



RAPPORT FINAL

2006

Sous-projet SC 15

## Signatures géophysiques des intrusions kimberlitiques au Québec

Par

Michel Chouteau et Benoît Tournerie

École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, Succ. Centre-Ville, Montréal Québec, H3C 3A7

Soumis à l'administration de DIVEX  
juillet 2006 – Montréal

## RÉSUMÉ

On assiste ces dernières années à une intense activité d'exploration pour le diamant au Québec, motivé en outre par les récents résultats obtenus par Asthion Mining/SOQUEM aux Monts Otish, mais aussi par les récentes découvertes dans les autres provinces et territoires du Canada. Les structures favorables recherchées sont les intrusions kimberlitiques, mais elles ont souvent des dimensions relativement faibles (quelques hectares), et sont souvent érodées et/ou altérées. Trouver des kimberlites, et plus encore des kimberlites diamantifères économiquement viables, est alors très difficile. La stratégie d'exploration des kimberlites consiste normalement en un échantillonnage de sol pour les minéraux indicateurs suivi des méthodes géophysiques et de forage. Les anomalies géophysiques associées aux kimberlites varient en amplitude et en polarité et il est donc difficile d'en tirer des règles d'application dans tous les terrains. De manière générale, il n'existe pas de recette miracle pour découvrir les structures kimberlitiques. Il faut adapter les méthodes au contexte particulier d'une région géologique.

Le présent projet avait pour objectif de déterminer les signatures géophysiques associées aux kimberlites afin d'aider les compagnies d'exploration dans la recherche de diamants au Québec. Le premier volet a consisté en une recherche des documents (articles, rapports) décrivant les propriétés physiques et les signatures géophysiques mesurées sur des kimberlites connues au Québec, au Canada et dans le reste du monde. L'objectif était de caractériser certaines similitudes et différences entre les réponses géophysiques, les propriétés physiques et les paramètres caractérisant les kimberlites, tels que l'âge, le contexte géologique, son niveau d'érosion, sa minéralogie, etc. Les premières analyses ont montré une relative uniformité des anomalies gravimétriques (souvent négatives), cependant très dépendante du contexte géologique, du faciès (cratère, diatrème ou hypabyssal) et du bruit dans les données (topographie, structures superficielles). Les méthodes magnétiques et électromagnétiques sont les méthodes les plus utilisées. L'étude montre qu'il existe souvent une coïncidence d'anomalies au dessus des kimberlites. Cependant, les sources de ces anomalies ne semblent pas identiques. Ceci pourrait expliquer les variations observées dans la forme et l'intensité des anomalies magnétiques et EM d'une kimberlite à une autre, ainsi que la présence ou l'absence d'une ou de l'autre anomalie. Le second volet de l'étude visait à caractériser plus précisément les propriétés physiques des kimberlites en réalisant des mesures directes de densité, de susceptibilité magnétique et de conductivité électrique (méthode EM) sur des échantillons de roches kimberlitiques. Ces mesures pourraient alors permettre de les utiliser comme contraintes dans l'analyse et l'inversion de données géophysiques (troisième volet du projet) mesurées au sol ou aéroportées. Elles permettraient donc d'obtenir une meilleure évaluation de la géométrie, et donc du volume, des intrusions kimberlitiques. Ceci est indispensable si l'on désire évaluer économiquement une intrusion kimberlitique, moyennant une bonne estimation des concentrations en diamant des kimberlites. L'accès à des collections et échantillons a été difficile. Seuls des collections de collègues universitaires ont pu être accessibles ; les compagnies actives dans l'exploration des diamants n'ont pas donné suite à nos requêtes d'échantillons.

Les mesures ont été réalisées pendant l'été et l'automne 2005. Les résultats ont permis d'établir une base de données (sous Excel de Microsoft) des propriétés des kimberlites pour lesquels les échantillons étaient accessibles. Une analyse préliminaire des résultats semblent montrer certaines tendances des propriétés en fonction de l'âge ou de la position géographique.

La rémanence magnétique est une propriété très importante, surtout dans les kimberlites, dont il faut tenir compte pour l'interprétation magnétique des anomalies associées. De plus, on a noté en plusieurs endroits du monde, que l'âge de la mise en place d'une kimberlite était de grande importance pour le potentiel économique (voir Lockhart et al, 2004). Comme il y a une relation entre l'âge et la polarisation du champ magnétique terrestre au temps de la mise en place, la mesure de la direction de rémanence permettrait de dater (ou du moins de discriminer) les structures kimberlitiques. Comme la mesure de la rémanence est longue et laborieuse, on a développé une méthode d'interprétation qui permet d'extraire le vecteur aimantation totale et, avec quelques informations indépendantes, l'aimantation rémanente des données magnétiques au sol ou aéroportées. Un code a été écrit et une présentation a été faite lors du Congrès Annuel GAC-MAC 2006 à Montréal en mai dernier. On présente deux applications sur les cheminées kimberlitiques Peddie et Lapointe dans le Témiscamingue (Ontario).

## INTRODUCTION

L'exploration diamantifère dans le monde s'est développée autour de régions très particulières associées aux anciens cratons Archéens. Ces grandes régions sont entre autre l'Afrique du Sud et Centrale, la Russie, l'Australie et l'Inde. Au Canada, la région la plus fertile en découvertes est sans aucun doute les Territoires du Nord Ouest (TNO), mais de nombreuses études sont également réalisées dans les autres provinces (Saskatchewan, Ontario). Au Québec, l'exploration s'est accentuée ces dernières années avec notamment la découverte de kimberlites diamantifères par Asthion/Soquem dans la zone Foxtrot (Renard). De nombreuses études ont été réalisées au Québec, mais avec encore très peu de succès en terme économique. Le contexte québécois de mise en place des intrusions kimberlitiques semble différent de celui des autres provinces canadiennes (âge, contexte géologique, ...), ce qui pourrait expliquer en partie les insuccès de l'exploration. Augmenter notre connaissance sur les intrusions kimberlitiques connues au Québec, et les comparer avec celles répertoriées au Canada et dans le reste du monde aidera à accroître le potentiel diamantifère du Québec.

D'un point de vue général, l'exploration s'initie avec une campagne de levés géologiques de terrain (cartographie, échantillonnage), incluant l'échantillonnage des minéraux indicateurs dans le till et les sédiments glacio-

fluviatils, suivie de levés géophysiques aéroportés (magnétiques et parfois électromagnétiques). L'objectif est alors de trouver des corrélations entre les indicateurs minéralogiques des kimberlites (*KIM*) et les anomalies géophysiques afin de restreindre la zone d'études, et d'y réaliser des levés géologiques et géophysiques de détail (au sol et aéroporté), ainsi que des forages. Par la suite, et si les forages donnent satisfaction, un modèle 3D des structures est construit à partir de l'information des forages et des résultats de l'analyse des données géophysiques obtenue par l'inversion des données. Les méthodes géophysiques interviennent donc tôt dans le processus de la découverte, et elles jouent un rôle important pour la caractérisation 3D des structures et l'évaluation des volumes.

Cependant, on note que les intrusions kimberlitiques sont généralement de faibles dimensions, typiquement de l'ordre de quelques centaines de mètres de diamètre. Un échantillonnage de haute résolution est donc un premier facteur important dans le processus de la découverte, ce qui renforce l'importance des méthodes géophysiques aéroportées/hélicoptères pour obtenir de l'information sur des grandes régions difficiles d'accès.

De plus, on a noté que les anomalies géophysiques détectées au dessus de kimberlites reconnues peuvent être parfois négatives, parfois positives, et voire même nulle (aucune anomalie n'est identifiée sur le levé). Par exemple, la figure 1 montre un levé magnétique aéroporté en Afrique du sud où les kimberlites K3, K3 et K11, mas pas K6, sont bien identifiées par des anomalies magnétiques, alors que toutes peuvent être associées à une anomalie EM (Macnae, 1979).

À ce titre, les méthodes géophysiques couramment utilisées sont:

<b>Méthode Géophysique</b>	Gravimétrie	EM, Électrique, PP	Magnétométrie
<b>Propriété Physique</b>	Densité	Conductivité électrique, Chargeabilité	Susceptibilité magnétique

Ainsi, associer de manière systématique un type d'anomalie avec une kimberlite, et plus encore avec une kimberlite diamantifère, ou une méthode géophysique avec le succès d'une découverte est très difficile, voire risqué. En fait, il existe plusieurs types d'intrusions kimberlitiques (voir figures 3 et 4) dépendamment entre autre du contexte de mise en place et de la composition

des roches (minéralogie) de l'encaissant et de l'intrusion, du niveau d'érosion et de la géométrie en profondeur des structures, de l'âge de mise en place (polarité de champ magnétique et rémanence). Les anomalies géophysiques, et en particulièrement leur forme et amplitude, seront fortement affectées par ces facteurs.

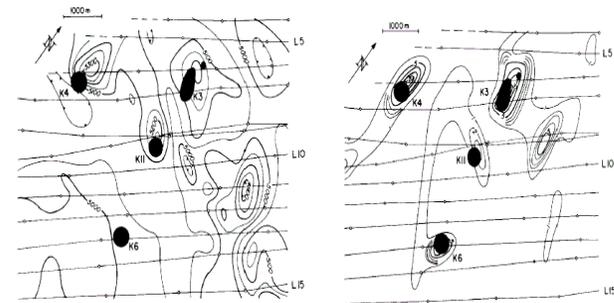


Figure 1 : Levé magnétique (gauche) et levé AEM (droite) Afrique du Sud (Macnae, 1979).

De même, un levé magnétique et un levé GEOTEM à 30Hz (EM aéroporté) réalisés par Fugro dans la région de Fort à la Corne permettent d'identifier clairement 11 kimberlites. Néanmoins, il faut noter que 10 des 11 anomalies EM sont associées à des dépressions de la conductivité (couleur bleue sur la carte) et 1 à une anomalie conductrice (couleur rouge/orange sur la carte).

Mais étudier seulement les réponses géophysique ne semble pas suffisant. En effet, des études statistiques en 2001 ont montrées que sur près de 6400 kimberlites identifiées dans le monde, 14% (928) étaient diamantifères, 4% (264) avaient une concentration supérieure à 3 carat/100t, et, finalement, seulement moins de 1% (48) de ces kimberlites étaient exploitées. Ainsi, trouver des kimberlites n'est donc pas le seul objectif de l'exploration, mais il s'agit plutôt de trouver ou d'identifier des kimberlites avec un fort potentiel diamantifères.

*Connaissant cette diversité de facteurs, notre objectif est de déterminer les signatures géophysiques des structures favorables à l'exploration des diamants, avec pour objectif ultime de développer des outils d'exploration adaptés au contexte québécois.*

## MÉTHODOLOGIE

Pour atteindre notre objectif, nous avons considéré trois volets principaux dans cette étude.

Le premier point a consisté en une recherche bibliographique de documents décrivant la structure et

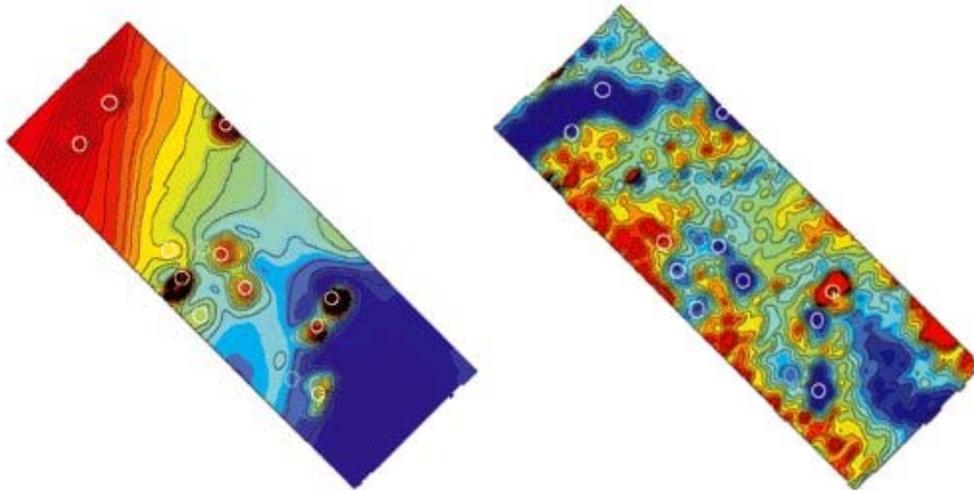


Figure 2 : Carte du champ magnétique total (gauche) et de la conductivité apparente à 30Hz (droite), Fort à la Corne (Fugro Airborne Surveys).

les levés géophysiques sur des intrusions kimberlitiques au Canada, et plus particulièrement au Québec. L'objectif était alors de construire une base de données sur ces kimberlites, décrivant celles-ci sous divers champs tel que l'âge de mise en place, les méthodes géophysiques utilisées et les anomalies associées, le contexte géologique, minéralogie et degré d'altération de la kimberlite, les propriétés physiques de l'encaissant et de l'intrusion, la géométrie de l'intrusion (type, dimension), le niveau de faciès actuel de la kimberlite.

Un second volet de cette étude avait pour objectif de documenter les propriétés physiques des kimberlites au Québec, en vue de les comparer avec les mesures réalisées sur les intrusions au Canada et dans le reste du monde. Par des mesures sur échantillons on a estimé la densité, la conductivité électromagnétique et la susceptibilité magnétique. Ces propriétés seraient intégrées dans la base de données.

Finalement, une interprétation de données géophysiques réelles (aéroportée ou au sol) devait permettre de valider les résultats de cette étude. Les mesures des propriétés physiques, ainsi que les informations géologiques disponibles sur la région d'étude, seraient utilisées afin de contraindre les inversions des données géophysiques. L'objectif était donc d'obtenir plus d'information sur la géométrie en profondeur des kimberlites, dans le but ultime de donner un estimé du volume de la kimberlite afin d'établir un estimé de la valeur économique. De plus, comme il est difficile d'avoir des échantillons orientés pour faire l'étude de la rémanence, composant importante de l'anomalie magnétique des kimberlites et qu'on doit considérer dans l'interprétation, on a développé une approche pour l'estimation de cette rémanence (direction, intensité) à partir de données magnétiques au sol ou aéroportées et des paramètres connus du champ magnétique terrestre actuel (intensité, direction, inclinaison).

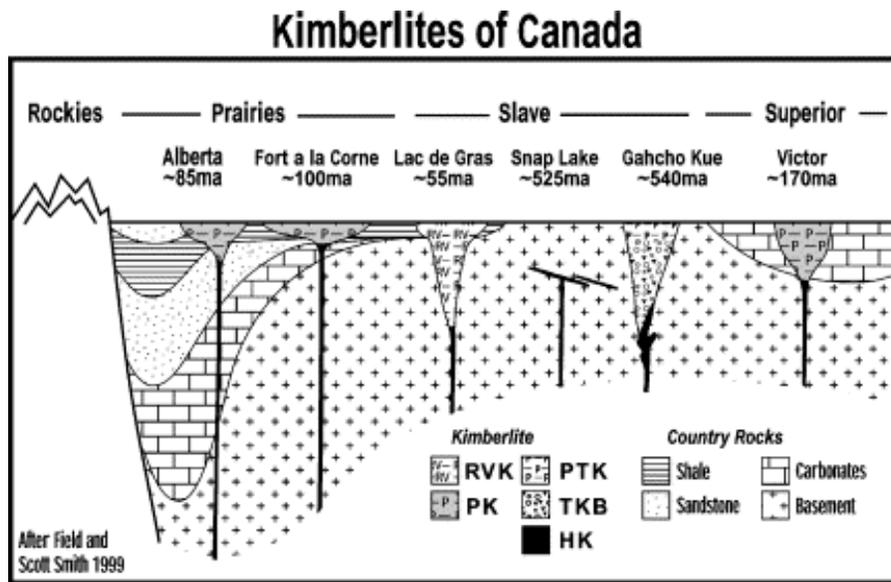


Figure 3 : Variation de contexte de mise en place pour différentes kimberlites au Canada (Webb, 2004).

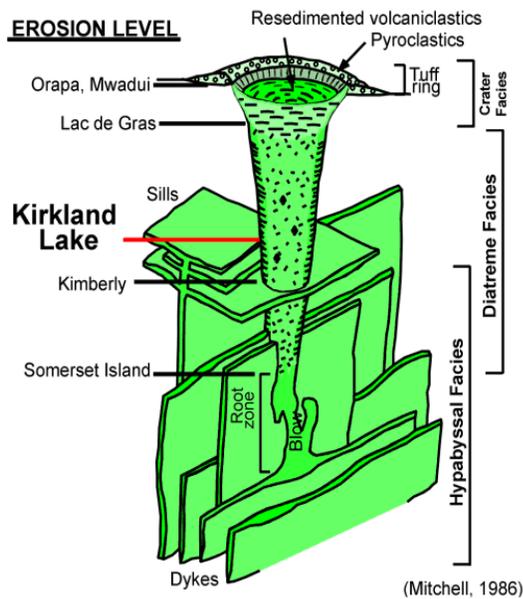


Figure 4 : Schéma générale d'une kimberlite illustrant les différents niveaux d'une kimberlite et la variation de sa géométrie avec la profondeur.

## RÉSULTATS

### Recherche bibliographique :

Les sources analysées pour cette recherche bibliographiques sont multiples. En particulier, ce sont :

- Conférences: International Kimberlite Conference (IKC 1982, 1986, 2003) ; Exploration'97
- Journaux: Lithos: deux numéros spéciaux sur l'IKC 2003: Vol 76 et 77, 2004; Journal of Geochemical Exploration (vol 53, 1995); Exploration Geophysics, Geophysics;
- Livres: Documents gouvernementaux et d'agences gouvernementales: Province du Québec, de la Saskatchewan, de l'Alberta; Commission Géologique du Canada (CGC, « open file », « Current Research »);
- Documents et rapports de compagnies d'exploration (site internet et rapport annuel).

La liste des références pour les kimberlites de la province du Québec est relativement limitée. A titre de comparaison, on a relevé 1 article, 3 résumés de conférences et quelques rapports annuels de compagnies (site internet) décrivant la géologie et des résultats géophysiques pour l'ensemble des kimberlites du Québec alors que l'on a pu relever au moins 3 articles, 2 résumés et plusieurs documents gouvernementaux (Saskatchewan et C.G.C.) et de site internet (Fugro) décrivant la zone kimberlitique de « Fort à la Corne » (Saskatchewan). De même, et en considérant uniquement la conférence IKC 2003, on a relevé 5 articles et 3 résumés sur la zone kimberlitique d'« Ekati » (TNO).

On retrouvera au paragraphe Références la liste des documents consultés pour établir notre base de données. Les anomalies gravimétriques des kimberlites sont

généralement négatives (figure 5), mais peuvent être positives à l'occasion (ex. Fort a la Corne).

La corrélation entre des anomalies MAG et AEM est souvent observée (figure 6). La variation dans la polarité de l'anomalie, ainsi que la présence de l'une et/ou de l'autre anomalie peuvent possiblement être corrélées avec différentes sources pour ces anomalies (Macnae, 1979, 1995; Verma 2003). Généralement, on associe à l'anomalie magnétique le niveau non-altéré de la kimberlite. Son intensité dépendra alors de la profondeur de la source (magnétique), de la susceptibilité des roches, mais aussi de la rémanence inscrite dans la roche lors de la mise en place (polarisation normale ou inverse du champ). Il faut noter que dans le cas d'intrusion multiples, ces caractéristiques peuvent varier d'une intrusion à une autre, augmentant ainsi la complexité de l'interprétation de la zone. Un exemple de l'étude de la variation de la rémanence sur la zone kimberlitique d'Ekati est présenté par Lockhart (2003, 2004).

L'anomalie AEM est par contre associée à la partie altérée, proche de la surface, de la kimberlite. Ainsi, l'altération d'une kimberlite produira des minéraux argileux, réduisant alors la densité, la susceptibilité magnétique, et la résistivité. Il faut noter que la présence d'un lac au dessus d'une kimberlite peut-être la cause d'une anomalie EM. Ces différents points sont résumés synthétiquement dans le tableau suivant (Verma, 2003):

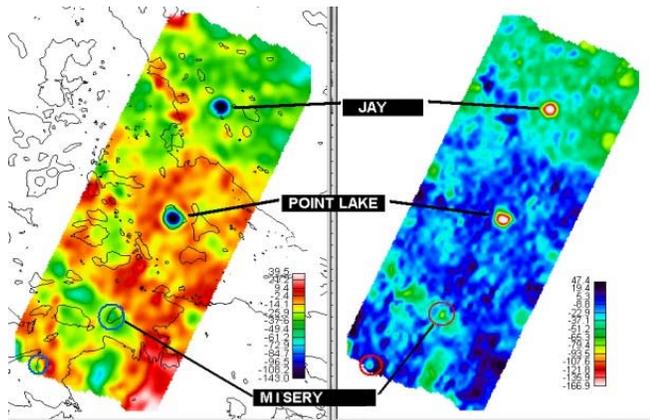
**Table 1: General geophysical property contrasts with the country rock for weathered and unweathered K/L's**

K/L'S	DENSITY	SUSCEPTIBILITY	RESISTIVITY
Weathered & Altered	LOW	LOW	LOW
Hard & Compact	HIGH	HIGH	HIGH

Parfois un certain décalage est noté entre les anomalies MAG et EM. On l'explique de la manière suivante : l'anomalie magnétique est associée à la partie non altérée de la kimberlite alors que l'anomalie, elle, est reliée à la partie altérée qui souvent a été érodée et déplacée par le passage des glaciers. L'anomalie EM se trouve dans ce cas décalée dans la direction d'avancement des glaciers. Une étude intéressante menée par Dr Don Francis (2003) vise à étudier la fertilité économique des kimberlites en étudiant les éléments majeurs (Fe, Ti) (voir figure 7). Cette étude montre que pour les kimberlites russes, la teneur en diamants mesurée en carats/tonne augmente de manière inversement proportionnelle à la teneur en Ti. Comme il existe une étroite relation entre la teneur en fer

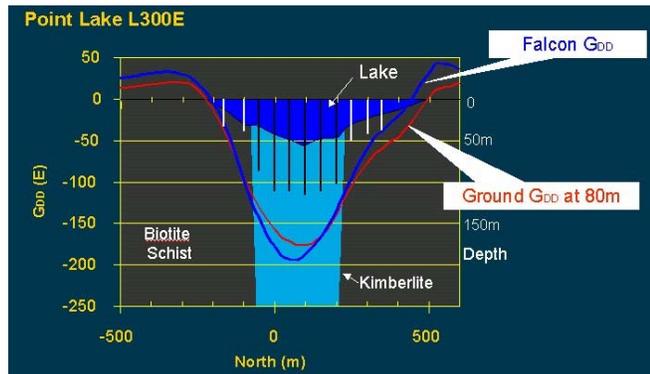
et la teneur en Ti, plus la teneur en Ti, Fe (ilménite et autres minéraux) est faible plus le potentiel économique d'une kimberlite augmente. Comme l'anomalie magnétique est étroitement proportionnelle à ces teneurs, il faudrait rechercher parmi les kimberlites celles qui sont le plus faiblement magnétique. Cette approche pourrait être utile afin de réaliser le lien entre les anomalies magnétiques et la concentration en diamants d'une kimberlite. Ainsi, ayant une évaluation de la géométrie de la kimberlite par le biais de l'inversion des données géophysiques et des données de forage, donc de son volume, et de la concentration probable en diamant, il serait alors possible d'obtenir un estimé de la valeur économique de la kimberlite. Ce paramètre serait de première importance pour les compagnies d'exploration Il serait néanmoins judicieux de compléter cette étude sur les éléments majeurs afin d'y inclure différentes kimberlites représentative de plusieurs faciès et âges rencontrés au Canada et au Québec.

Point Lake (TNO) aéroporté (gradient vertical)



(même carte mais deux échelles de couleurs)

anomalie gravimétrique aéroporté versus au sol



Hiles Lagoon (Australie)

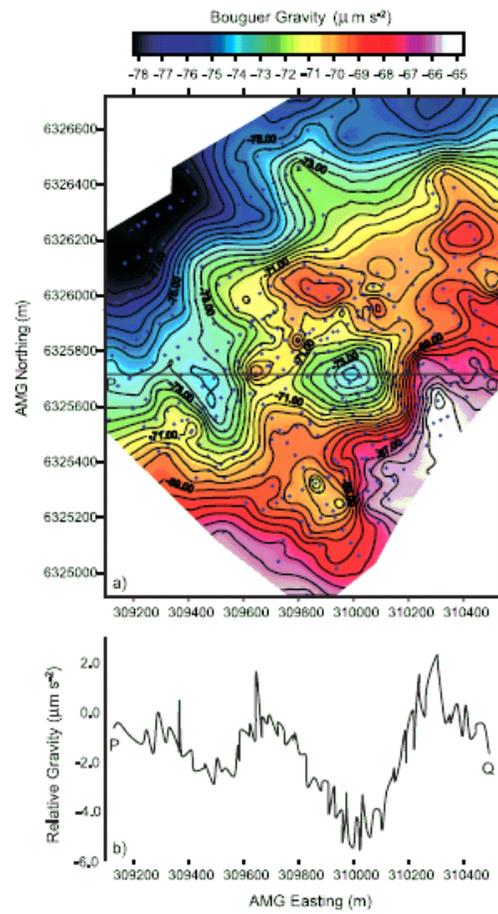


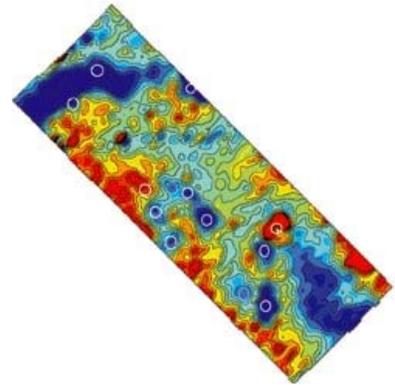
Fig. 3. a) Hiles Lagoon Bouguer anomaly map (Isogal 84 datum), and b) gravity profile PQ after regional removal.

Figure 5 : Anomalies gravimétriques.

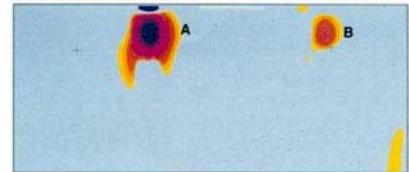
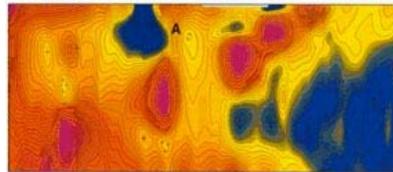
champ magnétique total

conductivité apparente

Fort à la Corne (SK)  
 MAG: anomalie positive (+)  
 AEM: anomalie « négative » (-)  
 (résistant dans conducteur)



Point Lake (TNO)  
 MAG: anomalie négative (-)  
 AEM: anomalie « positive » (+)  
 (conducteur dans résistant)



Renard (QC)  
 MAG: anomalie positive (+)

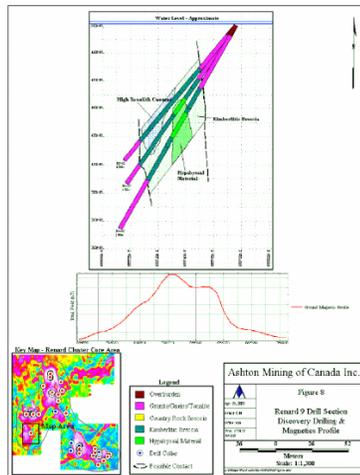


Figure 6 : Anomalies magnétiques et EM. La couleur change autour de la limite 15 carat/10t (voir Francis, 2003 pour le détail).

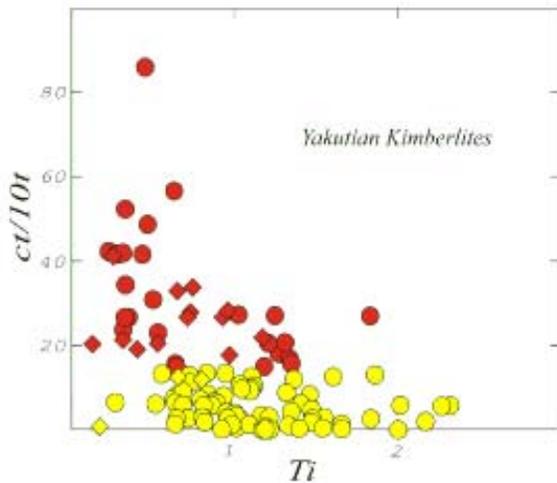


Figure 7 : Variation de la concentration en diamants en fonction de l'élément Ti.

**Mesures des propriétés physiques :**

Nous avons contacté :

- Dr Daniel Schulze, Université de Toronto;
- Dr Don Francis et William-Jones, Université de McGill, Montréal;
- Dr. Kjarsgaard (CGC, Ottawa).
- Ashton Mining (Monts Otish -Renard- et Alberta);
- Ditem (Monts Otish);
- Dr. Jonathan Mwenifumbo, Commission Géologique du Canada, Ottawa.(pour ces mesures de propriétés physiques prises en forage)
- Majescor (Wemindji)
- Trés-Or (Lapointe)

Seuls les Drs. Schulze, Francis et Kjarsgaard nous ont répondu favorablement et avec intérêt.

**MESURES DE LA SUSCEPTIBILITÉ ET DE LA DENSITÉ (MASSE VOLUMIQUE)**

Un volet important du projet sur les kimberlites consistait à réaliser des mesures de propriétés physiques sur des échantillons de roches kimberlitiques. L'objectif de cette étude est de fournir des informations sur les caractéristiques physiques des kimberlites du Québec, puis de comparer ces résultats avec les mesures obtenues sur d'autres kimberlites provenant du Canada, ou d'ailleurs dans le monde.

Deux séries de mesures de susceptibilité magnétique et de densité ont été réalisées pendant l'été et l'automne

2005. Une première série a été obtenue à partir des échantillons prêtés par D.Schulze de l'université de Toronto. La seconde série de mesure a été obtenue à partir des échantillons prêtés par Don Francis de l'université de McGill, Montréal. Les échantillons de McGill regroupent exclusivement des kimberlites provenant du Québec, en particulier des Monts Otish (Beaver Lake; DITEM), du Temiscamingue (Guigues Pipes) et de Wemindji. Les mesures de Toronto ont été obtenues principalement sur des échantillons provenant des autres régions du Canada (Ontario, TNO) ou du monde (E.U., Venezuela). Mais cette collection a permis d'avoir accès à un échantillon provenant de Bachelor Lake (région LeTac). Finalement, des mesures sur quelques échantillons de kimberlites provenant des Torngat (Québec), ainsi que de Guigues Pipe et de Peddie Pipe ont été obtenues sur des échantillons fournis par B.A. Kjarsgaard (CGC, Ottawa).

Les échantillons de Beaver Lake (Monts Othis) sont ceux dont on a le plus d'information, c'est-à-dire le nom ou numéro du forage et la profondeur. Par contre, pour presque tous les autres échantillons, seule est connue la région de provenance. Les dimensions des échantillons sont très variables, mais restent souvent dans la gamme de quelques centimètres de longs. Les masses mesurées pour l'estimation de la densité (masse volumique) varient de quelques dizaines de grammes à plusieurs centaines de grammes pour presque tous les échantillons. Il a fallu néanmoins casser les échantillons des Torngat car ils étaient trop pesants ( $M > 1\text{kg}$ ) pour faire nos mesures.

**SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE**

Les mesures de susceptibilités magnétiques ont été obtenues sur l'ensemble des échantillons disponibles sur le site, c'est-à-dire à l'université de McGill ou de Toronto. Ces mesures ont été obtenues à l'aide du « MPP EM2S+ » de la compagnie Instrumentation GDD (<http://www.gddinstrumentation.com>). Un fichier au format ASCII est sauvegardé pour chaque échantillon. Un exemple de fichier est donné sur la figure 8. Par contre, nous avons utilisé un susceptibilimètre K-2 d'EDA (Scintrex) pour les mesures sur les échantillons fournis par B.A. Kjarsgaard (Torngat, Peddie pipe et Guigues pipe -2<sup>nd</sup> série-). Il faut noter que les deux appareils n'ont pas la même résolution; le MPP-EM2S mesure les susceptibilités magnétiques en  $10^{-3}\text{SI}$ , alors que le K2 EDA fait des mesures en  $10^{-2}\text{SI}$ . Par contre, toutes les mesures seront reportées en unité SI.

On note que la conductivité électrique (mho/m ou

Siemens/m) est également mesurée par le MPP-EM2S, cependant la résolution de l'appareil (valeur maximum de 0.1 mho/m, soit une résistivité de 10 ohm.m) ne nous a pas permis d'obtenir des mesures de résistivité sur les échantillons.

Un programme Matlab a été écrit afin de synthétiser les informations contenues dans ces fichiers. Le résultat de cette synthèse est un fichier présentant pour chaque site une mesure moyenne de la susceptibilité magnétique, ainsi que ces valeurs minimums et maximales.

Num	Date	Heure	Position	U SYM	Réponse_HF SYM	Scpt:0.001_SI SYM	Cond:Mhos/m
MARQUEUR: 0.00 m							
2	25/07/2005	12:28:39	0.00 m	0	6.1	0.0	
3	25/07/2005	12:28:40	0.05 m	0	6.1	0.0	
4	25/07/2005	12:28:40	0.09 m	0	6.0	0.0	
5	25/07/2005	12:28:41	0.14 m	0	5.9	0.0	
6	25/07/2005	12:28:41	0.18 m	0	5.7	0.0	
7	25/07/2005	12:28:42	0.23 m	0	5.0	0.0	
8	25/07/2005	12:28:42	0.27 m	0	4.2	0.0	
9	25/07/2005	12:28:43	0.32 m	0	4.2	0.0	
10	25/07/2005	12:28:43	0.36 m	0	4.0	0.0	
11	25/07/2005	12:28:44	0.41 m	0	3.4	0.0	
12	25/07/2005	12:28:44	0.45 m	0	3.6	0.0	

Figure 8 : Exemple de fichier de sortie ASCII du MPP-EM2S.

## MASSE VOLUMIQUE

Les mesures de densité, ou plus précisément de masse volumique, ont été réalisées à l'école Polytechnique. De nombreux échantillons étaient parfois disponibles pour chacun des sites, et cela pour chaque collection (McGill, Toronto, GSC). Malheureusement, il a fallu se restreindre à n'emporter que quelques échantillons pour la mesure de masse, tout en s'assurant d'avoir au moins un ou deux échantillons pour chaque cible. Les mesures de masse volumique ont cependant été réalisées sur chacun des échantillons disponibles. Ces mesures sont obtenues en réalisant différente pesée de l'échantillon, l'une dans l'air ( $p_{air}$ ), l'autre dans l'eau ( $p_{eau}$ ). La masse volumique pour l'échantillon est alors donnée par :

$$\rho = \frac{P_{air}}{(P_{air} - P_{eau})}$$

Une mesure de la température de l'eau au cours du temps est également faite pour contrôle. Les mesures pour chaque échantillon disponible ont été répétées au moins deux fois, et à quelques jours de décalages. Cette étape permet de contrôler la qualité des mesures, et de définir alors une erreur de mesure. Notez que des mesures supplémentaires ont également été réalisées chaque fois que l'on observait de grandes variations dans nos mesures. Le résultat de ce travail est présenté sous forme

d'un tableau pour chaque collection, et d'un tableau synthèse regroupant l'ensemble des mesures, avec leurs variations (minimum, maximum).

## SYNTHÈSE

La synthèse de toutes ces mesures est présentée dans le fichier «DBase.xls» au format Excel. Ce fichier présente pour chaque échantillon une référence régionale, un âge, son type (estimé à travers la littérature), sa profondeur (si disponible), les valeurs moyenne, minimale et maximale pour la susceptibilité magnétique (unité SI) et pour la masse volumique (densité). Un second fichier «DBase\_short.xls» au format Excel et converti en ascii reprend quelques éléments du fichier principal (âge, type, susceptibilité et densité) pour les kimberlites du Québec et du Canada (hors Québec). Ce second fichier est utilisé pour générer les différents graphiques de l'analyse (section suivante). Ces deux fichiers de la base de données sont disponibles auprès de l'auteur principal de ce rapport (M. Chouteau ; [chouteau@geo.polymtl.ca](mailto:chouteau@geo.polymtl.ca)).

## ANALYSE DES RÉSULTATS

À partir du tableau synthétisant l'ensemble des mesures, nous avons extrait pour chacun des échantillons de kimberlites du Québec et du Canada quatre données principales : l'âge, le type, la densité et la susceptibilité.

Il faut noter ici que la détermination du type de faciès des kimberlites, c'est-à-dire les faciès cratère, diatrème ou hypabyssal, est une donnée plutôt qualitative par rapport aux autres données. Pour chaque paire de variables, un diagramme binaire est réalisé, permettant une caractérisation des relations des variables entre elles. Ces graphiques, pour les kimberlites du Québec, sont donnés

à la figure 9. Pour comparaison, des graphiques similaires ont été obtenus pour les kimberlites du reste du Canada, et une synthèse regroupant l'ensemble des données canadiennes est présenté à la figure 10. La liste des symboles utilisés pour caractériser les kimberlites est donnée dans le tableau 1.

Tableau 1 : Listes des symboles utilisés dans les graphiques des figures 9 et 10.

Québec (QC)	Canada (CA)	SW	SW Slave [NWT]
BL Beaver Lake	TE Teminiscaming [ON]	SE	SE Slave [NWT]
WE Wemindji	KL Kirkland Lake [ON]	MP	Mesima Pipe [Nunavut]
LT Le Tac (Certac)	VP Victor Pipe [ON]	FC	Fort à la Corne [SK]
GP Guigues Pipes	SI Sommerset Island [NWT]	SL	Strugeon Lake [SK]
TG Tornгат	LG Lac de Gras Ekati [NWT]	ML	Mountain Lake [AB]

Figure 9 : Graphiques binaires pour les kimberlites du Québec.

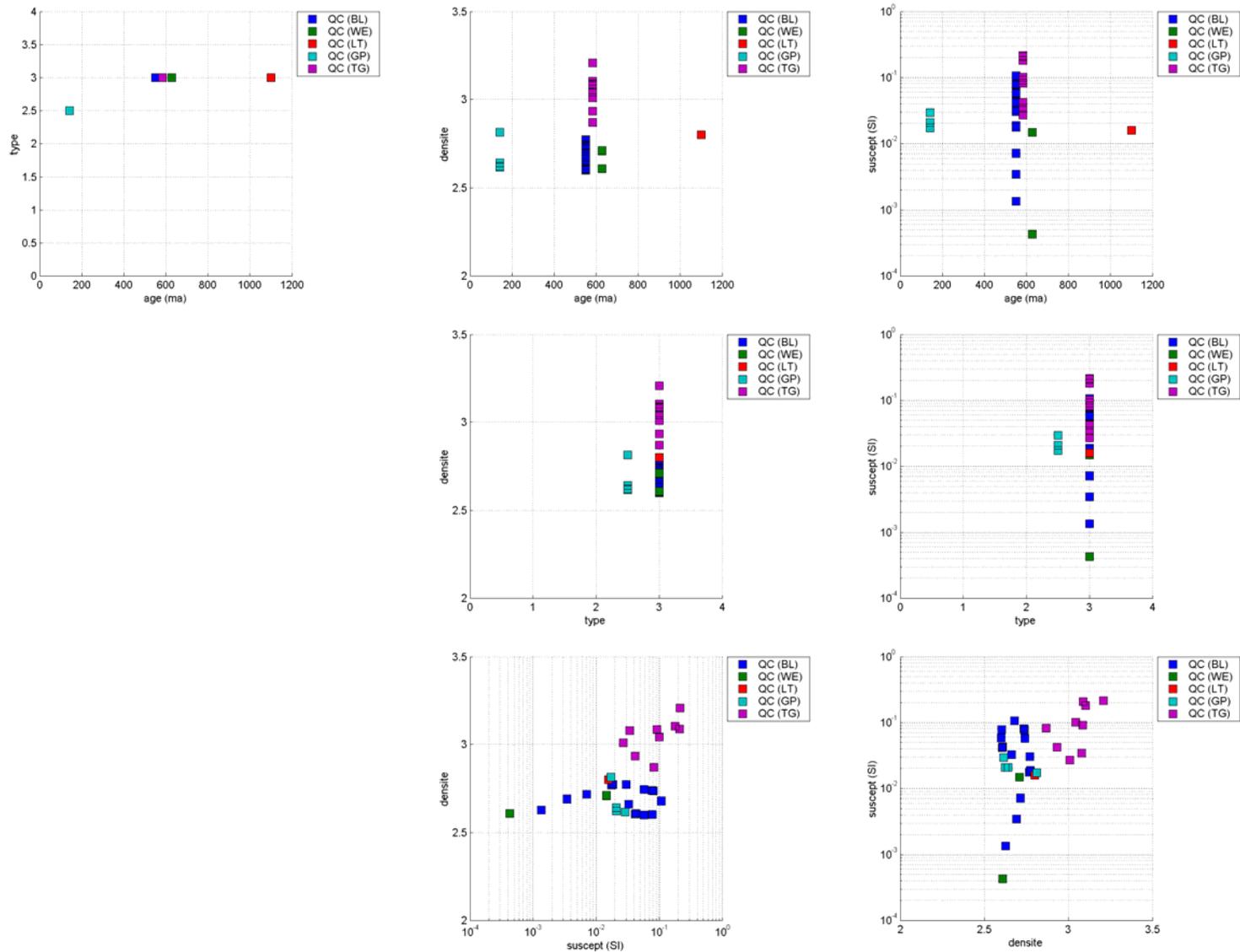
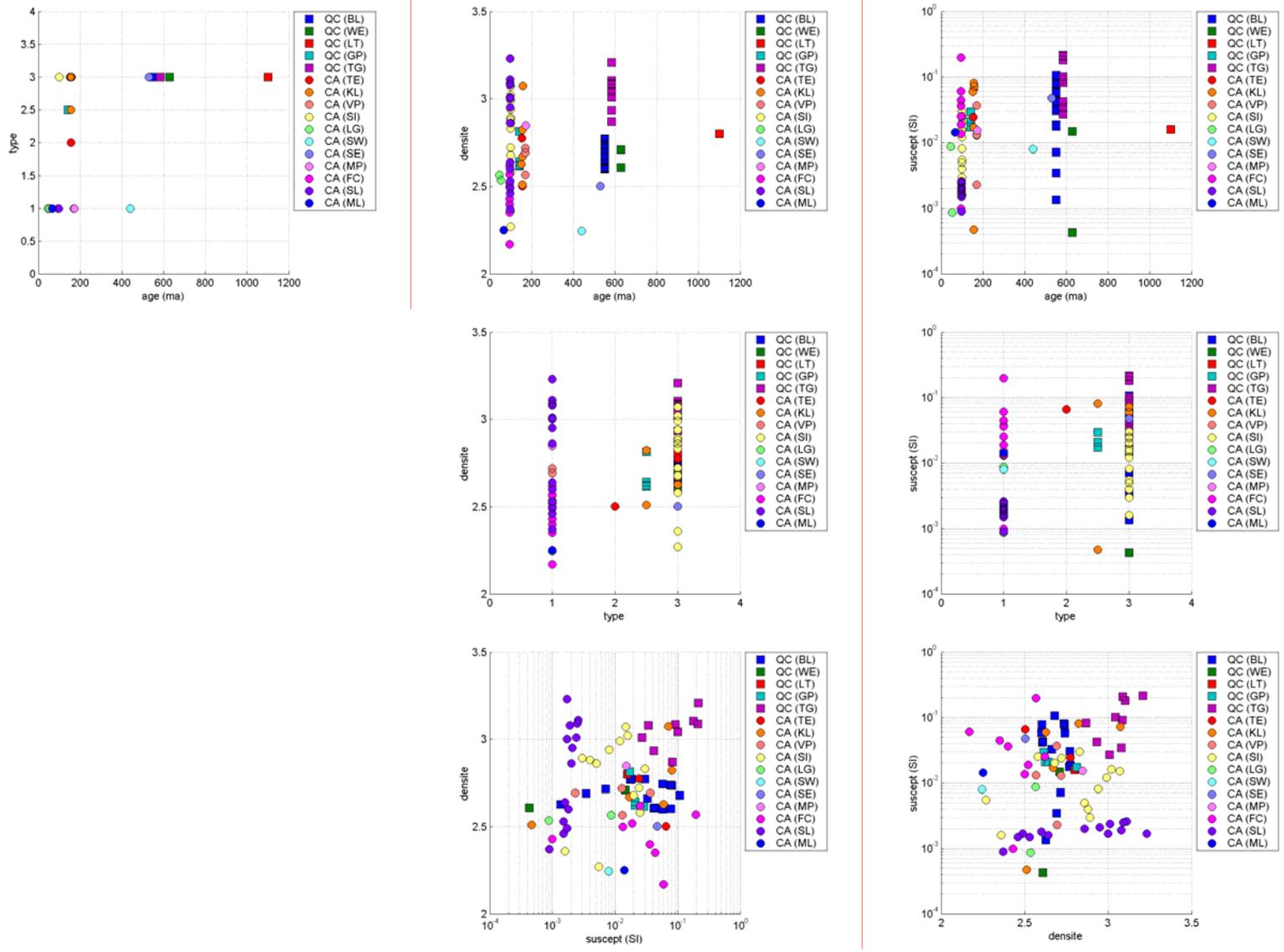


Figure 10 : Graphiques binaires pour l'ensemble des kimberlites du Canada.



- **Âge :** Les kimberlites du Québec sont, d'une manière générale, d'âge supérieur à 550-600Ma. Une exception est la kimberlite de Guigues Pipes (Teminscamingue) dont l'âge (142Ma) est similaire à ces voisines ontariennes (TE, KL, VP). La majorité des kimberlites du Canada (hors Québec) sont, elles, regroupées autour de 95-100Ma. Quelques échantillons d'âges 440Ma (SW) et 530Ma (SE) sont cependant disponibles. On note en particulier que l'âge des échantillons SE (Snap Lake) sont d'un âge comparable (mais inférieur) à celle de Beaver Lake (BL; 550Ma), et du Torngat (TG; 584Ma).
- **Type :** On n'observe que des kimberlites de type hypabyssale pour le Québec. Ce paramètre n'est donc pas un élément distinctif pour différencier les kimberlites du Québec. Par contre, une plus grande variété de faciès est observée pour les kimberlites du Canada (hors Québec). On note en particulier que les kimberlites d'âge inférieur à 100Ma (« jeunes kimberlites ») sont toutes répertoriées dans un faciès cratère. Par contre, pour les kimberlites d'âge variant entre 140 et 160Ma, c'est-à-dire celles de l'Ontario (VP, KL, TE), et de sa voisine du Québec (GP), on observe les trois différents faciès. On note néanmoins que ces faciès se regroupent géographiquement (VP : faciès cratère; TE et GP : diatème-hypabyssal).
- **Densité :** On observe très clairement une différence entre les kimberlites du Torngat (TG) et les autres kimberlites du Québec (BL, WE, LT, GP). En effet, les kimberlites du Torngat se distinguent du groupe par une densité plus forte, proche de 3, alors que toutes les autres kimberlites du Québec semblent se regrouper autour d'une densité proche de 2.7, quel que soit l'âge de la kimberlite. Une plus grande diversité de la densité est observée sur les kimberlites du Canada (hors Québec). Cependant, une certaine différenciation est notable en fonction de l'âge de la kimberlite. Pour les kimberlites d'âge 100Ma, deux groupes semblent s'identifier : l'un avec une densité moyenne proche de 2.5, et l'autre avec une densité moyenne plus élevée, proche de 3. Par contre, pour les kimberlites d'âge 140-160Ma, les mesures de la densité semblent se regrouper autour de 2.7. Pour les kimberlites plus âgés (SW et SE; 440 et 530Ma), les mesures montrent des densités plus faibles que celles d'âges 550-630Ma (BL, WE et TG).

- **Susceptibilité :** On observe une grande variation de la susceptibilité magnétique pour les kimberlites des monts Otish (BL), puisque l'on a mesuré des susceptibilités variant de  $10^{-3}$  à  $10^{-1}$  SI. Tous les échantillons provenant de Guigues Pipe (GP) et des Torngat montrent des susceptibilités supérieures à  $10^{-2}$ , allant même jusqu'à  $10^{-1}$  SI (TG). Cette gamme de mesures de la susceptibilité magnétique est également observée sur les kimberlites du Canada (hors Québec). On note cependant que ces mesures ne semblent pas varier de plus d'un ordre de grandeur par zone géographique ou champ de kimberlites, contrairement à BL (2 ordre de grandeurs).

Le graphique montrant la variation de la densité par rapport à la susceptibilité magnétique pour les kimberlites du Québec montre clairement deux populations différentes. Le premier groupe est clairement représenté par les kimberlites des Torngat (TG). Elles sont représentées par une forte susceptibilité et une grande densité. Le second groupe, représenté par les autres kimberlites du Québec, présentent également des fortes susceptibilités (à l'exception des quelques mesures), mais montrent des densités plus faibles, proches de 2.7. On retrouve, dans les kimberlites du Canada (hors Québec) la trace de ce second groupe, mais on ne peut pas identifier clairement le premier groupe. Par contre, on retrouve un troisième groupe présentant d'une part des faibles susceptibilités magnétiques ( $10^{-3}$ SI), et des densités variables (de 2 à 3). Ce dernier groupe est clairement associé aux kimberlites SL (Sturgeon Lake).

En regroupant l'ensemble des mesures dans un seul graphique, il est difficile de déterminer des relations simples entre les différentes variables : âge, type, densité et susceptibilité. Une analyse en composantes principales (ACP) pour chacun des cas a été réalisée et les résultats sont présentés sur la figure 11 (Québec; 4 variables), figure 12 (Québec; 3 variables), figure 13 (Canada sans Québec; 4 variables), et figure 14 (Canada; 4 variables).

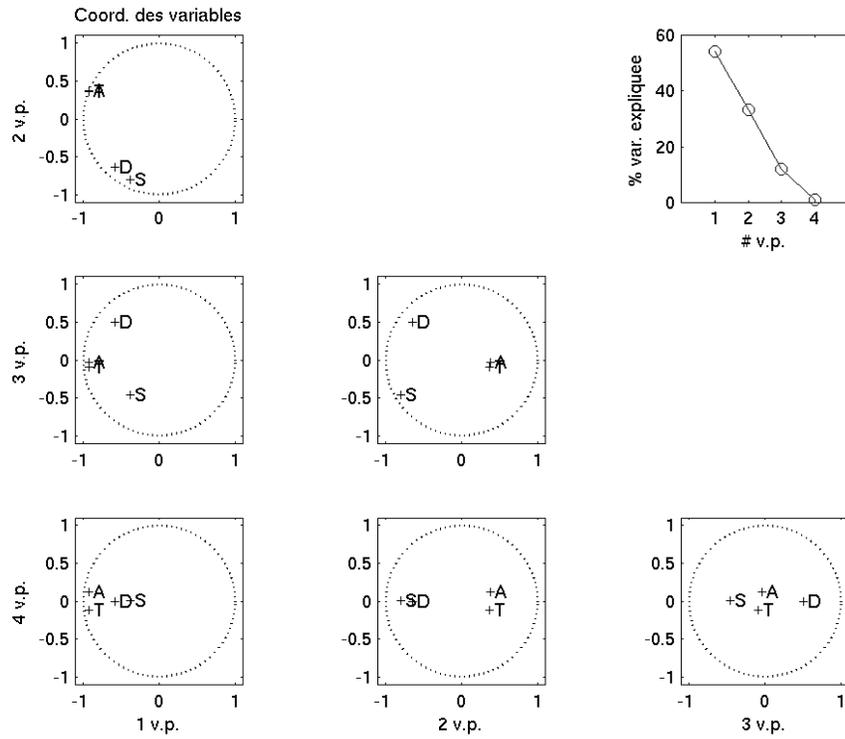


Figure 11 ACP (4 variables) pour les kimberlites du Québec (D : densité, S : susceptibilité, A : âge; T : type)

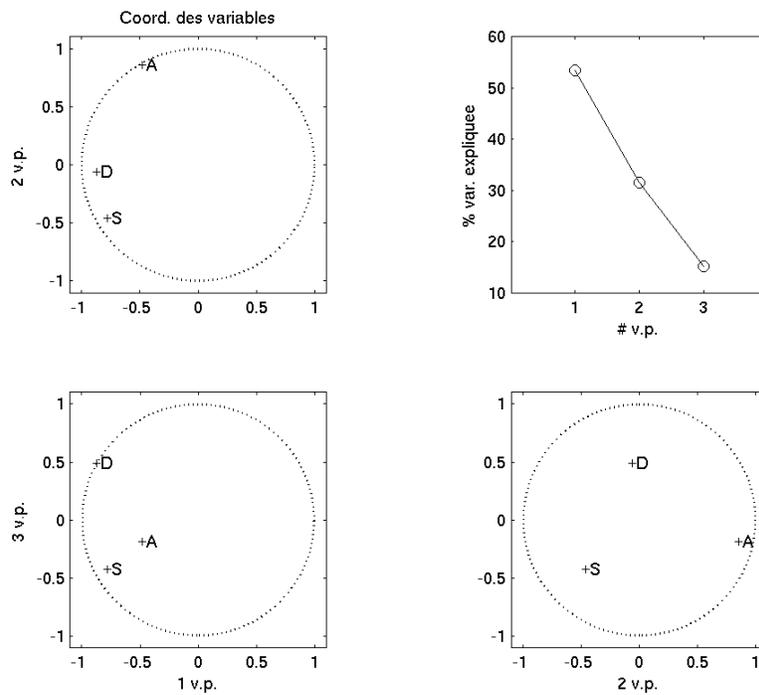


Figure 12 : ACP (3 variables) pour les kimberlites du Québec.

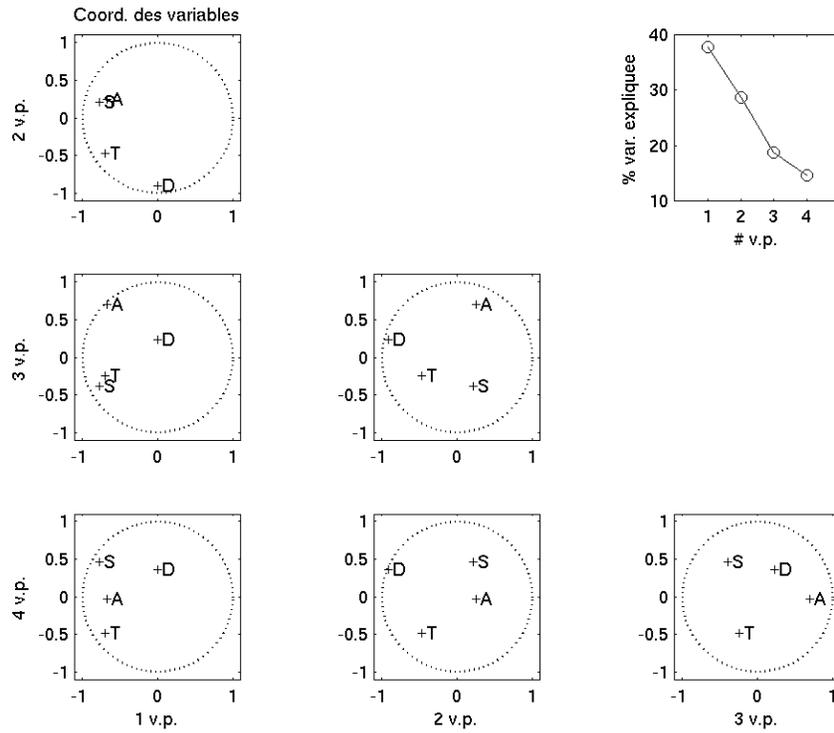


Figure 13 : ACP (4 variables) pour les kimberlites du Canada (hors Québec).

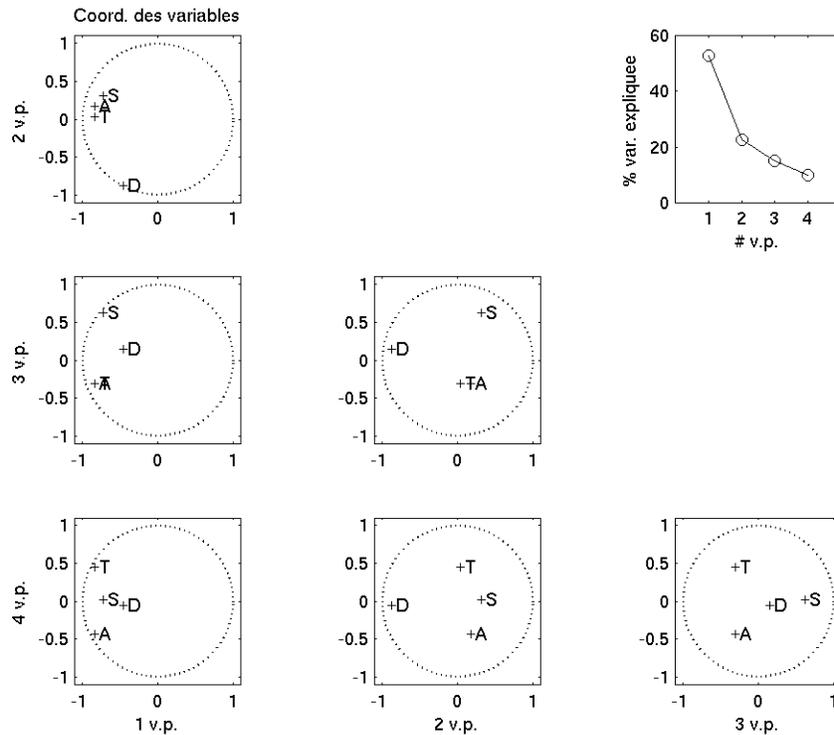


Figure 14 : ACP (4 variables) pour l'ensemble des kimberlites du Canada.

## INVERSION DE DONNÉES GÉOPHYSIQUES

Dans le cadre de ce travail, un autre objectif était de faire une analyse de données géophysiques, et plus particulièrement des données magnétiques, afin de voir s'il est possible de mieux contraindre l'information géométrique d'une kimberlite par la géophysique. Un aspect particulier dans cette analyse concerne l'inversion magnétique 3D des données magnétique en présence de rémanence. Cette inversion est le résultat des travaux de maîtrise de M. Abdelmadjid Chemam de l'École Polytechnique. La méthode permet de déterminer l'aimantation totale de la structure (et non seulement l'aimantation induite) et, à l'aide d'informations complémentaires, l'aimantation rémanente ainsi que la géométrie de la cheminée kimberlitique. Nous avons sollicité des données magnétiques (et électromagnétiques) auprès des compagnies Ashton/Soquem et Très-Or sans succès. Nous avons alors recouru aux données publiques disponibles sur des kimberlites connues. Celles de Peddie Pipe nous ont été fournies par la Commission Géologique du Canada alors que celles de Lapointe ont été obtenues de Discover Abitibi (Ontario). Ces deux kimberlites sont dans le Témiscamingue ontarien.

### PEDDIE PIPE

Une première application a été réalisée sur des données provenant de la kimberlite Peddie Pipe au

Témiscamingue ontarien. Ces données nous ont été fournies par Abitibi Géophysique Inc. après avoir reçu l'accord de la Commission Géologique du Canada, le détenteur officiel (propriétaire) des mesures.

Notons que notre visite au Dr. B. Kjarsgaard (CGC) nous a permis d'obtenir un échantillon de kimberlite provenant de Peddie Pipe, et donc de faire des mesures de susceptibilité. Le résultat de ces mesures de susceptibilité magnétique réalisées sur cet échantillon montre une valeur variant de 0.018 à 0.027 SI, pour une moyenne de 0.024 SI.

Les résultats de l'inversion magnétique présentée par Abitibi Géophysique sont présentés à la figure 15. Une valeur de la susceptibilité magnétique de 0.02 (CGS) a été déterminée par l'inversion. Dans le système SI, cette valeur de susceptibilité est donc de 0.25 SI puisque  $k(SI) = 4 \pi k(CGS)$ ; cette valeur donc est dix fois plus élevée que celle mesurée sur l'échantillon.

Les résultats obtenus par le programme de Chemam sur les mêmes données magnétiques sont présentés sur la figure 16. On note en premier que la susceptibilité obtenue par l'inversion est de 0.00084 CGS ou 0.01 SI. Ce résultat est très proche de la valeur mesurée en laboratoire sur l'échantillon. On note également qu'il est nécessaire d'introduire une forte rémanence pour pouvoir expliquer l'anomalie magnétique. Cette forte rémanence est caractérisée par une valeur du facteur Q d'environ 30. On rappelle que ce facteur Q (Konigsberger ratio) mesure le rapport entre la magnétisation rémanente et induite.

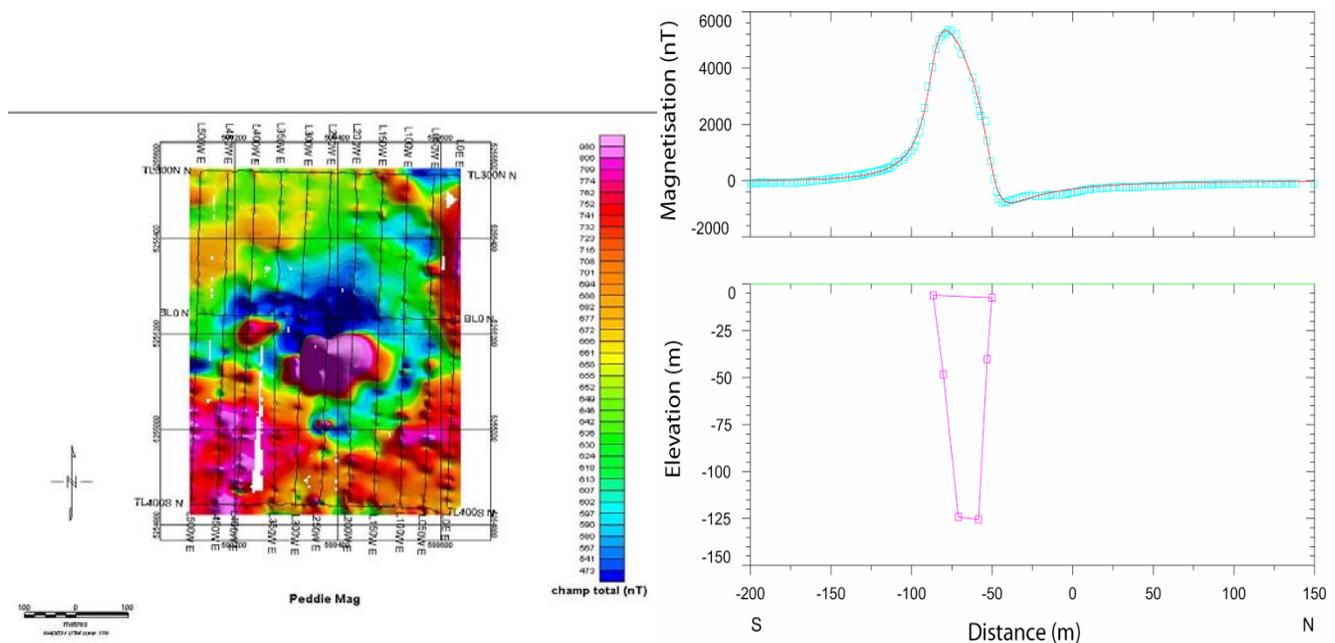


Figure 15 : Résultat de l'inversion 2.5D sur Peddie Pipe (Abitibi Geophysique). La susceptibilité est  $k=0.02$  CGS (0.25 SI).

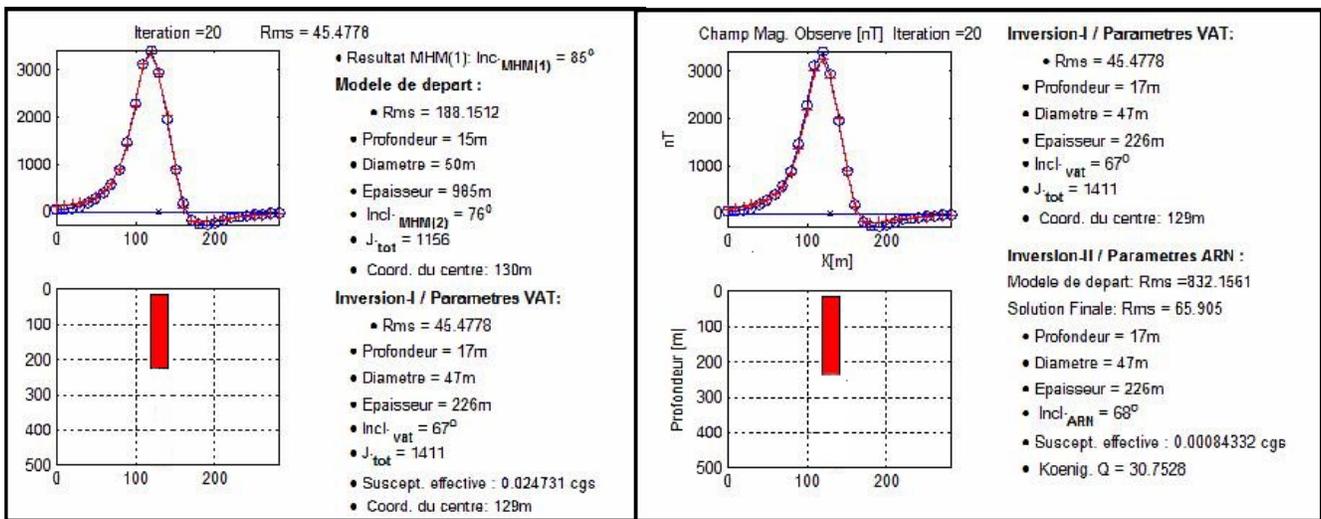


Figure 16 Résultat de l'inversion magnétique avec rémanence des données Peddie Pipe (A.Cheman).

Notons que le but ici n'est pas de mettre en avant l'une ou l'autre des méthodes d'inversion mais bien de rendre compte de l'importance de bien faire attention aux paramètres utilisés dans les inversions de données. En particulier, cette analyse montre qu'il est important de faire des mesures de propriétés physiques (ici de susceptibilité magnétique) afin de mieux contraindre le résultat de l'inversion et de tenir compte de l'aimantation rémanente (qui ici est 30 fois plus important que l'aimantation induite). Le résultat final sera une meilleure connaissance de la géométrie (profondeur, volume) des kimberlites, et ainsi, de leur valeur économique. En effet, on rappelle que la valeur d'une kimberlite sera fonction

de plusieurs paramètres dont le volume :

$$\text{Valeur économique} = [\text{Volume}] \times [\text{Teneur}] \times [\text{Valeur/carat}].$$

### LAPOINTE PIPE

Cette kimberlite a été découverte suite aux levés exécutés pour le programme Discover Abitibi. La compagnie Trés-Or y a fait des découvertes diamantifères très encourageantes depuis 2004. L'interprétation magnétique (figure 17) montre que la cheminée de forme ovale est à une distance verticale de 93 m sous le capteur aéroporté, soit 23 m sous la surface du sol (le capteur est à 70 m

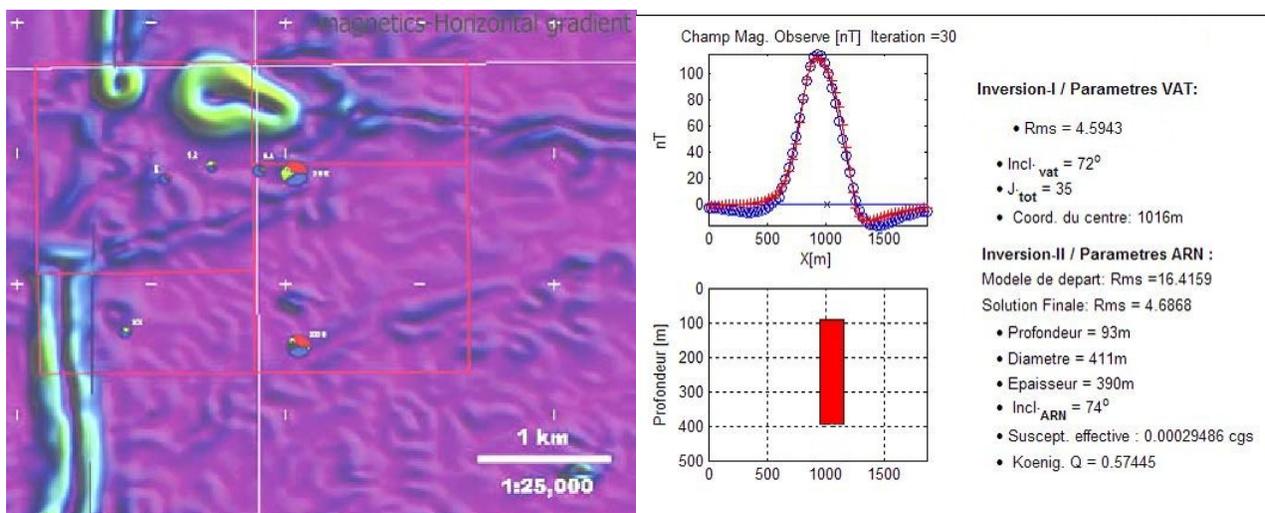


Figure 17 : anomalie du gradient horizontal magnétique montrant la cheminée kimberlitique de Lapointe ainsi que l'interprétation magnétique de celle-ci.

d'altitude). Son diamètre moyen est de 411 m, son extension verticale de 390 m. L'aimantation rémanente est faible ( $Q = 0.57$ ) et de direction ( $74^{\circ}$ ) très semblable à la direction du champ magnétique terrestre présent. La susceptibilité magnétique est de 0.0036 SI. Malheureusement, nous n'avons pas pu avoir confirmation de l'exactitude des résultats, la compagnie Trés-Or n'ayant pas répondu à nos requêtes de demandes d'informations géologiques.

## CONCLUSION

Ce rapport présente les résultats du projet « Signatures géophysiques des intrusions kimberlitiques ». Tout d'abord une base de données (propriétés physiques, réponses observées) a été produite à partir des références disponibles. Puis, nous avons mesuré les propriétés physiques (densité, susceptibilité magnétique, conductivité EM) d'échantillons de kimberlites du Québec et de régions immédiatement voisines, prêtés par des collègues universitaires et de la Commission Géologique du Canada. Cette base de données peut permettre d'aider à la modélisation et à l'interprétation des réponses géophysiques causées par des kimberlites d'environnement et d'âge variables.

Finalement, un code d'inversion 3D des réponses magnétiques des cheminées kimberlitiques a été développé. Ce code permet de déterminer l'aimantation rémanente présente dans les cheminées et de mieux interpréter la géométrie des cheminées (profondeur, diamètre, extension verticale). Deux applications à des données réelles (Peddie Pipe et Lapointe Pipe) permettent d'apprécier la qualité de cette approche.

## RÉFÉRENCES

- Allen T.I., Cooper S.A., Cull J.P., 2001. High definition gravity surveys and density modelling for kimberlite exploration. *Exploration Geophysics*, 32, 89-94.
- Ashton Mining of Canada Inc., url: <http://www.ashton.ca>.
- Atkinson W.J., 1986. Diamond exploration philosophy, practice, and promises: a review; in *Kimberlites and related rocks. volume 2, Their mantle / crust setting, diamonds and diamond exploration*, edited by J. Ross, Geological Society of Australia Special Publication no 14, 1075-1107.
- Bellefleur G., Matthews L., Roberts B., McMonnies B., Salisbury M., Perron G., Snyder D., McGaughey J., 2004. Downhole seismic imaging of the Victor Kimberlite, James Bay Lowlands, Canada: a feasibility study, *SEG Expanded Abstracts* 23, 1229-1232.
- Berryman A.K., Scott Smith B.H., Jellicoe B.C., 2003. Geology and Diamond Distribution of the 140/141 Kimberlite Pipe, Fort a la Corne Area, Central Saskatchewan, Canada; in 8<sup>th</sup> International Kimberlite Conference (IKC), Extended Abstracts.
- Berryman A.K., Scott Smith B.H., Jellicoe B.C., 2004. Geology and diamond distribution of the 140/141 kimberlite, Fort à la Corne, central Saskatchewan, Canada, *Lithos*, 76 (1-4), 99-114.
- Birkett T.C., McCandless T.E., Hood C.T., 2003. Petrology of the Renard Igneous Bodies: Host Rocks for Diamond in the Northern Otish Mountains Region, Quebec; in 8<sup>th</sup> International Kimberlite Conference (IKC), Extended Abstracts.
- Birkett T.C., McCandless T.E., Hood C.T., 2004. Petrology of the Renard Igneous Bodies: Host Rocks for Diamond in the Northern Otish Mountains Region, Quebec, *Lithos*, 76 (1-4), 475-490.
- Chemam, A., Keating, P. and Chouveau, M., 2006: Inversion of magnetic anomalies from kimberlite pipes with remanence; présenté au Congrès annuel GAC-MAC 2006, Montréal, 16 mai 2006.
- Clements B., Connor A.O., 2002. Technical Report and Recommendations, The Otish Mountains, Quebec Project; Ashton Mining of Canada Inc.
- Clements B., Connor A.O., 2003. Technical Report and Recommendations, The Otish Mountains, Quebec Project; Ashton Mining of Canada Inc.
- Clements B., Connor A.O., 2004. Technical Report and Recommendations, The Otish Mountains, Quebec Project; Ashton Mining of Canada Inc.
- da Costa A.J.M., 1989, Palmietfontein kimberlite pipe, South Africa-A case history, *Geophysics*, 54 (6), 689-700.
- Dawson J.B., 1980. *Kimberlites and their xenoliths*, Springer-Verlag.
- DITEM, Ditem Explorations Inc., url: <http://www.ditem.com>.
- Dunne K.P.E., Grant B., 1993. Mid-Continent diamonds diamonds, proceedings of the GAC-MAC Symposium, Edmonton, Alberta, May 17-18.
- Francis D., 2003. Implication of Major Element Composition for the Mantle Sources of Kimberlite, Aillikite, Olivine Lamproite and Meimechite; in 8<sup>th</sup> International Kimberlite Conference (IKC), Extended Abstracts.
- Fugro, 2005. url: <http://www.fugroairborne.com>.
- Gendzwil D. J., Matieshin S.D., 1996. Seismic reflection survey of a kimberlite intrusion in the Fort à la Corne District, Saskatchewan; in *Searching for diamonds in Canada*, edited by A.N. LeCheminant, D.G. Richardson, R.N.W. DiLabio, K.A. Richardson, Geological survey of Canada, Open File 3228, 251-253.
- Glover J.E., Groves D.I., 1980. Kimberlites and diamonds : a seminar, organized by the Department of Geology, University of Western Australia, in cooperation with University Extension, University of Western Australia: Summary of presented papers. University of Western Australia.
- Heaman L.M., Kjarsgaard B.A., Creaser R.A., 2003. The timing of kimberlite magmatism in North America: implications for global kimberlite genesis and diamond exploration. *Lithos* 71, 153 – 184.
- Heaman L.M., Kjarsgaard B.A., Creaser R.A., 2004. The temporal evolution of North American kimberlites; *Lithos*, 76 (1-4), 377-397.
- Hogg R.L.S., Munro S.S., 2000. The aeromagnetic discovery of Kimberlites and sulfides at depth up to 200m; *SEG Expanded Abstracts*, 19, 367-370.

- Janse A.J.A., Downie I.F., Reed L.E., Sinclair G.L., 1986. Alkaline intrusions in the Hudson Bay Lowlands, Canada: exploration methods, petrology and geochemistry; in *Kimberlites and related rocks. volume 2, Their mantle / crust setting, diamonds and diamond exploration*, edited by J. Ross, Geological Society of Australia Special Publication no 14, 1192-1203.
- Jellicoe B.C., Robertshaw P., Williamson P., Murphy J., 1998. Summary of Exploration activities and results for the Fort a la Corne diamond project, Saskatchewan; in *Summary of Investigations, Saskatchewan Geological Survey, Saskatchewan Energy and Mines, Misc. Rep. 98-4*, 144-157.
- Kamara A.Y.S., 1981, Review: Geophysical methods for Kimberlite prospecting; *The Bulletin of the Australian Society of Exploration Geophysicists*, 12 (3), 43-51.
- Kornprobst J., 1982. Kimberlites: I-Kimberlites and related rocks; *Proceedings of the Third International Kimberlite Conference, Developments in Petrology 11A*, Elsevier.
- Lockhart G.D., Grutter H., Carlson J.A., 2004. Temporal, geomagnetic and related attributes of kimberlite magmatism at Ekati, Northwest Territories, Canada, *Lithos*, 77 (1-4), 665-682.
- Lockhart G.D., Grutter H., Carlson J.A., 2003. Temporal and Geomagnetic Relationship of Ekati's Economic Kimberlites; in *8<sup>th</sup> International Kimberlite Conference (IKC), Extended Abstracts*.
- MacFayden D.A., 1993, Discovery of Kimberlites in the Kirkland Lake area, Northern Ontario, Canada (Part III): A decisive contribution by aeromagnetic data analysis in conditions of deep overburden; in *Mid-Continent diamonds diamonds, proceedings of the GAC-MAC Symposium, Edmonton, Alberta, May 17-18*, edited by K.P.E. Dunne, B. Grant, 31-34.
- Macnae J.C., 1979, Kimberlites and exploration geophysics; *Geophysics*, 44 (8), 1395-1416.
- Macnae J.C., 1995, Applications of geophysics for the detection and exploration of kimberlites and lamproites; *Journal of Geochemical Exploration*, 53, 213-243.
- Milashiev V.A., 1988. *Explosion pipes*; Springer-Verlag.
- Mitchell R.H., 1986. Kimberlites: mineralogy, geochemistry, and petrology; Plenum Press.
- Mitchell R.H., Letendre J., 2003. Mineralogy and Petrology of Kimberlite from Wemindji, Quebec; in *8<sup>th</sup> International Kimberlite Conference (IKC), Extended Abstracts*.
- Moorhead J., Beaumier M., Girard R., Heaman L., 2003. Distribution, Structural Controls and Ages of Kimberlite Fields in the Superior Province of Quebec; in *8<sup>th</sup> International Kimberlite Conference (IKC), Extended Abstracts*.
- Moorhead J., Perreault S., Berclaz A., Sharma K.N.M., Beaumier M., Cadieux A.M.C., 2000. Kimberlites et diamants dans le nord du Québec; Ministère des Ressources naturelles, Québec. PRO 2000-05, 9 pages.
- Mwenifumbo C.J., Hunter J.A.M., Killeen P.G. 1996. Geophysical characteristics of Canadian kimberlites; in *Searching for diamonds in Canada*, edited by A.N. LeCheminant, D.G. Richardson, R.N.W. DiLabio, K.A. Richardson, Geological survey of Canada, Open File 3228, 237-240.
- Mwenifumbo C.J., Killeen P.G., Elliot B.E., 1998. Borehole Geophysical Signatures of Kimberlites in Canada; *The Log Analyst*, 39 (2), 38-52.
- Reed L.E., 1993. The Application of Geophysics to exploration for Diamonds; in *Mid-Continent diamonds diamonds: proceedings of the GAC-MAC Symposium, Edmonton, Alberta, May 17-18*, edited by K.P.E. Dunne and B. Grant, 21-26.
- Ross J., 1986. Kimberlites and related rocks. volume 1, Their composition, occurrence, origin and emplacement; *Proceedings of the Fourth International Kimberlite Conference, Perth, Geological Society of Australia Special Publication no 14*, Blackwell.
- Ross J., 1986. Kimberlites and related rocks. volume 2, Their mantle / crust setting, diamonds and diamond exploration; *Proceedings of the Fourth International Kimberlite Conference, Perth, Geological Society of Australia Special Publication no 14*, Blackwell.
- Sarma B.S.P., Verma B. K., 1996. Negative magnetisation contrast in Kimberlite search; *Exploration Geophysicists*. 27 (1), 21-24
- Smith R.S., Fountain D.K., 1999. Geophysics and Diamond Exploration - A Review; Paper presented at the Irish Association of Economic Geology week-end course.
- Twin Mining Corporation, url: <http://www.twinmining.com> .
- Twin Mining Corporation, 2000. Annual report, url: <http://www.twinmining.com> .
- Twin Mining Corporation, 2001. Annual report, url: <http://www.twinmining.com> .
- Twin Mining Corporation, 2002. Annual report, url: <http://www.twinmining.com> .
- Twin Mining Corporation, 2003. Annual report, url: <http://www.twinmining.com> .
- Twin Mining Corporation, 2004. Annual report, url: <http://www.twinmining.com> .
- Webb K.J., Scott Smith B.H., Paul J.L., Hetman C.M., 2003. Geology of the Victor Kimberlite, Attawapiskat, Northern Ontario, Canada: cross-cutting and nested craters; in *8<sup>th</sup> International Kimberlite Conference (IKC), Extended Abstracts*.
- Verma S.K., 2003. Geophysical Mapping of Kimberlite Pipes in South India; in *8<sup>th</sup> International Kimberlite Conference (IKC), Extended Abstracts*.
- Webb K.J., Scott Smith B.H., Paul J.L., Hetman C.M., 2004. Geology of the Victor Kimberlite, Attawapiskat, Northern Ontario, Canada: cross-cutting and nested craters; *Lithos*, 76 (1-4), 29-50.