d'accommoder la déformation. Une nappe protérozoïque de roches granulitiques aurait été remontée et transportée sur le Parautochtone développant des plis en fourreaux dans le Bassin du Réservoir Gouin (figure 27c; interprétation faite à partir de la carte de Laurin, 1965). Le front de cette nappe représente l'actuel Front des Granulites (Ciesielski, 1988). Il est à noter qu'aucune structure NE est observée par géophysique dans cette nappe, ce qui suggère qu'elle est plus jeune que les structures NE du Parautochtone. La structuration finale dans ce secteur du Grenville pourrait s'être produite à la fin de l'orogénie grenvillienne, vers 1 milliard d'années, d'après les travaux de Indarès et Dunning (2004) dans le Bassin de Manicouagan. Une faille majeure et rectiligne se serait alors formée au SE, parallèlement au FG (figure 27d). Elle recoupe actuellement la nappe du Bassin du Réservoir Gouin et recouvre les terrains archéens interprétés par gravité (figure 27a).

3.5.3 Linéaments francs

Les linéaments francs interprétés par géophysique sont au nombre de 260 (figure 28). Ils sont pour la majorité perpendiculaires au FG et certains d'entre eux ont une expression topographique. La longueur moyenne est de 30 km, mais certains linéaments atteignent près de 100 km. Quelques linéaments SE recoupent le FG alors que plusieurs autres recoupent la limite Parautochtone-Allochtonne, notamment les linéaments SE, E-O et N-S. Il est donc logique d'interpréter ces linéaments comme étant d'âge post-grenvillien. Quelques linéaments NE et parallèles au FG pourraient être interprétés comme des chevauchements grenvilliens.

Les linéaments SE sont parallèles et se corrèlent aux rifts du Saguenay et du Témiscamingue, deux structures en extension actives lors de l'ouverture de l'océan lapétus au Protérozoïque tardif et au Cambrien inférieur ([figure 29](#)). Ces linéaments sont interprétés comme des failles cassantes pouvant déplacer à l'occasion des unités magnétiques avec un rejet apparent de quelques centaines de mètres. Dans la Sous-province d'Abitibi, d'autres linéaments géophysiques orientés SE (Faure, 2001; Faure et al., 2001) montrent que ce système de failles est généralisé à la fois dans les provinces du Lac Supérieur et de Grenville. Dans le Parautochtone, deux dykes ressortent en relief magnétique négatif, dont le plus important recoupe le Front des Granulites, et sont corrélés au Rift du Saguenay ([figure 29](#)). Ces dykes s'alignent d'ailleurs avec deux carbonatites reliées à ce rift. Certains linéaments SE pourraient représenter des conduits favorables pour la mise en place de kimberlites. En effet les kimberlites d'Ailly, de Le Sueur et de Le Tac en Abitibi sont alignées avec les plus longs linéaments interprétés dans le Parautochtone ([figure 29](#)).

4 GUIDES ET MODÈLES D'EXPLORATION POUR LE PARAUTOCHTONE

Très peu d'indices minéralisés ont été découverts dans le Parautochtone ([figure 30](#), [figure 31](#) et [figure 32](#)) malgré le fait que la composition et l'âge de ce domaine lithotectonique sont similaires à ceux de la Sous-province d'Abitibi. Cette dichotomie est exclusive au Québec puisque des minéralisations dans des contextes similaires sont exploitées dans des roches archéennes de haut grade métamorphique (Mueller, 1988; Siva Siddaiah et Rajami, 1989; Van Reenen et al., 1994; Kisters et al., 1998). Malgré le fait que l'exploration dans le Parautochtone soit toujours à un stade très préliminaire et que la cartographie est inégale, tout porte à croire que la majorité des ingrédients sont réunis pour trouver des minéralisations dans le Parautochtone et l'Allochtone.

Dans cette section, les minéralisations aurifères et en métaux de base du Parautochtone sont mis en relation spatiale avec les gneiss mafiques cartographiés/interprétés et les linéaments. Des hypothèses et des modèles de minéralisations sont proposés.

4.1 Les minéralisations dans le Parautochtone

Le potentiel pour des minéralisations en métaux de base dans le parautochtone a déjà été souligné par Birkett et al. (1991) et Girard et Moorhead (1993a, 1993b). Ces auteurs soulignent l'importance des gneiss mafiques et des amphibolites comme métallotecte à une échelle régionale. Cependant, seuls quelques indices avec des valeurs économiques (>1% Cu, Zn) ont été découverts jusqu'à présent à l'est de Senneterre et au SE de Chibougamau. Dans le Terrain du Lac Témiscamingue, le gîte de Langlade caractérise bien le type de minéralisation connue dans ce secteur ([figure 31](#) et [figure 32](#)). La minéralisation est sous la forme de lentilles de pyrrhotite et de pyrite disséminées ou semi-massives. Des quantités significatives de sphalérite, chalcopryrite, galène et gahnite sont présentes (Girard et Moorhead, 1993b). La meilleure intersection a donné 16% Zn, 4,2% Cu, 38 g/t Ag et 436 ppb Au sur 1,1 m (Moore, 1993). Les lentilles de sulfures sont localisées au contact entre des gneiss quartzofeldspathiques (roches felsiques) et des gneiss mafiques et des amphibolites.

D'autres minéralisations à teneurs sub-économiques en métaux de base et des indices contenant des sulfures disséminés stériles (chapeaux de fer) sont également localisés au contact de gneiss quartzofeldspathiques et de gneiss intermédiaires et mafiques ([figure 31](#); Girard et Moorhead, 1993a). Elles sont généralement associées à des horizons graphiteux et des gneiss grenatifères (25 à 50% de grenat). Cette dernière association est interprétée comme étant similaire à des exhalites, des sédiments et des roches altérées marquant des pauses dans le volcanisme bimodal (Girard et Moorhead, 1993a).

Les minéralisations aurifères sont encore plus rares dans le Parautochtone ([figure 30](#) et [figure 32](#)). À l'est de Senneterre, les indices anomaux en or (< 1 g Au/t) sont associés à des éléments structuraux

cassants dans des gneiss mafiques (Girard et Moorhead, 1993b; Girard et al., 1993). La minéralisation se présente sous la forme de veines et de stockwerks de quartz, feldspath potassique, de carbonates, de micas (dont la fuchsite) et de la pyrrhotite et de la pyrite disséminées (Girard et Moorhead, 1994). Il semble donc que la rhéologie et la chimie des gneiss mafiques jouent un rôle important pour la précipitation de l'or. Ces structures cassantes et hôtes de la minéralisation ont pu se développer dans deux types d'environnement structural. Elles peuvent représenter des zones abritées dans les amphibolites où le comportement cassant prévaut. Dans ce cas il s'agirait d'or syn-tectonique ou orogénique. Les veines minéralisées pourraient être des structures formées en régime globalement cassant. Dans ce cas, il s'agirait d'or tardi- ou post-tectonique, probablement formé à la fin de l'orogénie grenvillienne.

4.2 Potentiel pour les minéralisations en métaux de base

Les gneiss mafiques et les amphibolites interprétés par géophysique dans l'extension des bandes mafiques connues ouvrent de nouveaux secteurs pour l'exploration minérale dans le Parautochtone. La [figure 8](#) montre la proportion significative de nouveaux horizons mafiques qui ont été interprétés. Tous les gneiss mafiques cartographiés/interprétés sont à priori un bon métallotecte à la fois pour l'or et les métaux de base. La région à l'est de Senneterre semble montrer un bon potentiel pour les minéralisations en métaux de base parce que la quantité de gneiss mafiques et d'amphibolites est maximale dans ce secteur. À une échelle régionale, la gravité semble appuyer cette hypothèse ([figure 6](#)). En effet, la plus grande quantité de gneiss mafiques et d'amphibolites est située au niveau du Terrain du Lac Témiscamingue et du Complexe de Serpent, et correspond à la plus importante anomalie gravimétrique du Parautochtone ([figure 5](#) et [figure 6](#)). Cette anomalie gravimétrique s'atténue rapidement au nord du Complexe de Serpent, ce qui porte à croire que les roches mafiques sont moins nombreuses et/ou qu'elles sont moins enracinées vers le NE. L'anomalie gravimétrique positive et linéaire qui longe le FG entre Senneterre et Chibougamau a une signature typique des domaines volcaniques archéens de la Sous-province d'Abitibi ([figure 6](#)). Cette observation permet de croire que des gneiss mafiques sont tout de même présents partout le long du FG.

4.3 Potentiel pour les minéralisations en or

À l'est de Senneterre, il semble y avoir une association spatiale assez directe entre les minéralisations aurifères, de même qu'une bonne proportion des indices de sulfures disséminés, et les linéaments d'entraînement ([figure 31](#)). Le gîte Langlade et l'indice Bongard en sont des exemples. Si l'hypothèse avancée que le long linéament magnétique traversant le Terrain du Lac Témiscamingue se révèle la continuité de la Faille Cadillac – Larder Lake, cette structure devient une cible d'exploration régionale de première importance. Tout le corridor démagnétisé enveloppant cette structure offre un bon potentiel de minéralisation. À l'image des gisements aurifères de la Sous-province d'Abitibi et de plusieurs autres ceintures de roches vertes dans le monde, les structures de deuxième et troisième ordre sont également très intéressantes. Le gîte de Langlade (échantillons de 1,1 et 2,2 g Au/t, données SIGEOM) est situé à 2 km au nord de cette structure majeure et pourrait représenter une minéralisation associée à des structures secondaires ([figure 31](#)). Les linéaments E-O interprétés comme des failles archéennes ductiles pourraient être l'hôte de minéralisations aurifères volcanogènes déformées, alors que les linéaments NE, interprétés comme des failles protérozoïques, pourraient être le lieu de remobilisation et de minéralisation à contrôle structural.

La limite entre le Parautochtone et l'Allochtone (Front des Granulites) offre également un bon potentiel pour des minéralisations aurifères associées à des faciès métamorphiques de haut grade. Tel que discuté dans la section 3.4, le Front des Granulites pourrait représenter une zone de rétro-métamorphisme au faciès amphibolite avec réhydratation des granulites dans l'éponte supérieure d'un chevauchement. Le modèle de minéralisation du Sud Limpopo (Afrique du Sud) s'applique très bien le long de ce front tectonique ([figure 33](#); van Reenen et al., 1994). D'après ce modèle, la mise en place d'une nappe

granulitique « chaude » sur un domaine métamorphique « froid » favorise le développement d'une zone mixte rétrograde et de réhydratation à la base du chevauchement. La circulation des fluides engendrée par ce contraste thermique met en solution des métaux piégés dans les ceintures de roches vertes archéennes sous-jacentes (figure 33). Un groupe de minéralisations à sulfures disséminés situé dans le Parautochtone à quelques kilomètres du Front des Granulites (figure 32, feuillet SNRC 32B5) pourrait faire partie de ce type de minéralisation. En effet, la majorité de ces indices s'alignent le long de trois segments distincts qui épousent la forme du front tectonique. Il pourrait s'agir de structures secondaires associées au Front des Granulites et le long desquels auraient circulés des fluides hydrothermaux et précipités des métaux. L'extrémité est du Terrain du Lac Témiscamingue est donc tout indiquée pour ce type de modèle puisque la gravité montre que des gneiss mafiques et des amphibolites archéennes se poursuivent sous l'Allochtone.

Le modèle de minéralisation de Renco (Zimbabwe) s'applique dans l'Allochtone, à l'est du Terrain du Lac Témiscamingue (figure 33). Les mines de Renco au Zimbabwe et de Griffin's Find en Australie sont les deux principaux gisements localisés dans des granulites (Barnicoat et al. 1991; Kisters et al. 1998). À Renco, le comportement rhéologique et chimique semble jouer un rôle important dans la précipitation des métaux. La minéralisation est associée à une zone de mylonite située à plus d'une dizaine de kilomètres en amont du plan de chevauchement principal (Blenkinsop et Frei, 1996; Kolb et al., 2003a, 2003b). La mine est située dans des roches compétentes et chimiquement réactives (enderbites), ce qui aurait favorisée la précipitation des métaux (Kisters et al., 2000;). Ce modèle s'appliquerait parfaitement à l'est du Front des Granulites, puisque des roches de compétence similaire sont présentes dans l'Allochtone.

5 CONCLUSIONS

L'interprétation géophysique de lithologies favorables et de linéaments apporte un nouveau regard sur la géologie du Front de Grenville. L'extension des gneiss mafiques et des amphibolites à partir de la signature de bandes mafiques connues ouvre de nouveaux secteurs pour l'exploration aurifères et de métaux de base dans le Parautochtone. Un des faits saillants de cette étude est la reconnaissance par gravité du prolongement vers l'est du Terrain du Lac Témiscamingue sous l'Allochtone. Des modèles de minéralisations aurifères du type rencontré à la Mine Renco ou dans le Sud Limpopo s'appliquent au Front des Granulites (limite Parautochtone-Allochtone). La signature géophysique de ce front tectonique laisse entrevoir la possibilité que la semelle de ce contact a subi un rétro-métamorphisme et une réhydratation. Une remobilisation de métaux pourrait s'être produite en avant de (c.-à-d. Parautochtone) ou dans ce front tectonique (type Sud Limpopo), de même que dans l'éponte supérieure de cette structure dans l'Allochtone (type Renco).

La reconnaissance possible de l'extension de la Faille de Cadillac – Larder Lake dans le Parautochtone est un autre point important mis en valeur par cette étude géophysique. Si cette hypothèse s'avère plausible, cette structure E-O représente une nouvelle découverte métallogénique pour le secteur à l'est de Senneterre. Des structures secondaires associées à ce linéament géophysique majeur deviennent des cibles d'exploration importantes pour des minéralisations de type or volcanogène (Doyon-Bousquet-La Ronde) ou or orogénique (hypozonal du Yilgarn). Tout le long du Front de Grenville, un système de linéaments orientés E-O à ENE est présent dans le Parautochtone avec une certaine rythmicité qui rappelle celle des grands couloirs de déformation de la Sous-province d'Abitibi. Plusieurs de ces linéaments E-O s'inscrivent, avec un certain décalage, dans le prolongement de failles abitibiennes minéralisées. Les linéaments géophysiques orientés NE sont interprétés comme des failles grenvilliennes. Plusieurs indices minéralisés ou de sulfures disséminés sont localisés le long de ces structures.

Certaines des hypothèses avancées dans ce projet restent à être documentées sur le terrain. Les travaux de cartographie envisagés par le Ministère des Ressources naturelles du Québec dans le Parautochtone devraient permettre de corroborer la présence de gneiss mafiques et d'amphibolites dans des régions jusqu'à maintenant peu ou pas cartographiées. Une étude géochimique détaillée des gneiss mafiques de part et d'autre du linéament interprété comme le prolongement du la Faille de Cadillac – Larder Lake

pourrait confirmer la limite entre deux blocs lithotectoniques. Une étude sur le métamorphisme à l'échelle du Front de Grenville permettrait d'établir une meilleure corrélation entre les isogrades métamorphiques et la signature magnétique des roches.

REMERCIEMENTS

Cette étude n'aurait pas été aussi concluante sans les discussions avec les personnes suivantes : Daniel Bandyayera, Sandrine Cadéron, Pierre Rhéaume et Patrice Roy du Ministère des Ressources naturelles du Québec; Réal Daigneault de l'UQAC et Sylvain Trépanier (Consorem). Le crédit et les remerciements pour l'initiation au logiciel Geosoft reviennent à Michel Allard de Noranda-Falconbridge Exploration. Des échanges sur les traitements géophysiques avec Marc Boivin ont été également appréciés. La révision et la mise en forme de ce document ont été réalisées par Marie-Line Tremblay.

RÉFÉRENCES

- Allard, G.O., 1978. Pétrologie et potentiel économique du prolongement du sillon de roches vertes de Chibougamau dans la province de Grenville. Ministère des Richesses naturelles du Québec, DPV 604.
- Allard, M. et Bois, D., 1999. La géophysique appliquée à l'exploration minérale. Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue. 352 pages.
- Bandyayera, D., Rhéaume, P., Cadéron, S., Giguère, E. et Sharma, K.L., 2004. Géologie de la région du lac Lagacé (SNRC 32B/14). Ministère des Ressources naturelles du Québec, RG-2004.
- Barnicoat, A., Fare, R., Groves, D. et McNaughton, N., 1991. Synmetamorphic lode-gold deposits in high-grade Archean settings. *Geology*, 19: 921-924.
- Birkett, T.C., Marchildon, N., Paradis, S. et Godue, R., 1991. The Grenville Province to the east of Val-d'Or, Quebec : a geological reconnaissance and a possible extension of the Abitibi greenstone belt in the Grenville parautochthonous belt. *Dans Current Research, Part C, Geological Survey of Canada, Paper 91-1C: 1-7.*
- Blenkinsop, T.G. et Frei, R., 1996. Archean and Proterozoic Mineralization and Tectonics at the Renco Mine (Northern Marginal Zone, Limpopo Belt, Zimbabwe). *Economic Geology*, 91: 1225-1238.
- Charbonneau, B.W., 1973. A Grenville front magnetic anomaly in the Mégiscane lake area, Quebec. Geological Survey of Canada, department of energy, mines and ressources, Paper 73-29.
- Ciesielski, A., 1988. Geological and structural context of the Grenville Front, southeast of Chibougamau, Quebec. *Dans Current Research, Part C, Geological Survey of Canada, Paper 88-1C: 353-366.*
- Ciesielski, A. et Ouellet, E., 1985. Le Front de Grenville dans la région de Chibougamau, Québec. *Dans Recherches en cours, partie B, Commission géologique du Canada, étude 85-1B : 303-317.*
- Cox, R.A., Dunning, G.R. et Indares, A., 1998. Petrology and U-Pb geochronology of mafic, high-pressure, metamorphic coronites from the Tshenukutish domain, eastern Grenville Province. *Precambrian Research*, 90 : 59-83.
- Cox, R.A., Indares, A. et Dunning, G.R., 2002. Temperature time paths in the high-P Manicouagan Imbricate zone, eastern Grenville Province: Evidence for two metamorphic events. *Precambrian Research*, 117 : 225-250.
- Daigneault, R. et Allard, G., 1989. Complexe du lac Doré. Ministère Énergie et Ressources du Québec, Mémoire 89-01.
- Daigneault, R., 1996. Couloirs de déformation de la Sous-province de l'Abitibi, MB-96-33.
- Daigneault, R., Mueller, W.U. et Chown, E.H., 2003. Abitibi greenstone belt plate tectonics: the diachronous history of arc development, accretion and collision. *Dans The Precambrian earth: tempos and events, édité par P. Eriksson, W. Altermann, D.R. Nelson, W.U. Mueller et O. Catuneanu, pp. 88-103.*
- Derry, D.R., 1950. A tectonic Map of Canada. Geological Association of Canada, proceedings, 3: 39-53.
- Eaton, D.W., Hynes, A., Indarès, A. et Rivers, T., 1995. Seismic images of eclogites, crustal-scale extension, and Moho relief in the eastern Grenville province, Quebec. *Geology*, 23: 855-858.
- Faure, S., 2001. Analyse des linéaments géophysiques en relation avec les minéralisations en or et métaux de base de l'Abitibi. Consortium de recherche en exploration minérale, rapport interne, 29 p.
- Faure, S., Gaboury, D., Daigneault, R. et Jébrak, M., 2001. Analyse des linéaments géophysiques en relation avec les minéralisations en or et métaux de base de l'Abitibi. 27^e congrès annuel Association des prospecteurs du Québec, recueil de conférences, p. 35-36.
- Faessler, C., 1935. Megiscane River headwaters area; Ann. Rept. Quebec Bureau Mines, Pt. C, p.29-38.

Gilbert, J.E., 1959. Région de Rohault, districts électoraux d'Abitibi-Est et de Roberval. Ministère des Mines du Québec, RG 86.

Girard, R. et Moorhead, J., 1993a. Nouveaux indices de métaux de base dans le prolongement des ceintures volcaniques de la partie sud de l'Abitibi à l'intérieur de la Province de Grenville, à l'est de Senneterre, Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, PRO 93-04.

Girard, R. et Moorhead, J., 1993b. Le potentiel minéral de la zone parautochtone du Grenville à l'est de Senneterre, Québec : nouvelles zones anormales du MER et nouvelles découvertes de Cominco Itée. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, PRO 93-09.

Girard, R. et Moorhead, J., 1994. Géologie de la région de Press – Clova. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MB 94-34.

Girard, R., Moorhead, J., Birkett, T.C. et Marchildon, N., 1993. Géologie de la région de Press - Clova. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MB 93-04.

Gower, C.F. et Krogh, T.E., 2002. A U–Pb geochronological review of the Proterozoic history of the eastern Grenville Province. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 39: 795-829.

Grant, F.S., 1984a. Aeromagnetics, geology and ore environments, I. Magnetite in igneous, sedimentary and metamorphic rocks : an overview. *Geoexploration*, 23 : 303-333.

Grant, F.S., 1984b. Aeromagnetics, geology and ore environments, II. Magnetite and ore environments. *Geoexploration*, 23 : 335-362.

Groves, D.I., Ridley, J.R., Bloem, E.M.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G., Hronsky, J.M.A., Knight, J.T., McNaughton, N.J., Ojala, J., Vielreicher, R.M., McCuaig, T.C. et Holyland, P.W., 1995. Lode-gold deposits of the Yilgarn block: product of Late Archaean crustal-scale overpressured hydrothermal systems. *Dans Early Precambrian Processes, édité par M.P. Coward et A.C. Ries. Geological Society of London Special Publication*, 95 : 155-172.

Henkel, H. et Guzman, M., 1977. Magnetic features of fracture zones. *Geoexploration*, 15: 173-181.

Indares, A. et Martignole, J., 1989. The Grenville Front south of Val-d'Or, Quebec. *Tectonophysics*, 157: 221-239.

Indares, A. et Dunning, G., 2004. Crustal architecture above the high-pressure belt of the Grenville Province in the Manicouagan area : new structural, petrologic and U-Pb age constraints. *Precambrian Research*, 130 : 199-228.

Kisters, A.F.M., Kolb, J. et Meyer, F.M., 1998. Gold Mineralization in High-Grade Metamorphic Shear Zones of the Renco Mine, Southern Zimbabwe. *Economic Geology*, 93: 587-601.

Kisters, A.F.M., Kolb, J., Meyer, F.M. et Hoernes, S., 2000. Hydrothermal segmentation of high-temperature shear zones: structural, geochemical and isotopic evidence from auriferous mylonites of the Renco mine, Zimbabwe. *Journal of Structural Geology*, 22: 811-829.

Kolb, J., Kisters, A.F.M., Hoernes, S. et Meyer, F.M., 2003a. The origin of fluids and nature of fluid-rock interaction in mid-crustal auriferous mylonites of the Renco mine, Southern Zimbabwe. *Mineralium Deposita*, 35: 109-125.

Kolb, J., Kisters, A.F.M., Meyer, F.M. et Siemes, H., 2003b. Polyphase deformation of mylonites from the Renco mine (Zimbabwe): identified by crystallographic preferred orientation of quartz. *Journal of Structural Geology*, 25: 253-262.

Krutikhovskaya, Z.A., Silina, I.M., Bondareva, N.M. et Podolyanko, S.M., 1979. Relation of magnetic properties of the rocks of the Ukrainian Shield to their composition and metamorphism. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16: 984-991.

Lacoste, P., 1986. Aspects pétrographiques et géochimiques de zones minéralisées dans le canton de Duberger (Chibougamau), dans le contexte métamorphique Grenville-supérieur ; mémoire de maîtrise inédit, Université du Québec à Chicoutimi, 220 p.

- Laurin, A.F., 1965. Étude géologique sommaire des sources des rivières Trenche, Windigo et Wabano, comtés de Laviolette et de Roberval. Ministère des Richesses naturelles du Québec, rapport géologique RG-130.
- Laurin, A.F. et Sharma, K.N.M., 1975. Région des rivières Mistassini, Péribonka et Saguenay. Ministère des Richesses naturelles, RG 161.
- MacLaren, A.S. et Charbonneau, B.W., 1969. Characteristics of Magnetic Data over major subdivisions of the Canadian Shield; Geol. Assoc. Can. Proc., v.19.
- Moorhead, J., Girard, R. et Birkett, T.C., 1991. Prolongement vers l'est des ceintures de roches vertes de l'Abitibi à l'intérieur de la Province de Grenville : Nouvelles cibles pour l'exploration à l'est de Senneterre. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. PRO 91-17.
- Moore, D.W., 1993. Grenval project, 1991 summary report NTS : 32C-1,2,7,8 and 32B-4,5. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, GM 51754, 286 p.
- Mueller, A.G., 1988. Archean gold-silver deposits with prominent calc-silicate alteration in the Southern Cross greenstone belt, Western Australia : analogues of phanerozoic skarn deposits. University of Western Australia Publication, 12 :141-163.
- Norman, G.W.H., 1940. Thrust faulting of Grenville gneisses northwestward against the Mistassini series of Mistassini Lake, Quebec; Journal of Geology, 48: 512-525.
- Rivers, T. et Chown, E.H., 1986. The Grenville Orogen in eastern Quebec and western Labrador- definition, identification and tectonometamorphic relationships of autochthonous, parautochthonous and allochthonous terranes; *Dans The Grenville Province, édité par J.M. Moore, A. Davidson, et A.J. Baer*; Geological Association of Canada, Special Paper 31 : 31-50.
- Siva Siddaiah, N. et Rajami, V., 1989. The Geological Setting, Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits of the Archean Kolar Schist Belt, India. Economic Geology, 84: 2155-2172.
- Tiphane, M. et Dawson, K.R., 1950. Villebon, Quebec; Geological Survey of Canada, Map 998A.
- Van Reenen, D.D., Pretorius, A.I. et Roering, C., 1994. Characterization of fluids associated with gold mineralization and with regional high-temperature retrogression of granulites in the Limpopo belt, South Africa. Geochimica et Cosmochimica Acta, 58: 1147-1159.
- Wheeler, J.O., Hoffman, P.F., Card, K.D., Davidson, A., Sanford, B.V., Okulitch, A.V. et Roest, W.R. (comp.) 1997. Carte géologique du Canada, Commission géologique du Canada, Carte D1860A.

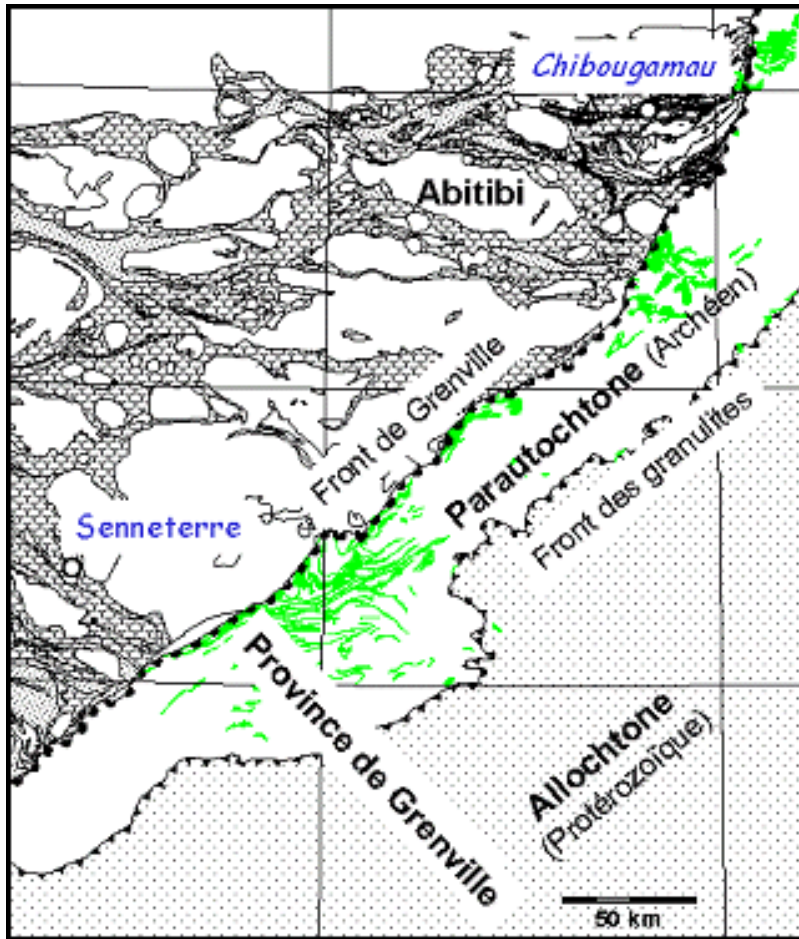


Figure 1 : Several base and precious metal deposits are known (and exploited) in high-grade metamorphic terrains of Archean age in Australia, South Africa, India and Zimbabwe. The parautochthonous belt of the Grenville Province of Quebec contains comparable high-grade Archean terrains, but only a few gold and base metal showings are presently known – even in the prolongation of the mineral-rich Abitibi subprovince. This may be due to the low level of mineral exploration carried so far, to the structural complexity of the Grenville Province, and because less than 50% of the parautochthonous belt east of the Abitibi has been systematically mapped. On this representation of the study area, mafic gneisses and amphibolites (after Goutier and Melançon, *in prep*) appear in green. One of the major goals of this study is to use geophysical information to propose new occurrences of mafic units in this part of the Grenville. These rocks are interpreted as metamorphosed equivalents of volcanic units from the Abitibi, and consist of variable proportions of hornblende, diopside, hypersthene, garnet and plagioclase. [Return to the text.](#)

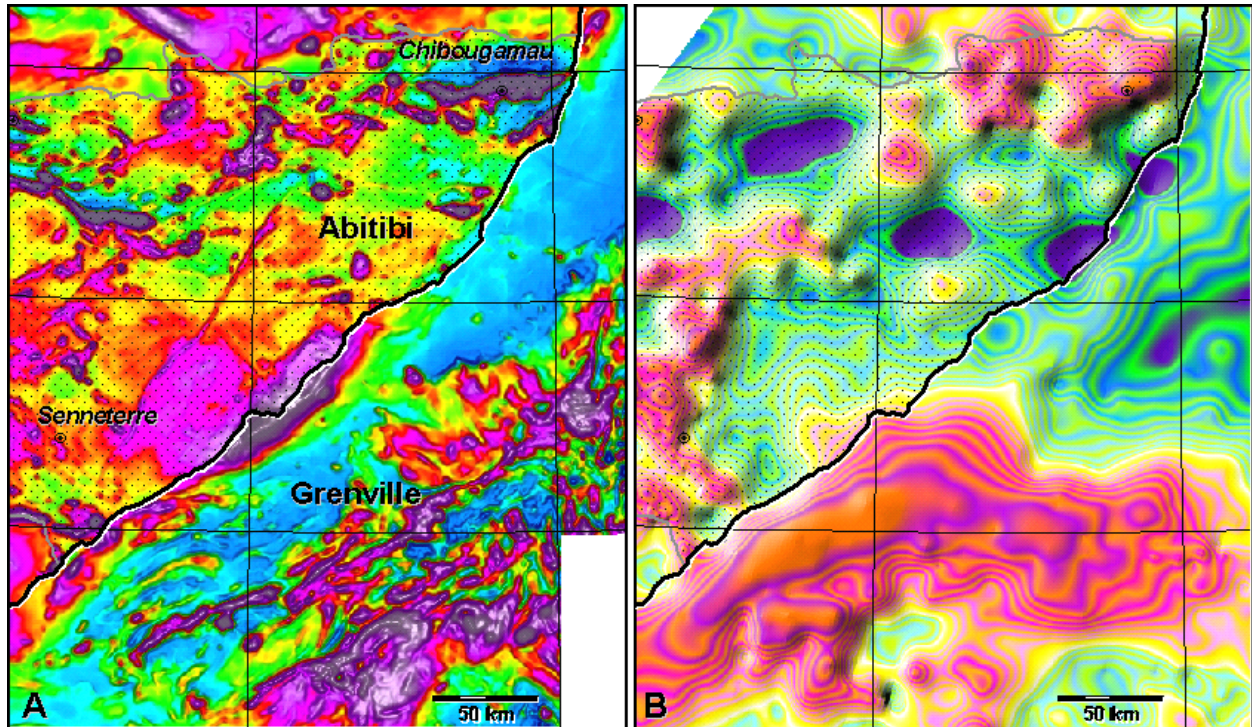


Figure 2 : The Grenville Front is a major lithotectonic boundary separating the Superior Province, to the west, from the Grenville Province, to the east. Specifically, in the study area, it separates greenschist facies rocks of the Abitibi subprovince from amphibolite-grade and granulite-grade rocks of the Grenville. At a regional scale, the Front is marked by contrasting magnetic, gravimetric and topographic features. (A) Projection at 1 km altitude of the total magnetic field. The original survey was flown at a mean altitude of 300 m above ground; projecting it higher enhances the effect of deep-seated anomalies on the signal. (B) Vertical gradient of the gravity map. Geophysical data from Natural Resources Canada. The bold line shows the position of the Grenville Front according to provincial geologic maps. The black lines are the limits of 1:250,000 topographic sheets. [Return to the text.](#)

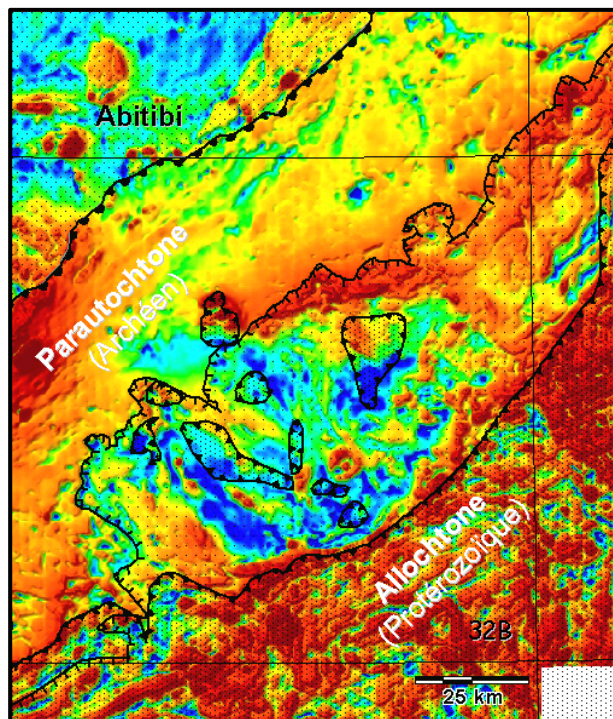


Figure 3

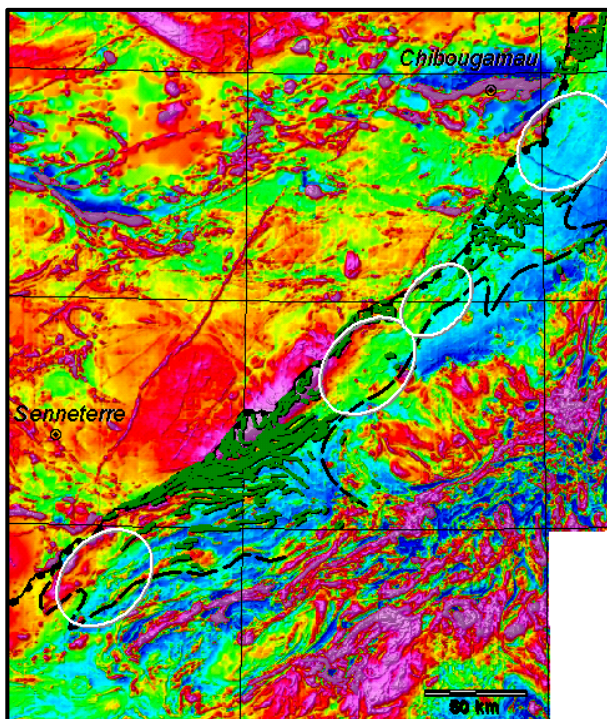


Figure 4

Figure 3 (left): Although the position of the Grenville Front is well established, the location of the boundary between parautochthonous (Archean) terrains and allochthonous (Proterozoic) terrains is debated, especially in the Réservoir Gouin area. Wheeler et al. (1997; lines with triangles) place this limit 50 km SE of that of Goutier and Melançon (*in prep*; line with ticks). The background image is the analytic signal from the vertical integration of the magnetic field. [Return to the text.](#)

Figure 4 (right): This magnetic map (total field) shows that the area of the parautochthonous belt containing known mafic rocks (dark green overlay) has a slightly different magnetic signature from the area not containing them. Specifically, compared to the remainder of the parautochthonous belt (in blue), areas containing mafic gneisses and amphibolites are slightly more magnetic and more contrasted. From this signature it is possible to propose an extension of the mafic-bearing domain toward the SE up to a new limit (black dashed line). Areas where cartographic information is lacking are identified by white ovals. Compilation of known mafic gneisses and amphibolites after Goutier and Melançon (*in prep*). [Return to the text.](#)

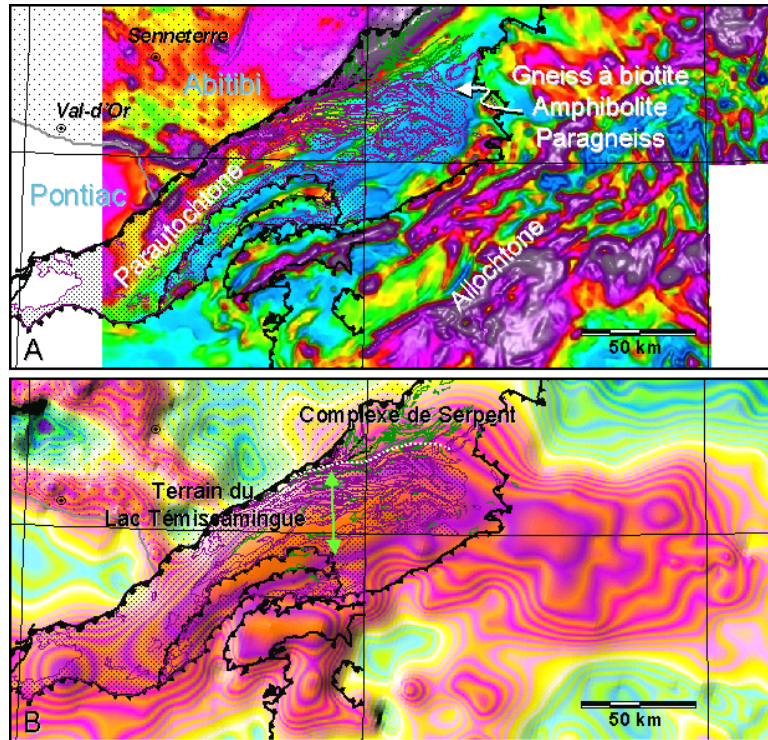


Figure 5 : The possible extension of the mafic gneisses and amphibolites is now examined in three specific areas; the first of these is the parautochthonous belt east of Val d'Or. The Lac Témiscamingue terrain (green arrow) contains about 20% amphibolites plus mafic to intermediate gneisses. The magnetic signature of this Archean terrain is characterized by alternating highs and lows with an E-W grain. This trend stops abruptly at the NE-oriented contact with the allochthonous belt. Nevertheless, the Lac Témiscamingue terrain is interpreted to extend beyond the parautochthonous belt based on the gravimetric signature. (A) Total magnetic field; (B) vertical gradient of the gravity field. Geological boundaries after Goutier and Melançon (*in prep*). [Return to the text](#).

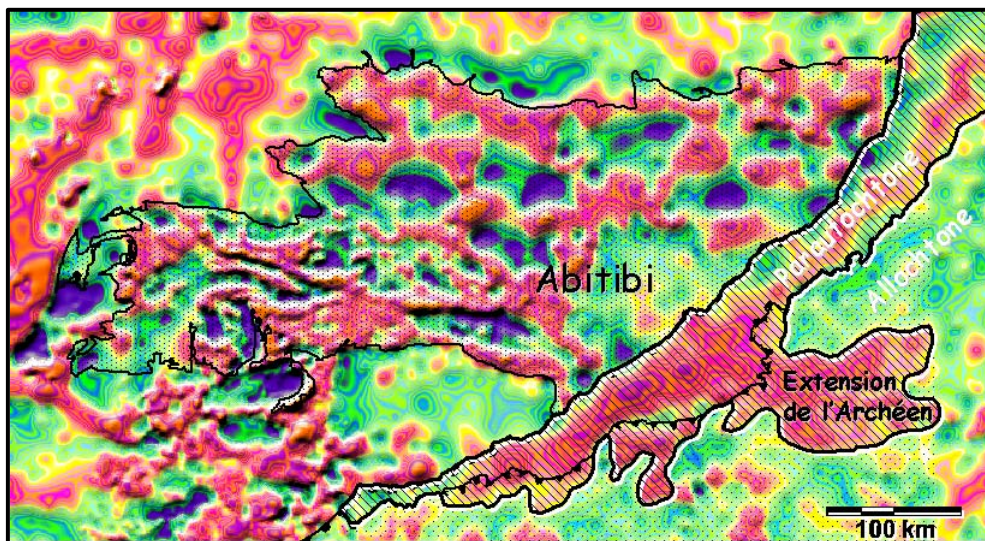


Figure 6: Proposed extension of the Archean rocks under the allochthonous belt, based on the vertical gradient of the gravimetric map. [Return to the text](#).

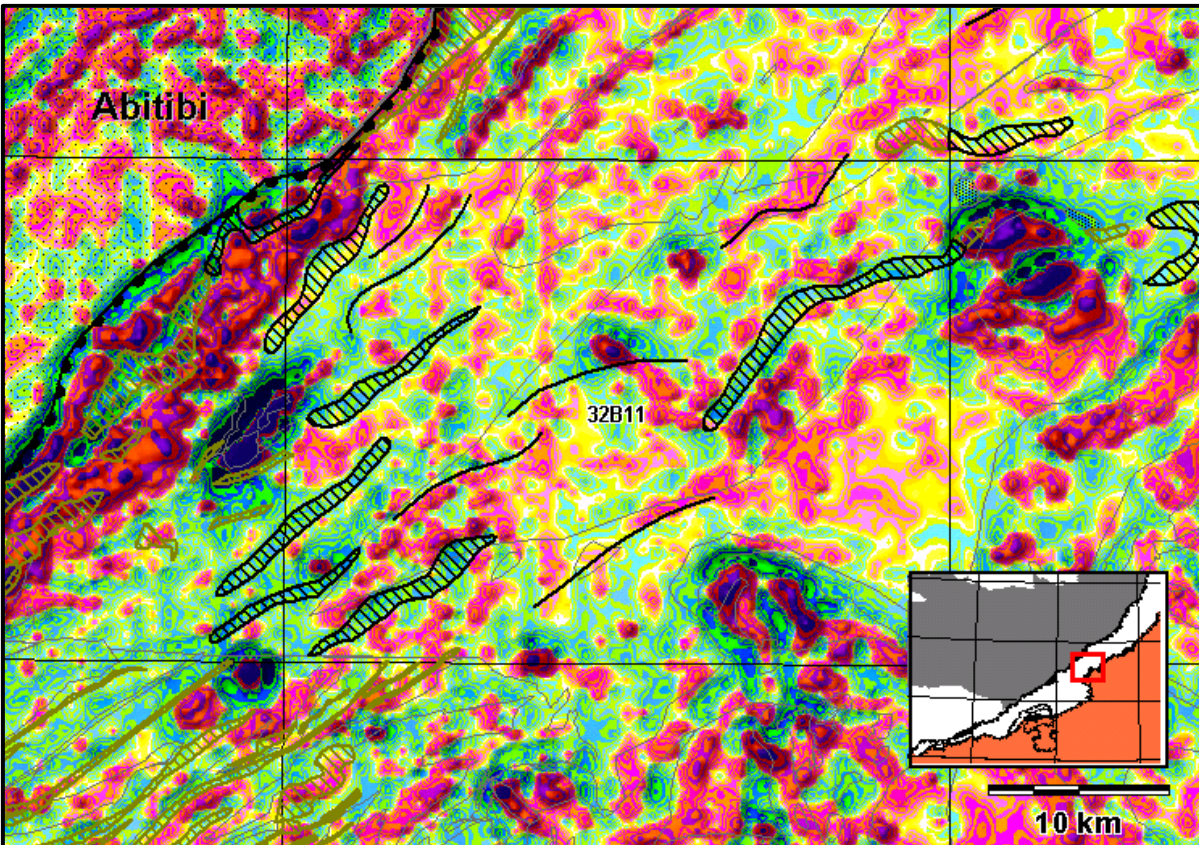


Figure 7 : The geophysical interpretation of mafic rocks between Senneterre and Chibougamau is difficult because of several factors, including a weak magnetic contrast and a lower proportion of such rocks (compared to the area east of Val d'Or). East of Senneterre, positive magnetic anomalies mostly correspond to quartzofeldspathic gneisses, whereas negative anomalies are mostly correlated with biotite-garnet paragneisses. Mafic gneisses and amphibolites (dark hatching) are found in between these two types of anomalies, within zones displaying strong magnetic gradients. The 32B11 sheet, which has never been mapped at a scale of 1:50,000, is used here as an example. Paler hatching corresponds to mapped mafic units (Goutier and Melançon, *in prep*). The background map is the vertical derivative of the magnetic field. [Return to the text.](#)

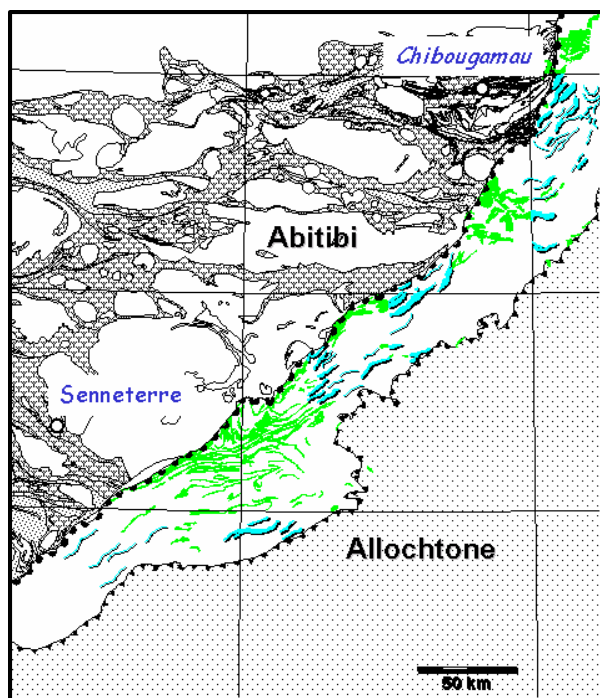


Figure 8

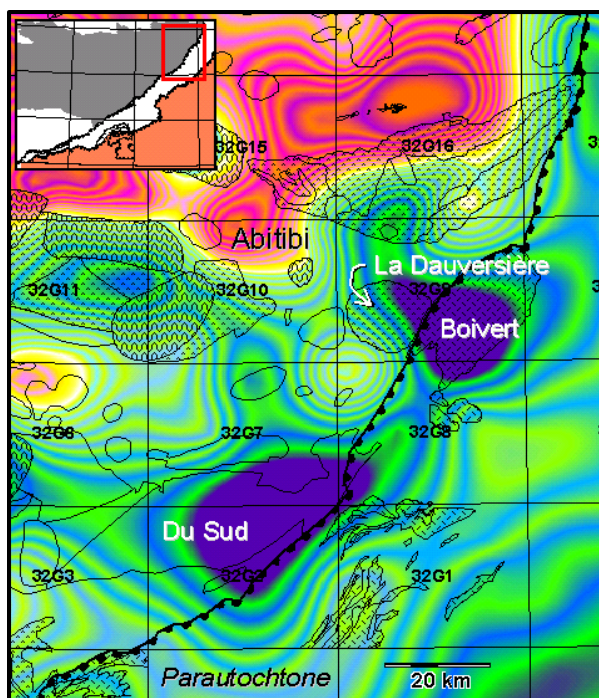


Figure 9

Figure 8 (left): Summary map showing known mafic gneisses and amphibolites according to Goutier and Melançon (*in prep*) (pale green) and the proposed extensions based on the geophysical interpretation (pale blue). Abitibi geology after Daigneault's compilation. [Return to the text.](#)

Figure 9 (right): Two negative gravity anomalies south of Chibougamau are interpreted as the manifestation of deep-seated plutons. The "Du Sud" intrusion is restricted to the Abitibi and its eastern boundary is clearly cut by the Grenville Front (bold ornamented line). However, the La Dauversière pluton in the Abitibi seems connected with the Boisvert pluton in the Grenville. The map shows the vertical gradient of the gravity field; Abitibi geology after Daigneault's compilation. [Return to the text.](#)

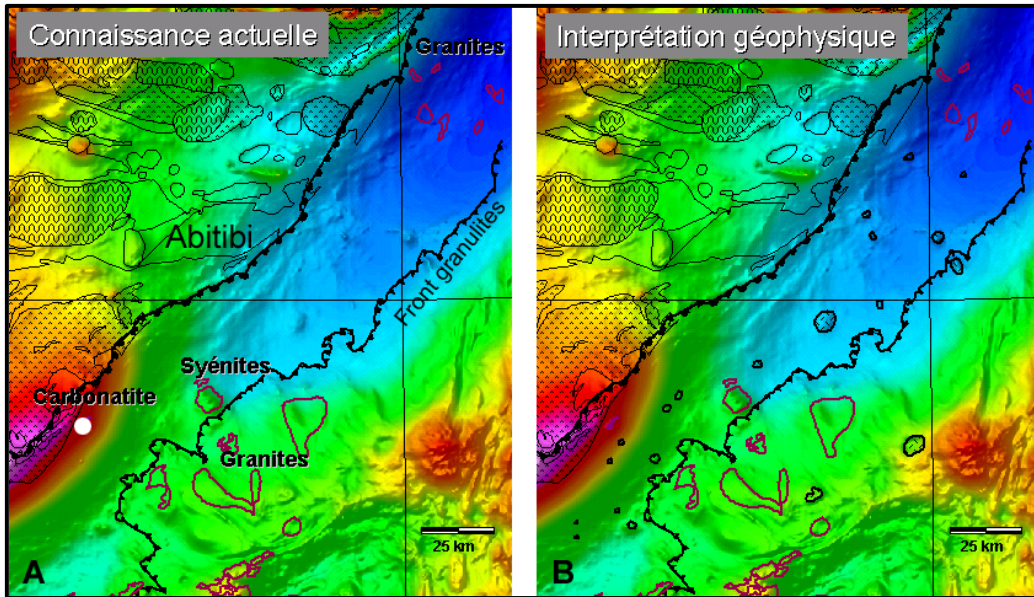


Figure 10 : The vertical integration of the magnetic field allows new intrusive bodies to be proposed in the Grenville. (A) Known intrusions; (B) proposed intrusions. [Return to the text.](#)

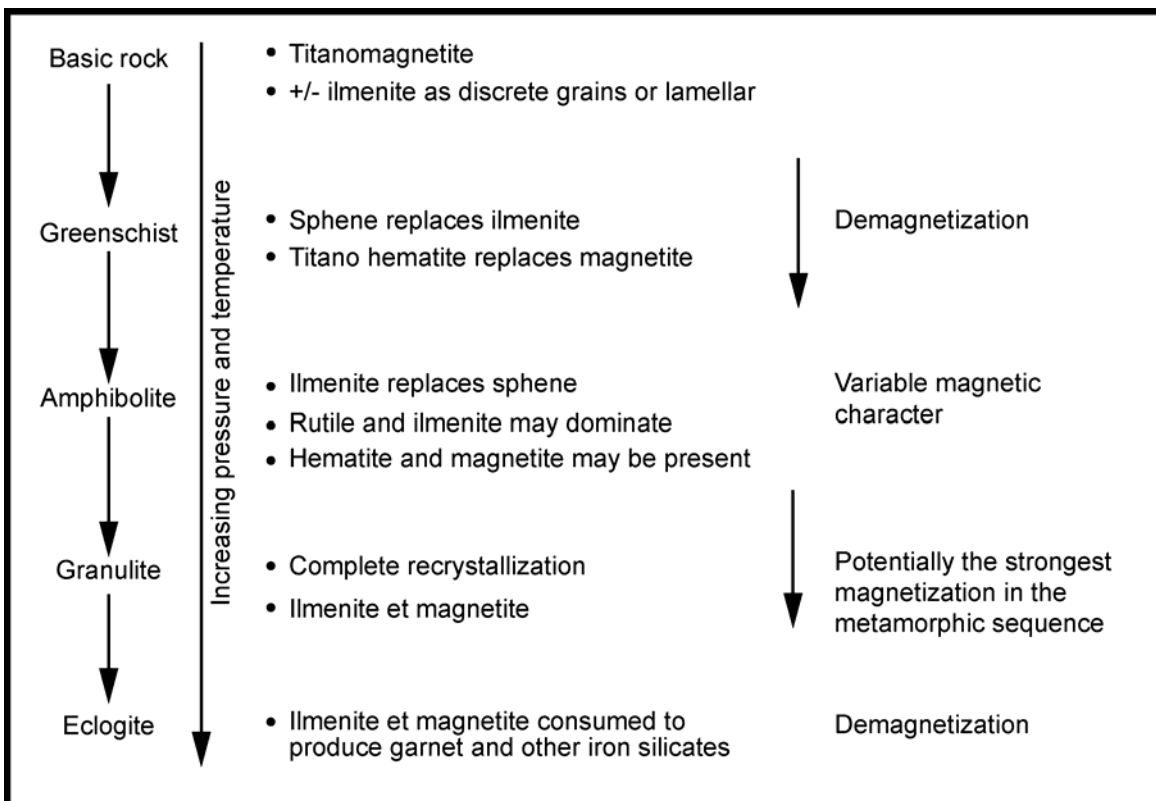


Figure 11 : The effects of metamorphism on a rock's magnetic signature depend on its original iron content (mafic vs. felsic for igneous rocks) and on the fugacity of oxygen, which controls the amount of iron going into silicates vs. oxides. This figure shows the effect of progressively higher metamorphic grades on a rock. Greenschist facies rocks and eclogites can have a low magnetism, whereas granulites have the highest levels. Amphibolite-grade rocks have a variable magnetic signature. [Return to the text.](#)

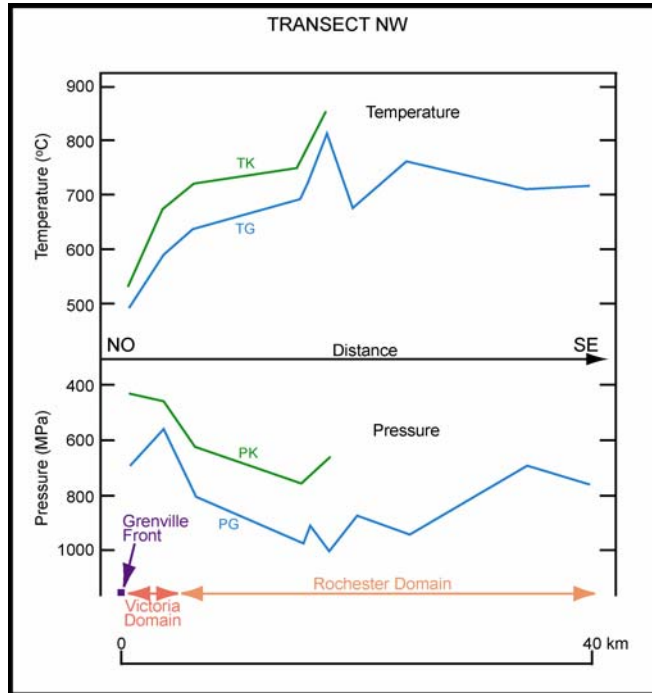


Figure 12 : Metamorphic section in the Grenville Province, along highway 117 (oriented NW-SE, see figure 13 for location), between the Grenville Front and the granulite terrains. Modified from Indarès and Martignole (1989). TK/PK = kenorean temperatures/pressures; TG/PG = grenvillian temperatures/pressures. As can be expected, there is a general increase in temperatures (top) and metamorphic pressures (bottom) away from the Grenville Front, toward the granulite terrains. [Return to the text.](#)

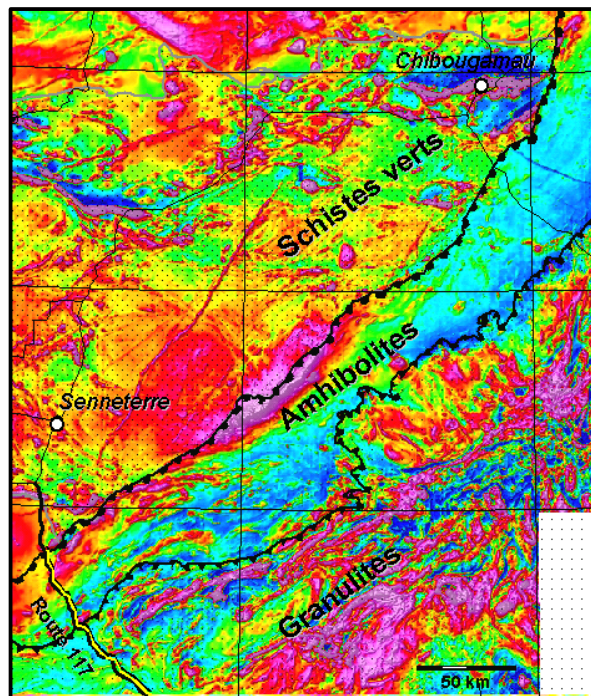


Figure 13 : Total magnetic field map, showing the signature of the different metamorphic domains (*schiste vert* = greenschist). The yellow line depicts Indarès and Martignole's section along highway 117 (figure 12). [Return to the text.](#)

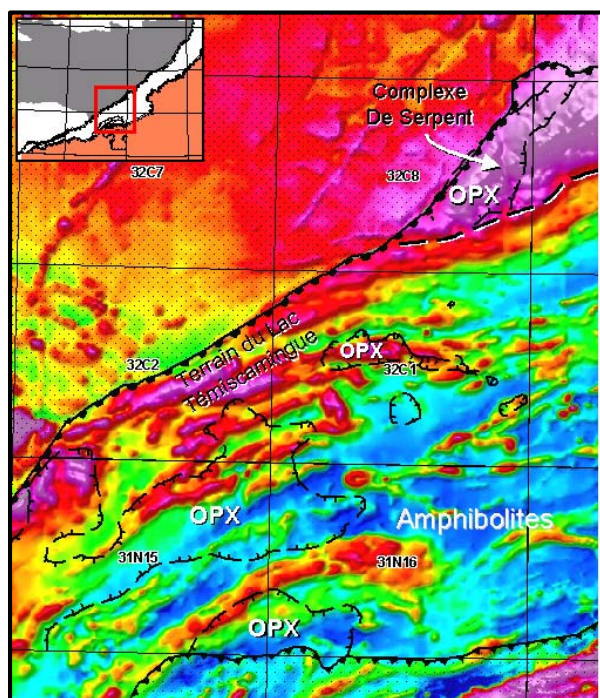


Figure 14

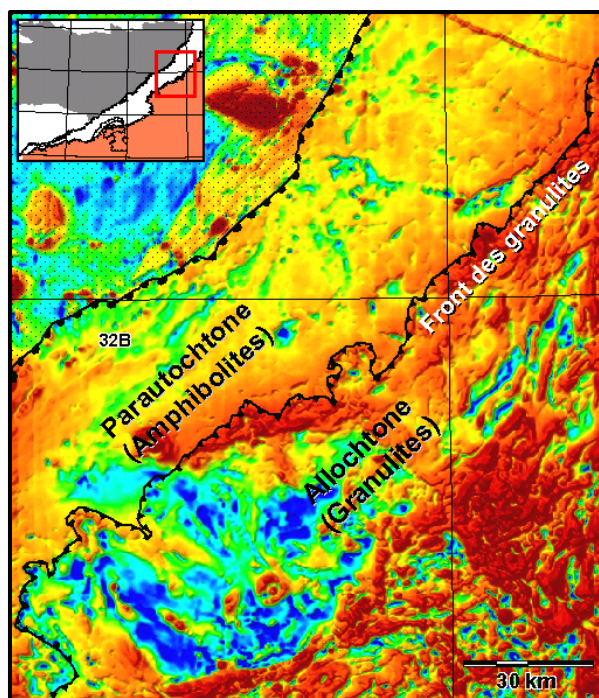


Figure 15

Figure 14 (left): In detail, the relationship between the magnetic response of the parautochthonous belt and metamorphism is not direct because the history of this area is complex. This example shows the total magnetic field in the parautochthonous belt east of Val d'Or, with superimposed metamorphic isograds (Girard and Moorhead, 1994). OPX designates OPX-bearing granulites; no obvious relationship exists between metamorphic grade and magnetic signature here. Theoretically, granulite-facies rocks should display a strong magnetic response (e.g., figure 13). The thin black lines are limits of 1:50,000 sheets. [Return to the text.](#)

Figure 15 (right): The Granulite Front marks the limit between the parautochthonous belt and the allochthonous belt. This lithotectonic boundary appears clearly on the map of the analytic signal (vertical integration of the magnetic field). This particular geophysical filter enhances the contrast in regions of low magnetic relief. The upper amphibolite-grade parautochthonous belt forms a homogenous plateau, whereas the granulite-grade allochthonous belt shows pronounced magnetic relief. [Return to the text.](#)

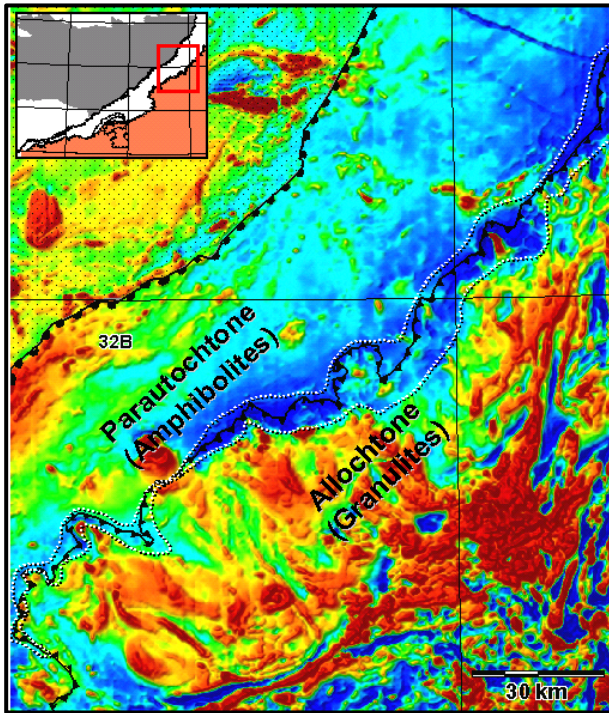


Figure 16

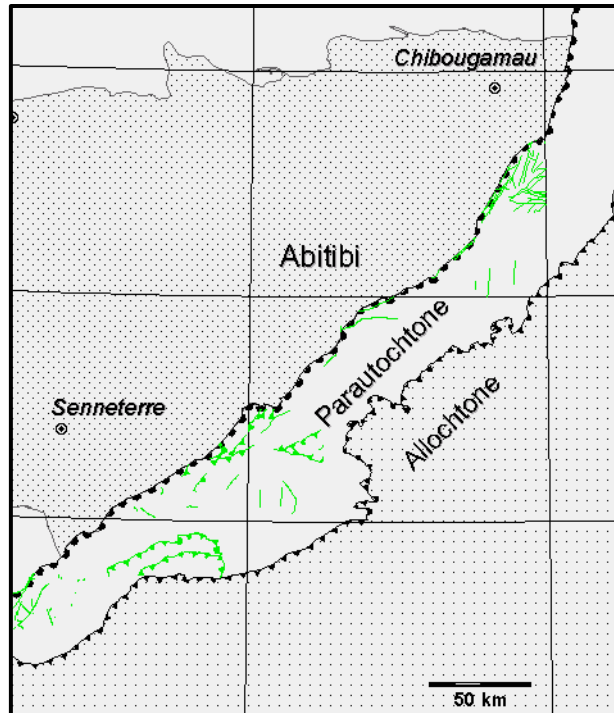


Figure 17

Figure 16 (left): Applying a low-pass filter (at 1 km) on the magnetic data reveals a demagnetised zone (dotted white outline) several kilometres wide along the Granulite Front. This could imply retro-metamorphism back to amphibolite grade, and/or the presence of a gently dipping thrust fault with a SE dip. [Return to the text.](#)

Figure 17 (right) : The identification of faults is important to reconstruct the structural/tectonic history of the study area, but is made even more important given the fact that faults are the main exploration guide to locate hypozonal gold deposits in high-grade metamorphic terrains. The second important aim of this study is therefore to interpret geophysical lineaments. This figure shows the faults displayed on 1:50,000 provincial geologic maps (SIGEOM). Most of these are brittle or ductile-brittle faults. [Return to the text.](#)

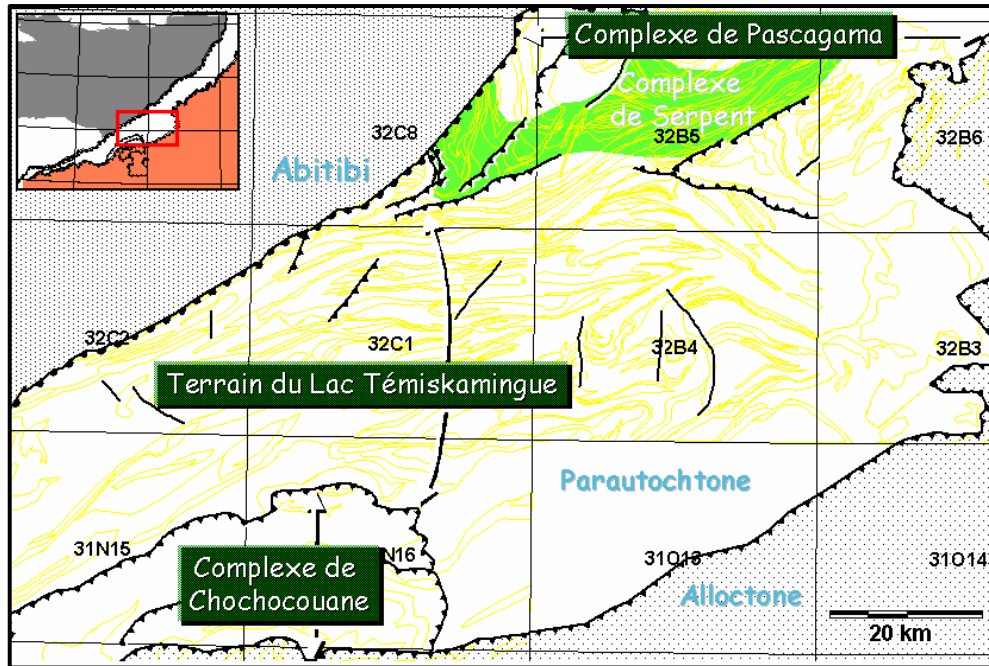


Figure 18 : Geologic map east of Senneterre showing geologic contacts (yellow lines), mapped and interpreted faults (black lines), and the main lithotectonic domains as defined by Girard and Moorhead (1994). [Return to the text.](#)

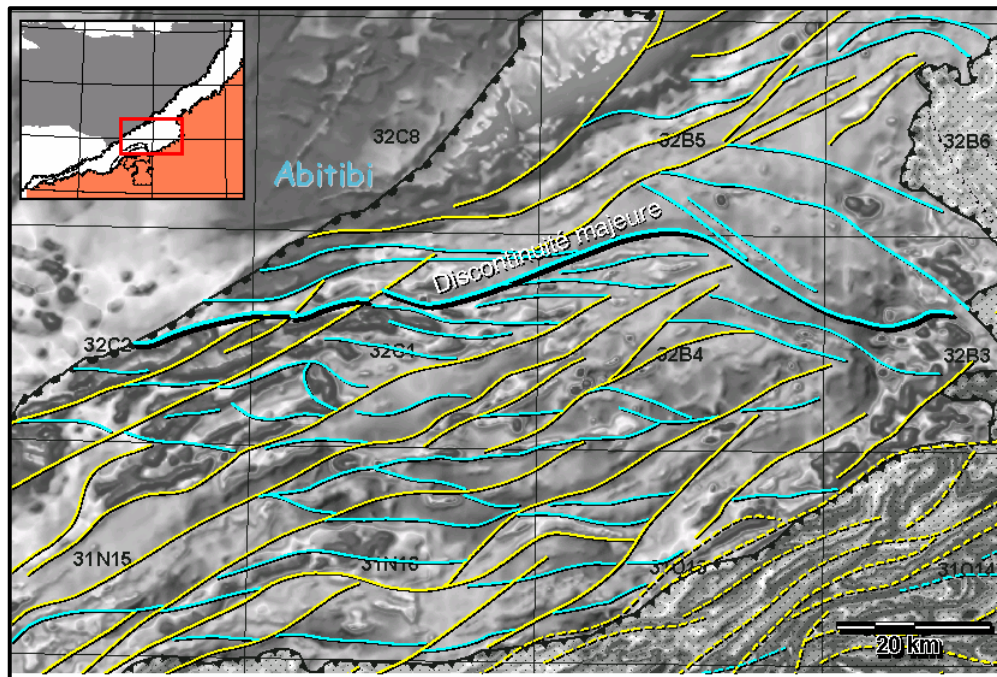


Figure 19 : Map of the same area than figure 18, showing geophysical lineaments. Background image is the total magnetic field in greyscale version. E-W lineaments (cyan lines) are generally shorter and wavier relative to NE-trending lineaments (yellow lines), which are longer and straighter. The NE lineaments offset the E-W ones. A major discontinuity, crossing the entire lac Témiskamingue terrain, is interpreted here. It is 110 km-long and separates a magnetically homogeneous domain, to the north, from a more contrasted domain, to the south. It corresponds to a 1-2 km-wide demagnetized zone, and it could imply hydrothermal alteration and ductile deformation. [Return to the text.](#)

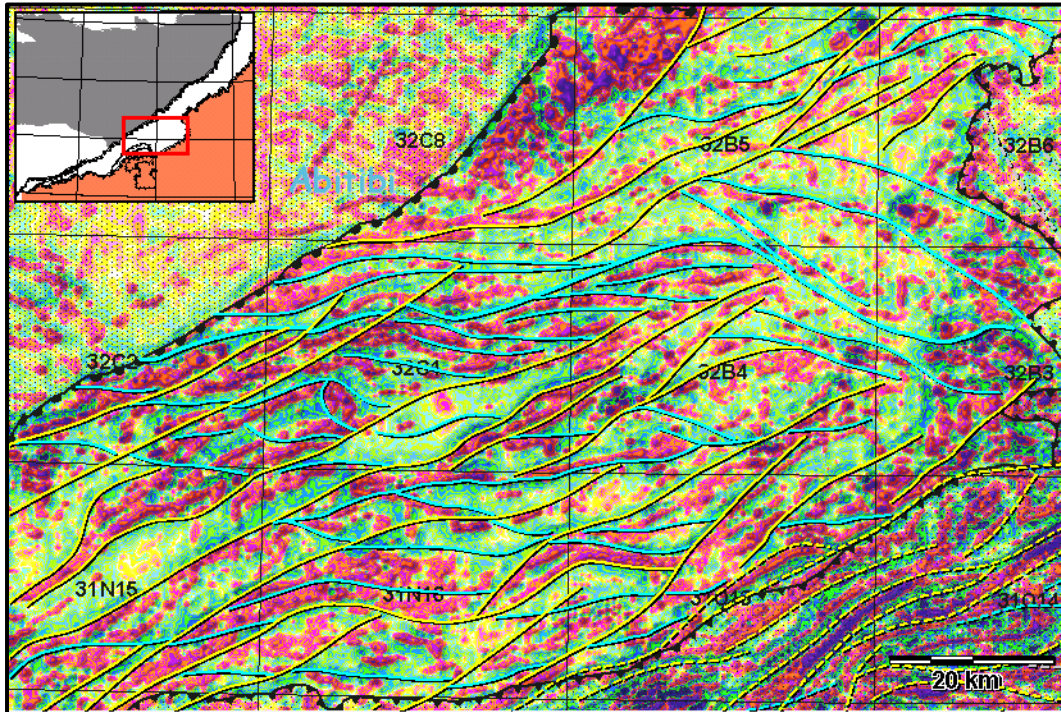


Figure 20 : Same map as figure 19 but with the first derivative of the magnetic field as the background image. [Return to the text.](#)

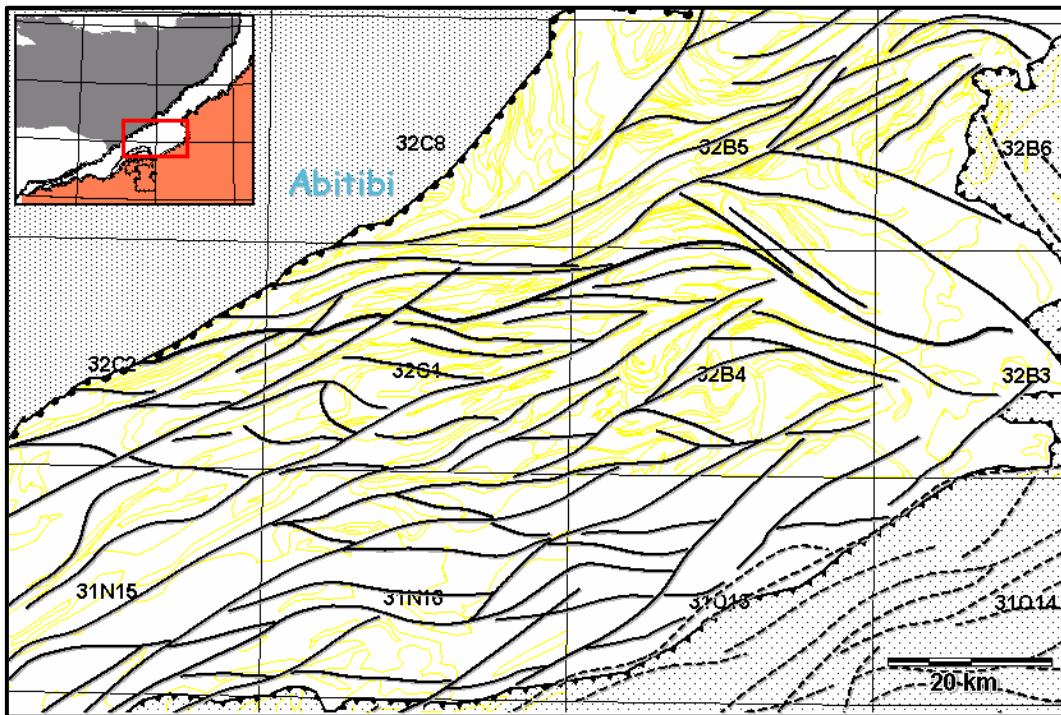


Figure 21 : The entire set of geophysical lineaments in the parautochthonous belt is coherent and seems to define a network of anastomosing faults. Yellow lines are geological contacts, after Girard and Moorhead (1994). [Return to the text.](#)

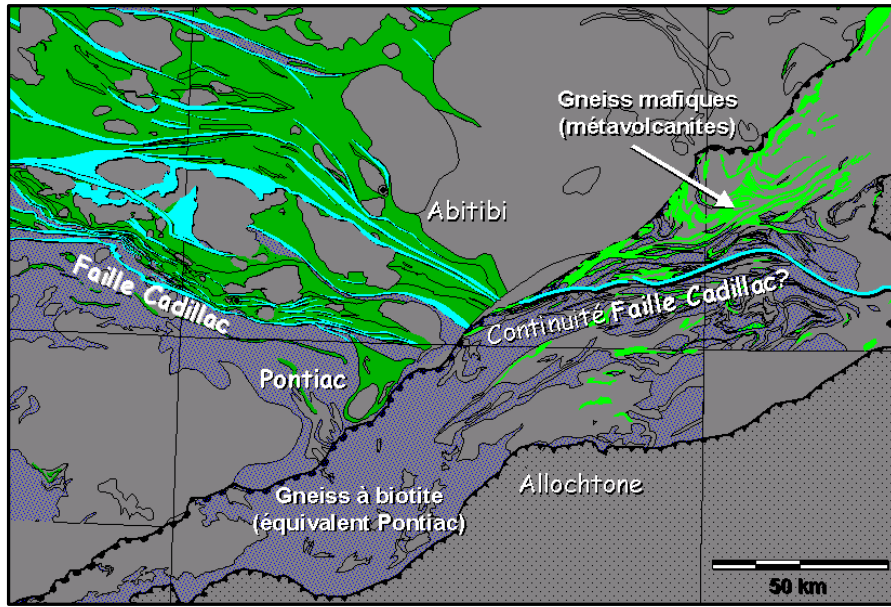


Figure 22 : It has been suggested in previous studies that the Lac Témiscamingue terrain in the Grenville Province is the equivalent of Pontiac subprovince metasedimentary rocks, whereas the Complexe de Serpent is the equivalent of volcanic formations (dark green) in the southern Abitibi subprovince. In the Superior Province, the Pontiac and Abitibi subprovinces are separated by a major discontinuity, the Cadillac-Larder Lake fault. No direct equivalent of this structure had been proposed in the Grenville thus far, but the aforementioned major E-W geophysical lineament is a candidate. It would represent the root of the Cadillac fault, in the same way that the roots of greenstone belts are exposed in the parautochthonous belt. Abitibi geology after Daigneault's compilation; Grenville geology after Goutier and Melançon (*in prep*). [Return to the text.](#)

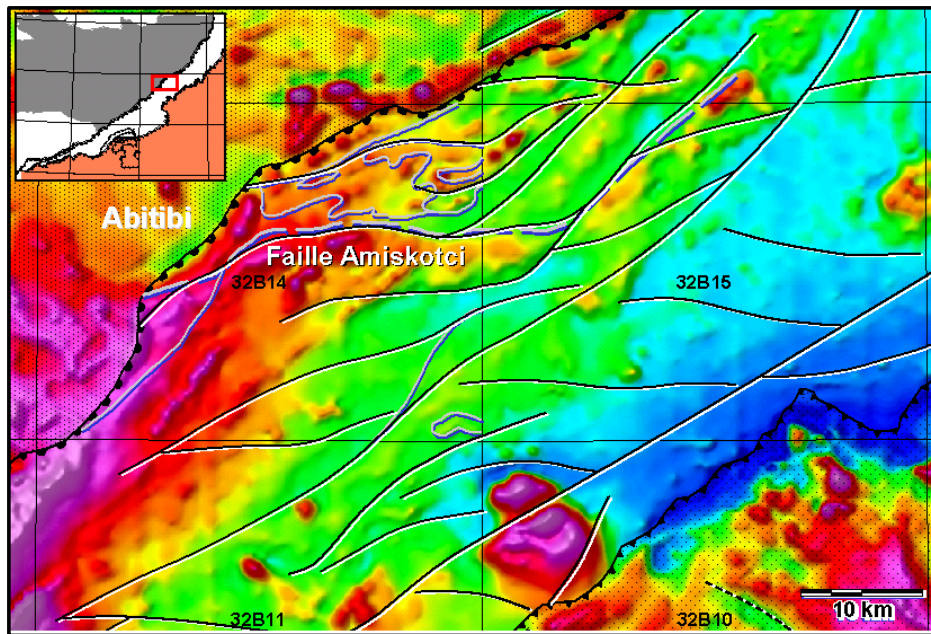


Figure 23 : Some geophysical lineaments correspond to field-determined faults. Between Senneterre and Chibougamau (sheet 32B14), ductile faults mapped by Bandyayera et al. (2004) (grey lines with blue shadows) correlate with drag lineaments (black lines with white shadows). Geophysical lineaments are interpreted here using the total magnetic field. [Return to the text.](#)

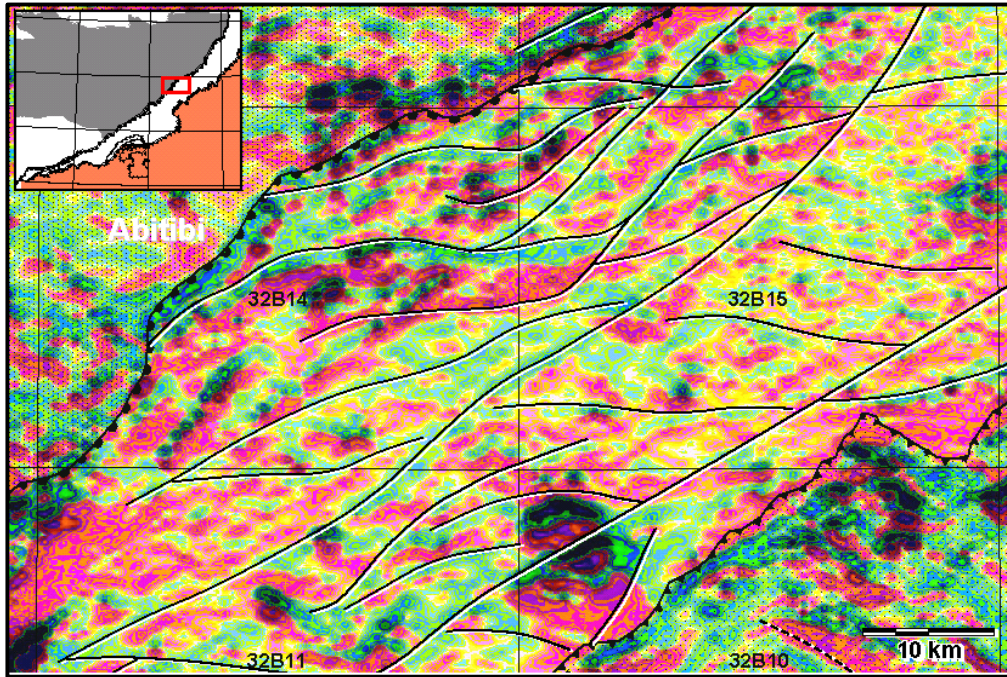


Figure 24 : Same area as figure 23, but with lineaments (black lines with white shadows) interpreted using the first horizontal derivative of the magnetic field (N-S direction). Note the strong magnetic expression of the nepheline syenite intrusion in the NW corner of sheet 32B10 (Laurin, 1965). The syenite cross-cuts a curved lineament running ENE but is itself cross-cut by a straight NE-oriented lineament. [Return to the text.](#)

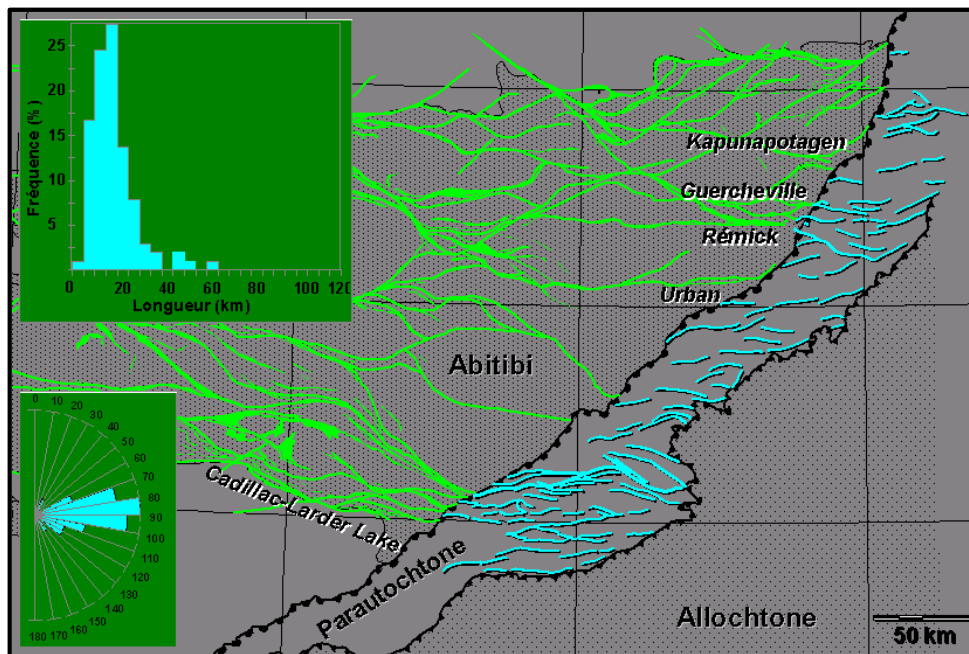


Figure 25 : Compilation of Archean geophysical lineaments (cyan lines) in the parautochthonous belt, with a histogram of their lengths and a rose diagram of their directions. These E-W and ENE lineaments are generally undulating, have average lengths of 10-20 km, and several of them can be interpreted as the continuity of major faults in the Abitibi subprovince (including the Cadillac, Rémick, Guercheville and Kapunapotagen faults), offset along the Grenville Front. Distribution of faults in the Abitibi (green lines) after Daigneault. [Return to the text.](#)

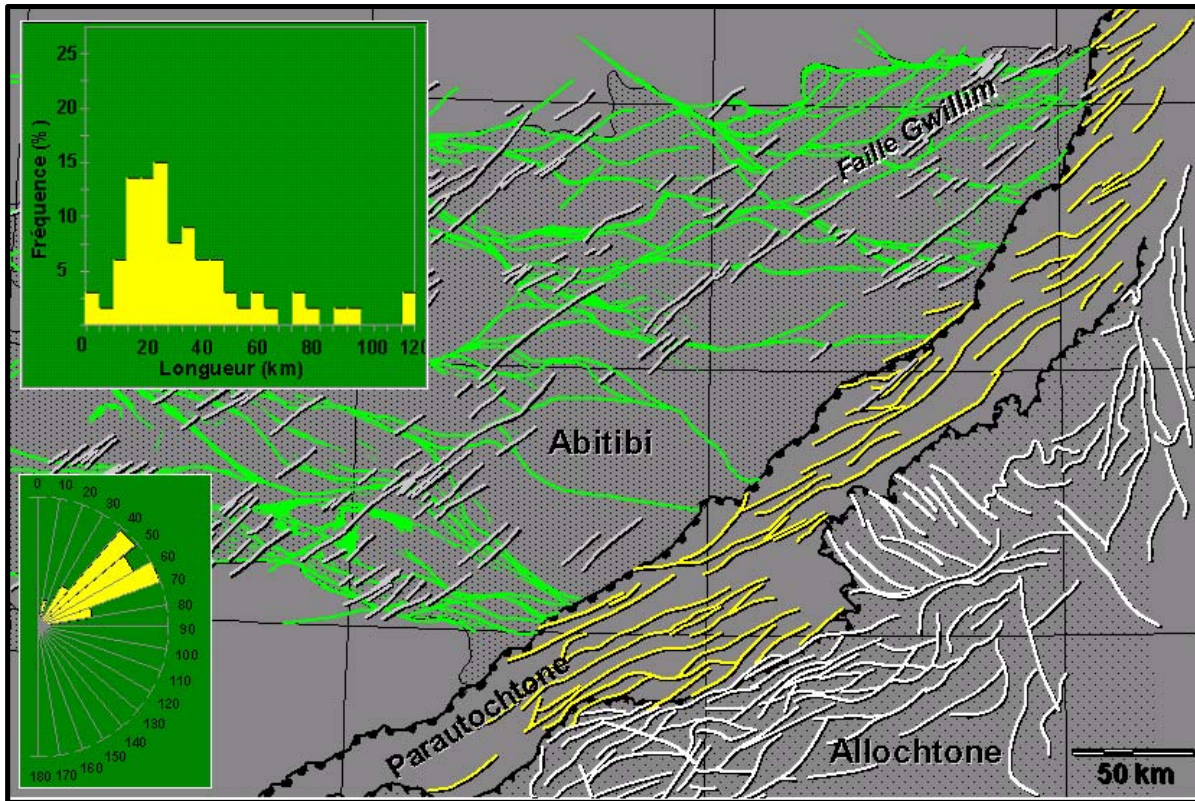


Figure 26 : Compilation of Proterozoic geophysical lineaments (yellow lines) in the parautochthonous belt, with a histogram of their lengths and a rose diagram of their directions. These lineaments are longer than the Archean lineaments in the same belt, with an average length between 15 and 40 km; they are also straighter and run parallel to the Grenville Front except in the area east of Chibougamau. Note the correspondence with the NE-striking lineaments interpreted for the Abitibi (grey lines, after Faure, 2001). Distribution of faults in the Abitibi (green lines) after Daigneault. White lines are geophysical lineaments in the allochthonous belt, a region of greater structural complexity. [Return to the text.](#)

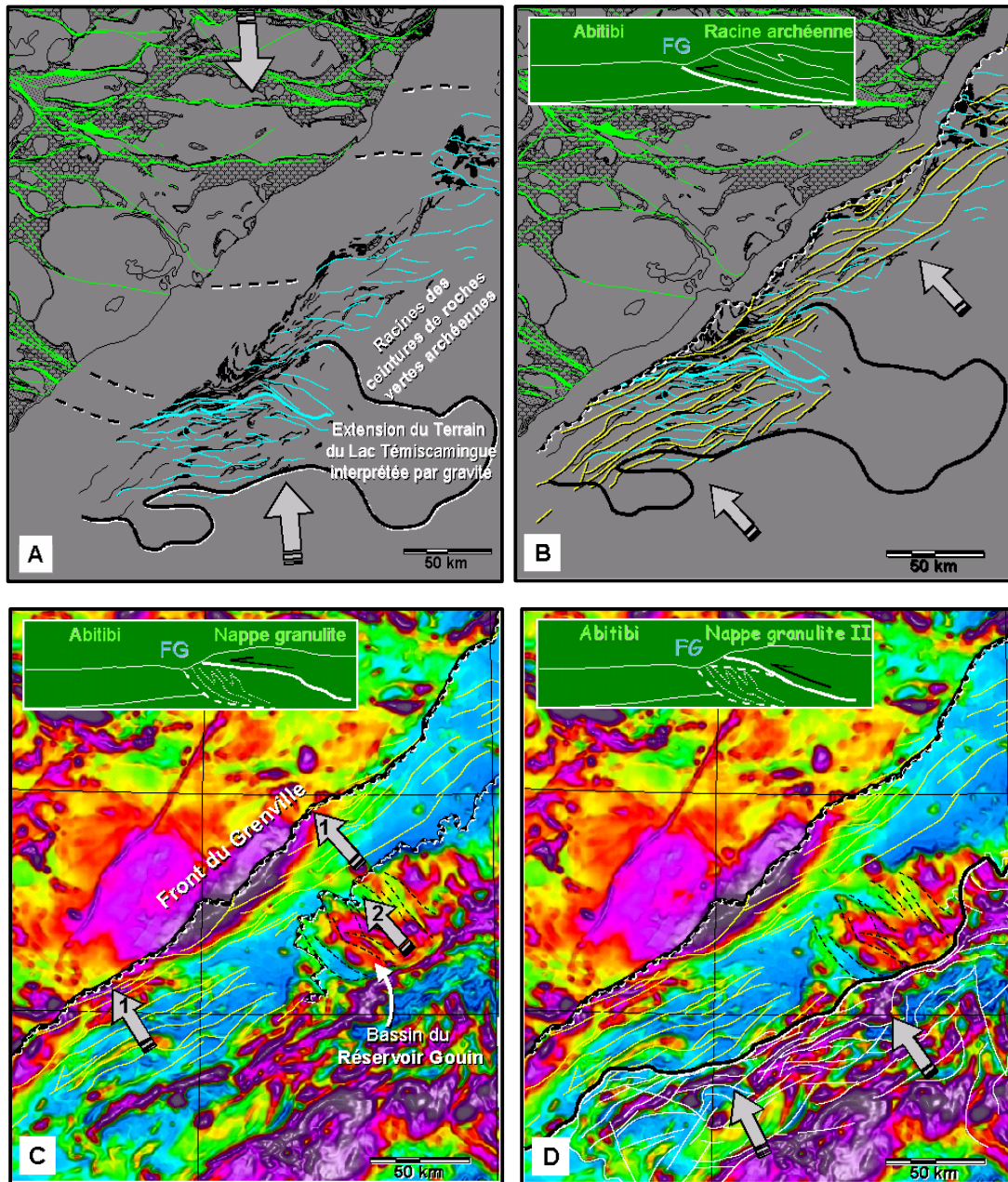


Figure 27 : From the relative chronology of the E-W and NE drag lineaments and the geophysical data available, the following tectonic interpretation can be offered. (A) The bulk of the Archean terrains, including those located east of the present-day Grenville Front, are deformed by the Kenorean orogeny at ~2.8 Ga; regional N-S compression produces the E-W deformation corridors. Rocks on either side of the present-day Front are at the same structural level (greenschist facies). The extension of the Lac Témiscamingue terrain is shown by the bold black line with a white shadow. (B) During the early Grenvillian Orogeny (~1.4 Ga), the roots of the E-W faults and of the greenstone belts are thrust toward the NW along a major structure which will eventually become the Grenville Front (FG on the structural cartoons). (C) Frontal thrusting continues until the Grenville Front assumes its current position. Afterwards, the active structural front moves to the SE and granulite slices are pushed on top of the parautochthonous belt along the Granulite Front. (D) The final emplacement of granulite tectonic slices takes place toward the end of the Grenvillian Orogeny (~1.0 Ga). Figures (C) and (D) show the magnetic field projected to a height of 1 km. [Return to the text.](#)

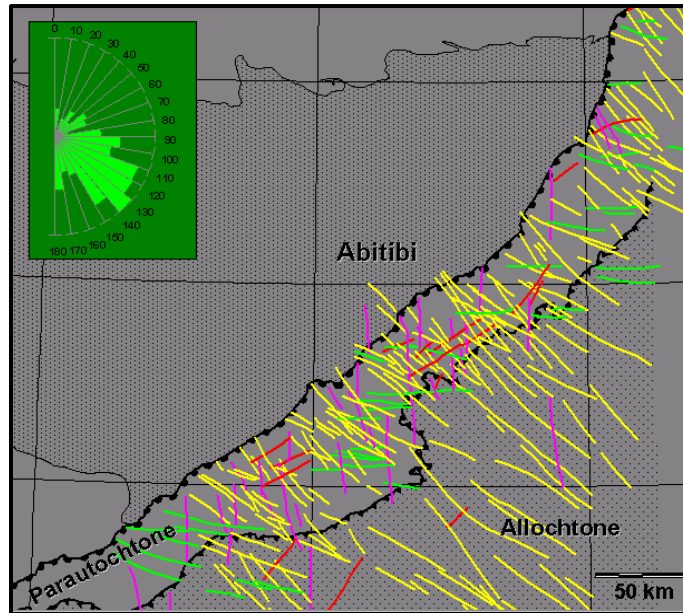


Figure 28 : Sharp geophysical lineaments SE of the Grenville Front. Most of these 260 lineaments are perpendicular to the Front and some have a topographic expression. Their average length is 30 km but some reach 100 km. Several lineaments cut the allochthonous-parautochthonous boundary and a few cross-cut the Grenville Front. Therefore, they are interpreted as post-Grenvillian. [Return to the text.](#)

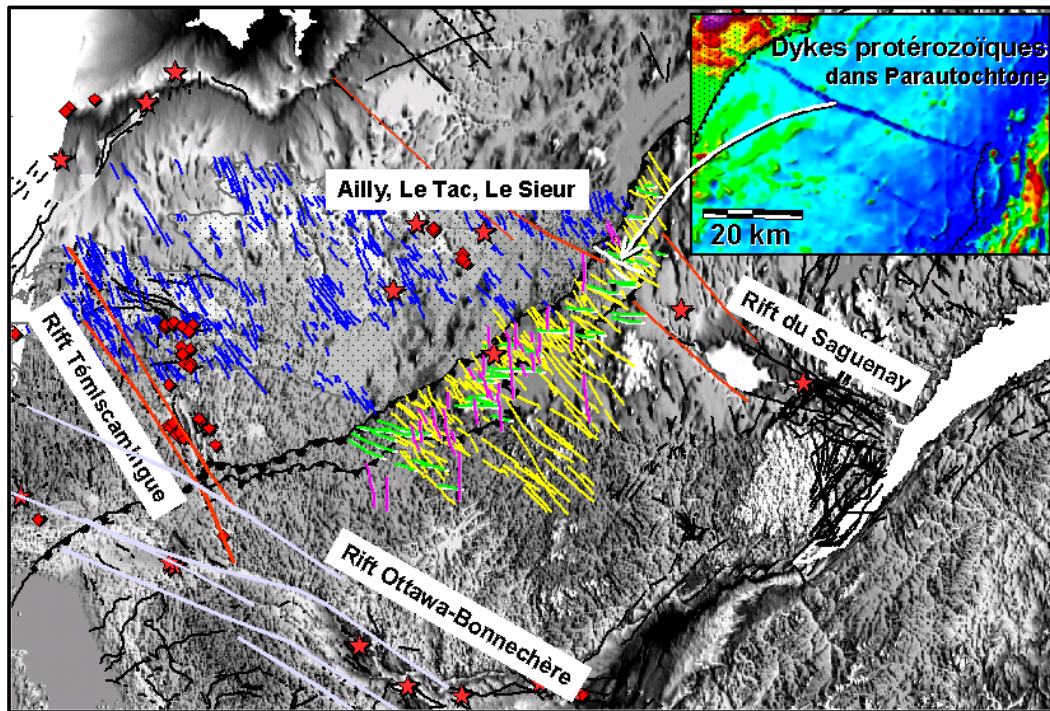


Figure 29 : SE-trending sharp geophysical lineaments in the Grenville province (yellow lines) can be correlated with the late Proterozoic to early Cambrian Saguenay and Témiscamingue aborted rifts. The sharp geophysical lineaments are interpreted as brittle faults with movements of a few hundred metres. Background image is a digital elevation model; red diamonds are kimberlite occurrences; red stars mean alkaline magmatism / carbonatites; blue lines are geophysical lineaments in the Abitibi after Faure (2001). The inset map shows the magnetic signature of two Proterozoic dikes in the parautochthonous belt. [Return to the text.](#)

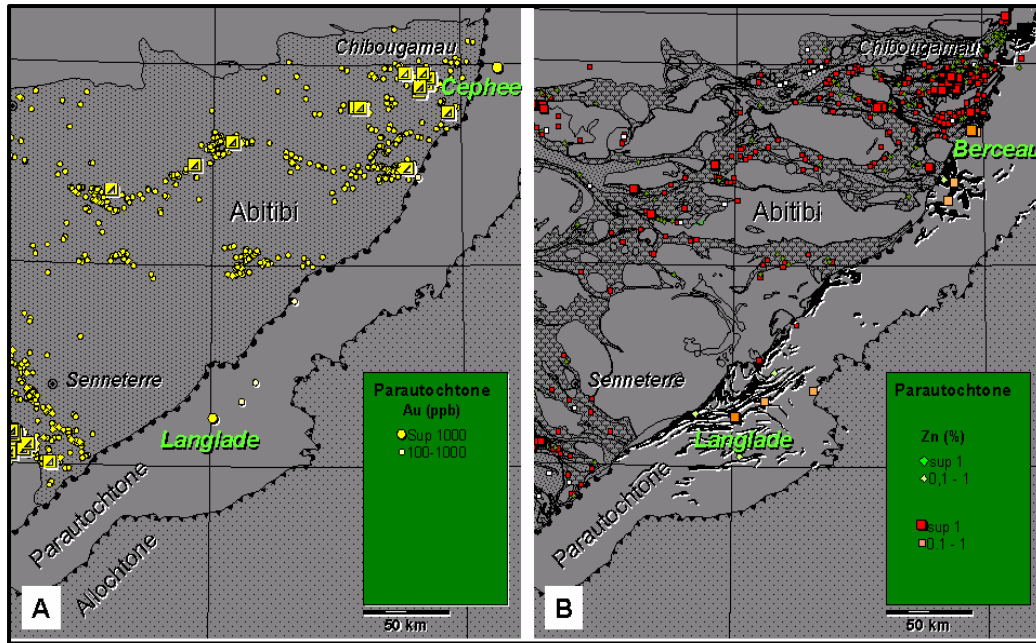


Figure 30 : Very few mineralized occurrences have been discovered in the parautochthonous belt, although the rocks belonging to this lithotectonic domain are similar in age and composition to those of the Abitibi subprovince. Known mineralization is even scarcer in the allochthonous belt. This figure shows the location of (A) gold showings and deposits (yellow circles) and gold mines (yellow squares); and (B) base metal showings and deposits (squares) and base metal mines (red squares with shading). Mineralization data from SIGEOM. In the parautochthonous belt, black units are mafic gneisses and amphibolites; these serve as metallotects at the regional scale, for both gold and base metal exploration. [Return to the text.](#)

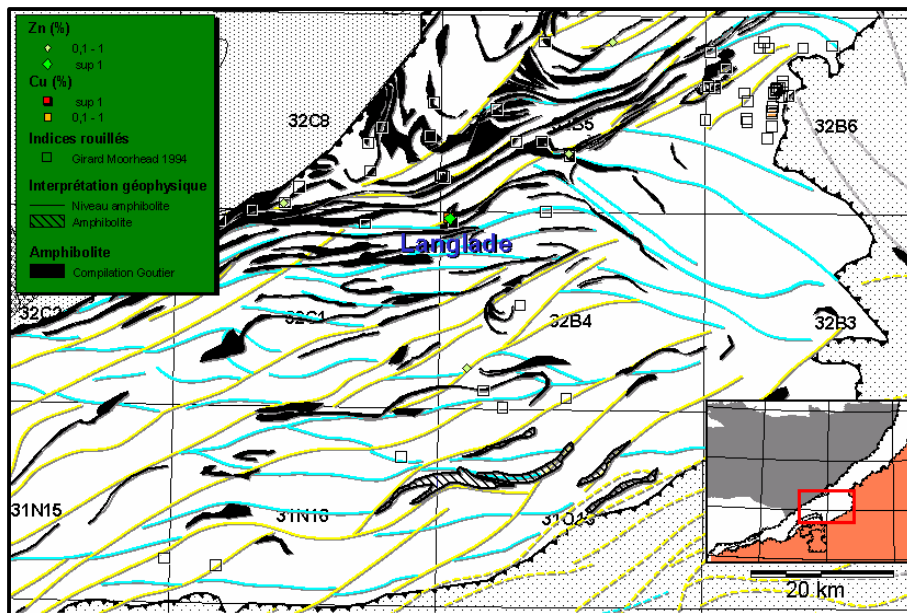


Figure 31 : Map showing the distribution of Cu-Zn showings and rusted areas in the parautochthonous belt east of Senneterre. Mafic gneisses and amphibolites appear in black whereas drag lineaments are shown in yellow and cyan. The Langlade deposit is perhaps the best example of base metal mineralization in the Lac Témiscamingue terrain. Sulphide lenses (pyrrhotite, pyrite, sphalerite, chalcopyrite, galena and gahnite) are found at the contact between quartzofeldspathic gneisses (felsic rocks) and mafic rocks. The region shown here shows the best potential for base metal exploration because the amount of mafic lithologies is maximal in this area of the parautochthonous belt. [Return to the text.](#)

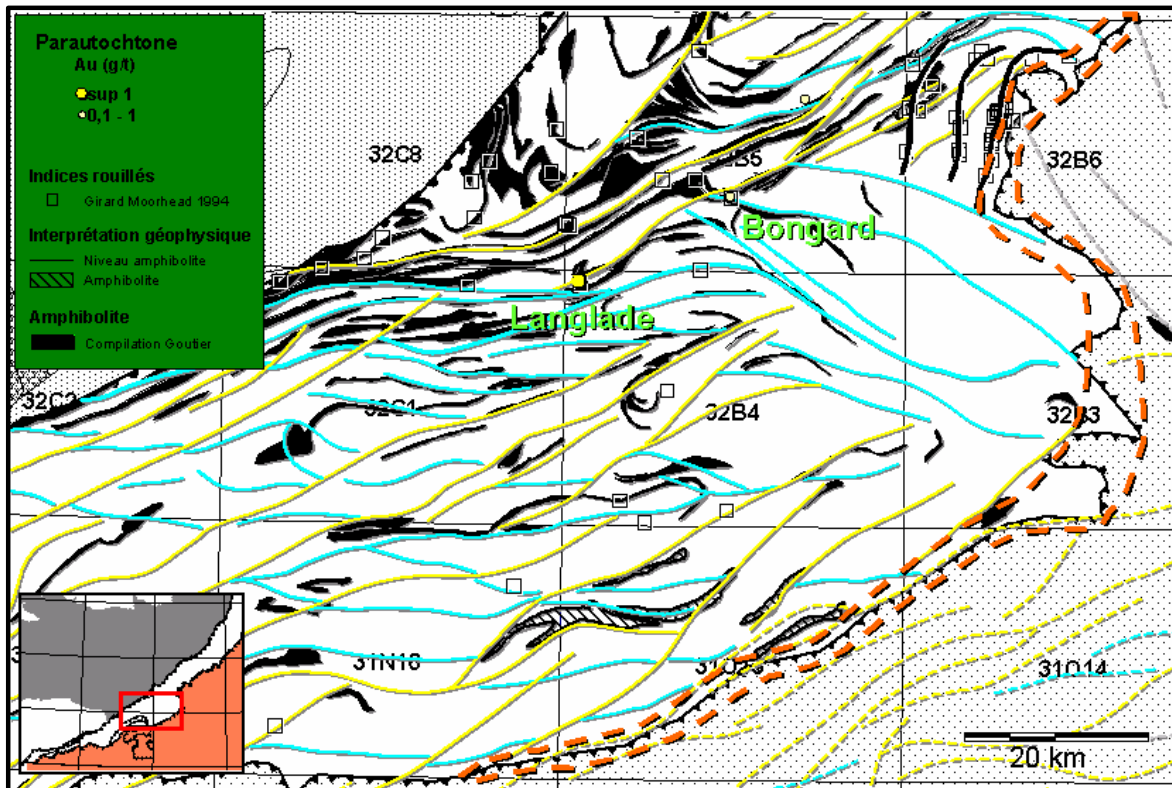


Figure 32 : Same map as figure 31, but with an emphasis on the allochthonous belt east of Senneterre and on gold mineralisation. There appears to be a correlation between gold showings/deposits (yellow dots), rusty outcrops (open squares) and geophysical lineaments. If the major E-W lineament discussed in figures 19 and 22 is indeed the extension of the Cadillac fault, this would make it a prime exploration target. In fact, the whole demagnetized zone surrounding it offers a good potential. Second and third-order structures would also represent good targets. E-W geophysical lineaments, interpreted as ductile Archean faults, could host deformed volcanogenic mineralization (cf. Doyon-Bousquet-La Ronde in the Abitibi), whereas NE-trending lineaments, interpreted as Proterozoic faults, could be associated with remobilised metals and structurally-controlled ores. Some rusty outcrops in sheet 32B5 (upper-right part of figure) are aligned along the Granulite Front. This parautochthonous-allochthonous limit is prospective for gold because the movement of metamorphic fluids and metal remobilisation are favoured along major faults. [Return to the text.](#)

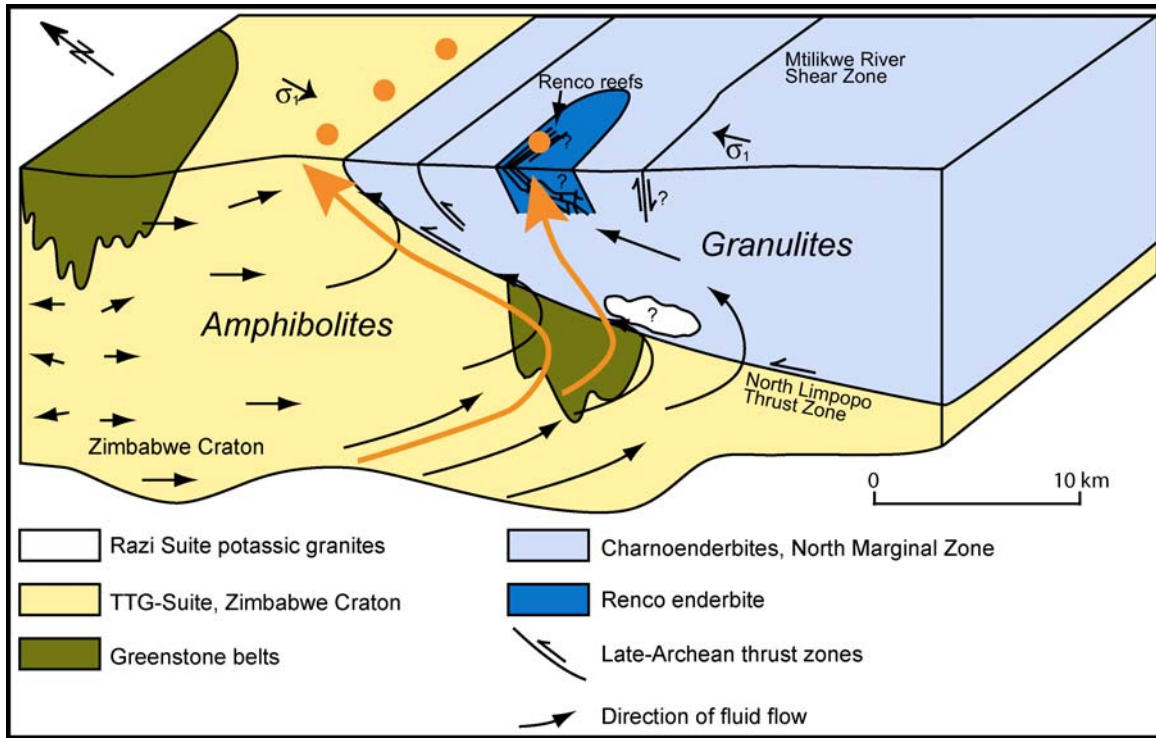


Figure 33 : Model of mineralization emplacement at the Renco Mine (Zimbabwe). A hot granulite slice is thrust upon a cooler Archean block containing greenstone belts. This favours the development of a mixed retrograde metamorphic zone and rehydration at the base of the thrust. Fluid circulation as a result of the thermal contrast mobilizes metals from the Archean greenstone belts. Orange arrows indicate a hypothetical fluid circulation at the front of the slice or within competent units. Modified from <http://www.iml.rwth-aachen.de/projekte/enrencon.htm>. Such a model could apply to the Granulite Front area of the Grenville Province. [Return to the text.](#)