

La place de la géophysique dans l'exploration minière

Pierre Andrieux

La géophysique devrait être de mieux en mieux connue du lecteur assidu de la revue "Géologues". Il en a été question en particulier dans le numéro spécial sur les hydrocarbures (n° 127 décembre 2000), dans les premières fiches métiers (n° 141 - Juin 2004) et dans le numéro spécial « 40 ans » (n° 146 - septembre 2005).

Oui, la géophysique est un outil incontournable pour quiconque s'intéresse à la géologie aux moyennes et grandes profondeurs. Elle l'est donc aujourd'hui pour le géologue minier, puisque les gisements les plus faciles à découvrir l'ont déjà été et parce que l'on s'adresse à des profondeurs de plus en plus grandes.

Détection directe des cibles minéralisées ou recherche indirecte ?

L'exploration minière est l'un des domaines où la géophysique est très souvent appliquée comme **outil de détection directe**. On sait que ce n'est en général le cas, ni dans l'exploration des hydrocarbures, ni dans la recherche d'eau, ni dans les études environnementales. Très souvent dans la recherche minière, au contraire, le contraste entre les propriétés physiques spécifiques des gisements métallifères et l'encaissant crée des « anomalies » qui peuvent être détectées à la surface du sol, en hélicoptère ou en avion. C'est le cas pour les contrastes de susceptibilité magnétique, pour la densité, la conductivité électrique et, beaucoup plus rarement, pour la radioactivité naturelle. Inutile d'ajouter que les concentrations naturelles d'or... ne permettent jamais leur détection directe !

La **recherche indirecte** cependant est tout aussi pratiquée dans le domaine minier que dans les autres. Elle consiste, pour le géophysicien, à fournir au géologue les éléments qualitatifs et quantitatifs du modèle géologique régional ou local susceptible de « porter » telle ou telle minéralisation utile, avec des concentrations économiquement exploitables. On comprend que l'approche pluridisciplinaire et le travail d'équipe soient les clés de la réussite dans cette activité d'exploration.

Les problèmes posés à la géophysique – Relations avec la typologie des gîtes métallifères

Michel Rabinovitch, l'expert minier de l'UFG, a bien

voulu présenter en quelques pages dans ce numéro une classification typologique des gîtes métallifères, pour permettre que soit mieux défini le problème posé au géophysicien d'exploration. Elle est de lecture relativement ardue pour le non spécialiste, mais elle a le mérite d'être quasi-encyclopédique, donc de constituer une base de connaissances utile, sinon indispensable, tout en permettant de dégager quelques notions clés pour l'exploration.

Douze types de gisements et quelques sous-types : comment le géophysicien peut-il simplifier cette classification pour sélectionner la technique et/ou la combinaison de techniques les mieux adaptées ?

À partir de trois critères principaux :

- **l'environnement géologique** : intrusions plutoniques, volcanisme acido-basique, basique, ultrabasique, série volcano-sédimentaire en milieu marin, environnement sédimentaire, gîtes d'altération, placers et paléoplacers..., autant de contextes géologiques différents caractérisés par des propriétés physiques spécifiques, un style structural particulier et des gammes de profondeurs allant de quelques mètres pour les placers récents et les gîtes d'altération à plusieurs centaines de mètres pour certains gîtes sédimentaires ; c'est un premier critère ;
- **la morphologie du gisement** : on distingue en général trois familles (1) les gisements stratiformes, qui feront appel aux techniques spécialisées dans l'étude des structures dites tabulaires, (2) les amas et lentilles de taille suffisante pour être détectés et (3) les filons et autres structures subverticales telles que les cheminées. Cette distinction était importante il y a plus de dix ans, car l'étude des structures tabulaires et celle des cibles confinées faisait appel à des techniques géophysiques spécifiques. Elle l'est moins aujourd'hui car la plupart des méthodes se sont adaptées à l'étude des structures 2D voire 3D : grande densité spatiale des stations de mesure et programmes de modélisation et d'inversion 2D et 3D ;
- **la nature de la cible** : elle est déterminante lorsqu'il s'agit de détection directe : minéralisation de forte susceptibilité magnétique, dense, conductrice, massive ou disséminée. Il existe une seule méthode par exemple, permettant de détecter directement des minéralisa-

tions disséminées, c'est la Polarisation Induite (PI), dite également Polarisation Provoquée (PP). La version spectrale de cette même technique semble offrir aujourd'hui la seule chance de séparer le graphite, stérile, marqueur électromagnétique puissant, des minéralisations utiles.

Ce dernier exemple démontre que quels que soient, l'environnement, la morphologie et la nature de la cible, c'est souvent la combinaison de deux, voire trois méthodes géophysiques différentes, qui constitue la solution la plus efficace. La figure 1 montre l'exemple de la détection des cheminées de kimberlite au Canada, où les deux techniques aéroportées, magnétisme et électromagnétisme, étaient indispensables.

À quel stade de l'exploration la géophysique intervient-elle ?

Elle intervient dans le cadre d'une méthodologie mise au point et bien rodée depuis des décades, sur tous les continents, à chacun des stades de l'exploration.

D'abord, la **cartographie géophysique** d'un territoire ou d'une région : Il s'agit le plus souvent de **géophysique aéroportée** : magnétisme toujours ou presque, radiométrie, électromagnétisme lorsque les conditions de surface sont favorables et, potentiellement, gravimétrie. Le Canada a été l'un des premiers pays à réaliser, avec les

deniers publics, la couverture aéromagnétique de presque tout son territoire à une échelle compatible avec l'exploration minière. Plus récemment, quelques gouvernements provinciaux ont lancé la couverture électromagnétique d'une partie de leur territoire. La Finlande termine aujourd'hui un levé exhaustif en électromagnétisme aéroporté. Dans le cadre d'inventaires miniers, la Communauté européenne a financé tout ou partie de plusieurs levés géophysiques aéroportés en Afrique. Ce sont là des données géophysiques de base qui constituent une aide précieuse à la cartographie géologique, comme il est montré sur la figure 2, et à la prise de permis par les opérateurs miniers internationaux.

Il existe également des travaux de **cartographie géophysique régionale et locale au sol**. La Tunisie, par exemple, réalise depuis une dizaine d'années, une couverture gravimétrique de la zone des diapirs, à raison d'une station par km².

Vient ensuite la **phase de reconnaissance** ou première phase d'exploration tactique. En combinaison avec la géochimie, la réflectivité spectrale infrarouge éventuellement lorsqu'il s'agit d'analyser les phases argileuses des altérations des grès et des roches du socle et, bien

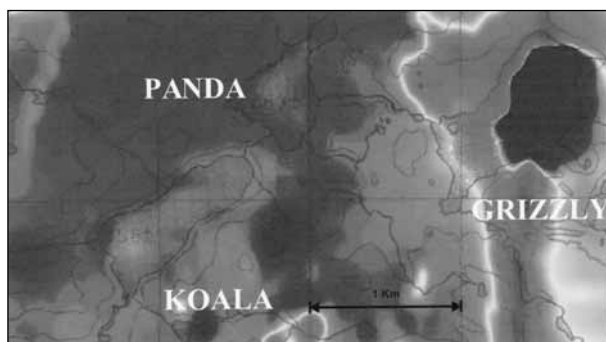
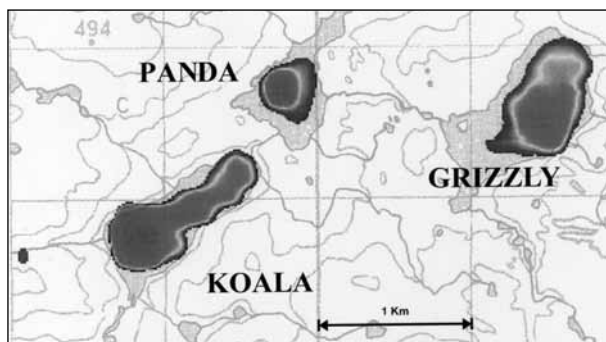


Figure 1. Signatures électromagnétique (1a) et magnétique (1b) de cheminées de kimberlite au Canada.

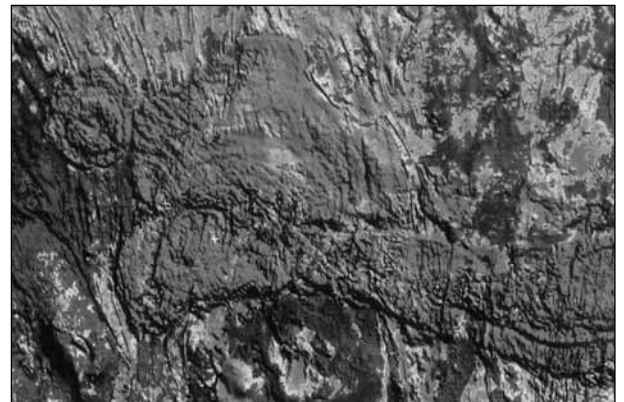


Figure 2. Bathurst, NSW, Australie – Cartes magnétique et radiométrique superposées (2a) – Comparaison avec la carte géologique (2b).

entendu, en étroite synergie avec les travaux de bibliographie, de terrain, de laboratoire et de réflexion du géologue, les détenteurs de permis réalisent de nouveaux levés géophysiques de reconnaissance. Bien souvent, ils mettent en oeuvre les mêmes méthodes que celles mentionnées ci-dessus, avec une maille de mesure encore large, mais plus serrée que celle des travaux réalisés par les Services géologiques. Rappelons quelles sont ces méthodes :

- en petit avion ou en hélicoptère : magnétisme presque toujours, radiométrie et électromagnétisme si les conditions de surface sont favorables, gravimétrie aéroportée de manière tout à fait exceptionnelle encore aujourd'hui ;
- au sol, gravimétrie si le contexte géologique le justifie. De nouvelles méthodes au sol, à grand rendement voient le jour actuellement, qui peuvent s'ajouter aux précédentes à ce stade de la reconnaissance (voir § 4 ci-dessous) : audio magnétotellurique à source naturelle ou contrôlée, éventuellement polarisation provoquée à larges mailles. Rappelons également l'objectif de ces travaux : détecter sur le permis, le maximum de cibles d'intérêt potentiel, liées soit à des structures géologiques intéressantes, soit à des indices directs.

Les levés aéroportés de reconnaissance sont généralement complétés par des travaux de *suivi géophysique au sol* avec des méthodes de la même famille, destinés à confirmer l'existence et la nature des anomalies et à sélectionner parmi toutes celles qui ont été détectées, les cibles prioritaires pour la phase suivante.

La phase suivante correspond à la **seconde phase d'exploration tactique** et à la **phase d'évaluation**, y compris la réalisation des sondages carottés systématiques. Il s'agit, à ce stade, de mobiliser toutes les ressources de la géophysique au sol, alliées de nouveau à la géologie de détail, la géochimie tactique et autres techniques d'investigation spécialisées, pour tenter de confirmer l'intérêt des « anomalies » retenues, puis implanter les forages de contrôle... et aboutir *in fine* à une première évaluation des réserves. La grille de mesure cette fois-ci est particulièrement fine : 2 ou 5 m entre stations sur des profils parallèles espacés de 10 à 20 m pour des cibles peu profondes ; 10 à 20 m entre stations sur des profils espacés de 20 à 50 m pour des objectifs profonds.

Selon le type de gisement, comme il a été dit ci-dessus, et les profondeurs d'investigation nécessaires, on choisit parmi les grandes familles de méthodes géophysiques, les techniques les plus adaptées. Faisons de nouveau un rapide tour d'horizon de ces techniques (1) gravimétrie et magnétisme au sol qui donneront lieu à des

cartes transformées et à des inversions 2D ou 3D, (2) électromagnétisme fréquentiel ou temporel à émetteur mobile ou à émetteur fixe selon la profondeur, qui donneront lieu également à modélisation et/ou inversion 2D et 3D, (3) polarisation provoquée alliée à la résistivité, (4) sismique réflexion à haute résolution dans des contextes bien particuliers. À partir des modèles 2D et 3D ainsi obtenus, des forages de contrôle seront implantés, forages carottés toujours, obliques la plupart du temps.

Ces forages seront toujours valorisés par des diagraphies spécialisées et quelquefois par la géophysique entre forages et entre forages et surface. On fait classiquement appel aux techniques électromagnétiques et magnétiques de forage; la PP de forage est moins classique. L'un des objectifs de ces mesures est de tenter de détecter des cibles manquées par le forage et situées à sa proximité.

Une réinterprétation quantitative des données de géophysique de surface pourra alors être tentée à la suite des résultats des forages et des diagraphies, qui conduiront à autant de contraintes nouvelles à intégrer dans les processus d'inversion.

Pour **l'exploitation et le développement des gisements**, les mêmes techniques que précédemment, en surface et dans les forages, voire de nouvelles techniques développées depuis la phase d'exploration et qui ne demandent qu'à être validées, seront mises en oeuvre. L'objectif est double : (1) augmenter notablement le taux de succès des nouveaux forages et (2) découvrir des extensions du gisement, donc augmenter les réserves, à proximité de la mine en exploitation.

Quelques développements récents

En **électromagnétisme aéroporté**, deux améliorations étaient souhaitées :

1. augmenter la profondeur maximale d'investigation : cela passait nécessairement par l'augmentation de la puissance de l'émetteur des méthodes **temporelles** mises en oeuvre en **avion** ; la réponse est le **Mégatem** développé par Geotrex - Ottawa, qui appartient désormais au groupe Fugro¹ ;
2. adapter les méthodes **temporelles** à leur mise en oeuvre en **hélicoptère** : c'est le **SKYTEM** développé par SkyTEM Aps. de Aarhus au Danemark et proposé par Novatem², installée à Montréal ; l'exemple d'une carte obtenue récemment au Québec est présenté sur la figure 3.

La **gravimétrie aéroportée** devrait prochainement devenir un outil de reconnaissance rapide des permis miniers de grandes dimensions et d'accès au sol difficile,

Je remercie tout particulièrement les collègues géophysiciens qui m'ont permis de présenter ces résultats :

1. Mike Carson – Président - Fugro Airborne Surveys Corp. – Canada - www.fugroairborne.com
2. Pascal Mouge – Président - Novatem – Canada - www.novatem.com

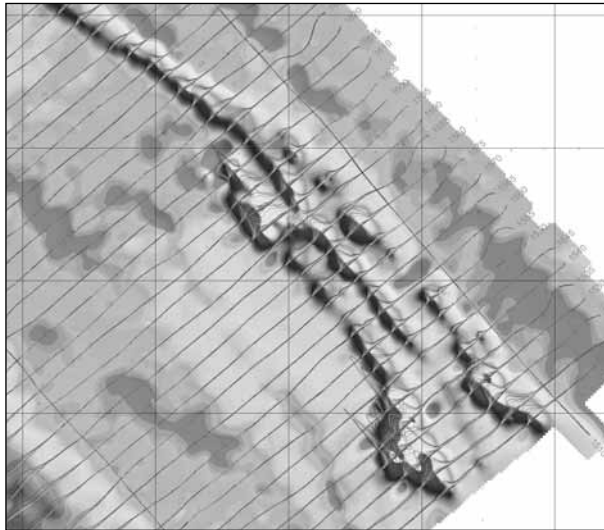


Figure 3. Résultats de SKYTEM au Québec. Anomalies conductrices de type « filon ».

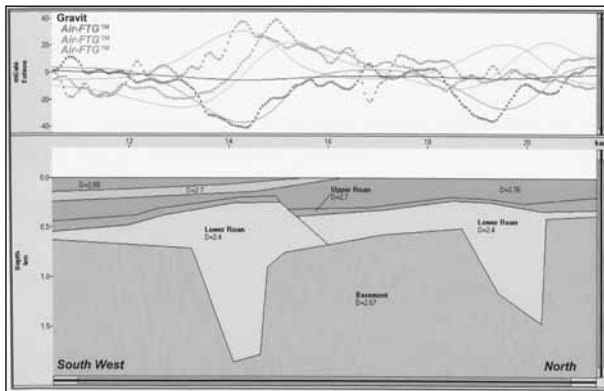


Figure 4. Gravimétrie aéroportée : modèle géologique : comparaison des réponses expérimentales et synthétiques.

lorsque les conditions géologiques sont favorables. La mise en œuvre des premiers tests systématiques par Anglo-American³, en Afrique, et les premiers résultats quantitatifs ont été présentés dans l'un des articles du numéro Spécial « 40 ans » de "Géologues" (n° 146, septembre 2005, pp14 – 17). Ils sont présentés de nouveau sur la figure 4.

L'audio magnétotellurique à source contrôlée (CSAMT) est la méthode électromagnétique fréquentielle au sol, qui permet de réaliser une tomographie de résistivités 2D ou 3D jusqu'à des profondeurs maximales de l'ordre de 1000 m si nécessaire, avec une résolution latérale et verticale inégalée, sans prétendre rivaliser avec la sismique réflexion bien entendu ! C'est à la fois une technique de détection directe comme le montre la figure 5, aimablement mise à notre disposition par la société Zonge⁴ et un outil de cartographie géologique. Les développements récents concernent l'étude multicomposantes et l'inversion des données.

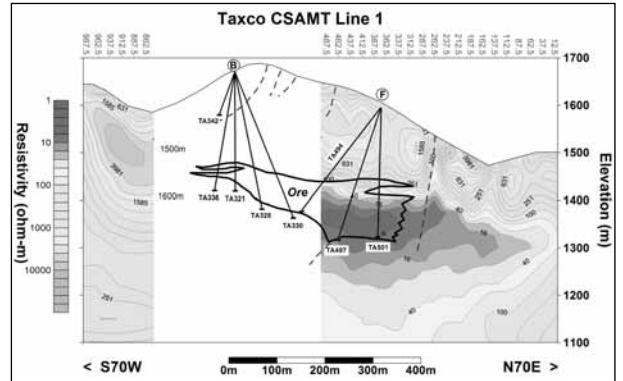


Figure 5. Superposition des résultats de l'inversion CSAMT 2D et de la géométrie du corps minéralisé reconnu après les forages.

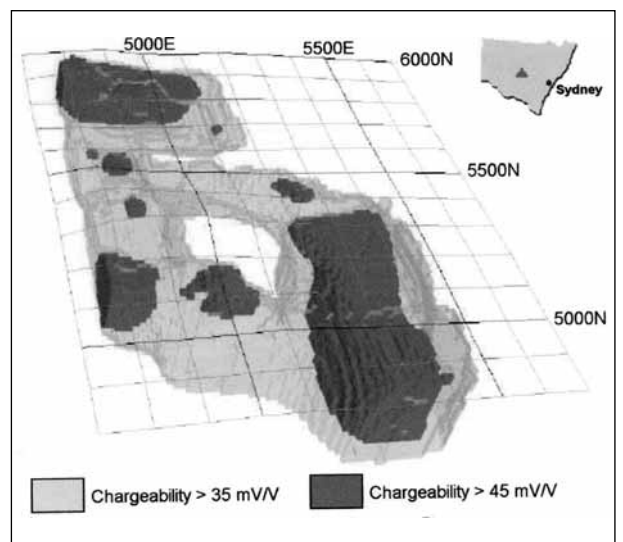


Figure 6. Mine de Copper Hill, Australie : tomographie de polarisation provoquée. Bloc 3D de « chargeabilité ».

La tomographie de résistivité et de polarisation provoquée (PP) permet de réaliser une tomographie 2D ou 3D de résistivités et éventuellement de PP, jusqu'à des profondeurs maximales de l'ordre de 100 m, moyennant une logistique quelque peu lourde. La figure 6 montre l'exemple d'une cartographie 3D de la « chargeabilité » obtenue sur le site de la mine de Copper Hill en Australie. Cet exemple est extrait du Manuel du logiciel Res3DINV réalisé par M.H.LOKE. Une présentation détaillée de l'article correspondant (Denne et al., 2001) existe sur le site : www.arctan.com.au.

La polarisation induite spectrale a été réintroduite récemment par Anglo-American³, comme outil de discrimination entre le graphite et les minéralisations utiles, avec un certain succès. Les premiers résultats ont été présentés dans l'article déjà cité du numéro spécial « 40 ans » de "Géologues".

3. Lassina Zerbo – Directeur – CID – CTBTO – Vienne – Autriche (ex Anglo-American) - Lassina.Zerbo@ctbtp.org

4. Scott Ucuqhart – Directeur - Zonge Engineering & Research Organization – Tucson – Arizona – USA – www.zonge.com.

EXPLORER ET EXPLOITER LES MINES

L'application de la *sismique haute résolution* à l'exploration minière est exceptionnelle. Elle n'a d'intérêt que pour l'étude des séries sub-tabulaires, plus ou moins accidentées, en particulier, les séries sédimentaires. Elle est d'une résolution et d'une précision verticale inégalées. Un très bel exemple, qui a été présenté dans des congrès spécialisés, est celui de la mine de Neves-Corvo : une coupe géologique synthétique détaillée réalisée à la suite d'une campagne sismique et de forages est représentée sur la figure 7.

Conclusion

Pour conclure, il suffit de paraphraser Michel Rabinovitch dans son introduction des fiches métiers, en substituant le titre de géophysicien à celui de géologue : « Devenir géophysicien minier ?... Il y a un grand avenir dans cette profession ensorcelante, quelle que soit la spécialité que l'on va pratiquer... Partir vers l'île aux trésors... ».

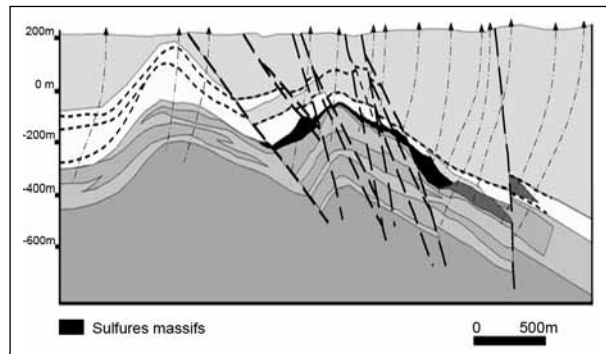


Figure 7. Mine de Neves-Corvo : exemple d'une coupe géologique réalisée à partir de la sismique réflexion haute résolution et de forages (modifiée d'après www.eurozinc.com/s/NevesCorvo.asp).