

# Prospection électromagnétique sur le site de l'ancienne mine de Goesdorf

**Steve Bornain**

Office de Contrôle des Matériaux et de l'Environnement  
8, ZI am Bruch  
L-3327 Crauthem  
steve.bornain@ocme.lu

## Zusammenfassung

Das Dorf Goesdorf ist bekannt die ehemalige Antimonmine auf seinem Territorium. Die Mine ist heutzutage nur schwer zugänglich, um die Mineralisierung an Ort und Stelle zu untersuchen. Hier kann die Geophysik helfen, die betreffende Mineralisierung zu verstehen und herauszuheben. Elektromagnetische Messungen wurden deshalb in der Nähe der

Antimonmine entlang sechs Nord-Süd-Profilen durchgeführt, die die möglichen mineralisierten Venen in Ost-West-Orientierung schneiden.

Die Messungen brachten Spots hervor, die Bereiche in der Tiefe markieren, die stärker leitfähig und daher möglicherweise mineralisiert sind.

## Abstract

The village of Goesdorf is known for the presence of a former antimony mine on its territory. Nowadays, the mine is difficult to access for the *in-situ* study of the mineralization and its extension. For this purpose, geophysics can help understand and single out the mineralization involved. Therefore, electromagnetic monitoring was carried out near the mine of

antimony following six North-South profiles intersecting the anticipated mineralized veins of East-West orientation.

This campaign allowed to highlight spots marking areas at depth of greater conductivity and thus possibly mineralized.

## Résumé

Le village de Goesdorf est connu pour la présence sur son territoire d'une ancienne mine d'antimoine, aujourd'hui difficilement accessible pour l'étude de la minéralisation en place et de son extension. A cet effet, la géophysique peut apporter une aide pour la compréhension et la mise en évidence des minéralisations en présence. Une campagne électromagnétique a dès lors été réalisée aux

abords de la mine d'antimoine et dirigée suivant six profils Nord-Sud recoupant ainsi les éventuels filons minéralisés d'orientation Est-Ouest.

Cette campagne a permis de mettre en évidence des spots marquant des zones de plus grande conductivité en profondeur et probablement minéralisées.



## Introduction

A la demande du Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg (Section Géologie/Minéralogie), la société OCME a réalisé une campagne de prospection géophysique sur le site de l'ancienne mine d'antimoine à Goesdorf, au Grand-Duché de Luxembourg. Cette prospection est basée sur l'utilisation d'une méthode électromagnétique. Elle vise à mettre en évidence les filons d'antimoine qui pourraient encore être présents sur le site et ses environs.

Le présent article traite de la théorie des méthodes de prospections électromagnétiques, des résultats obtenus et des conclusions qui peuvent être rédigées.

## Localisation du site de prospection

Le village de Goesdorf est situé dans la région septentrionale du Grand-Duché de Luxembourg à 6 kilomètres du barrage de Esch sur Sûre (Fig. 1).

Au point de vue géologique, ce village est localisé au sein de schistes compacts appartenant à la formation géologique du Siegenien supérieur, aujourd'hui appelé Praguien supérieur.

La mine d'antimoine est quant à elle, située sur la formation des Schistes de Stolzembourg appartenant à l'Emsien inférieur. Ces schistes sont bien stratifiés avec de rares bancs de grès quartzeux et quartzophyllades.

Il est apparu clairement lors de différentes études précédentes portant sur la minéralisation que celle-ci s'est mise en place par un jeu de failles d'orientation principale Est-Ouest et rejetée par des systèmes de failles Nord-Sud (campagnes de prospection magnétique et gravimétrique dirigées par Dr. S. Philipppo, Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg).

## Prospection électromagnétique

### Principe de la méthode

La prospection électromagnétique (en abrégé EM) est basée sur l'induction de courant électrique dans les corps conducteurs lorsque ceux-ci sont excités par un champ magnétique.

$$\nabla \times H = J = \sigma E$$

On peut présenter les choses à partir d'un modèle "générique" valable pour toutes les méthodes (fig. 2).

1. Le courant circulant dans la source produit un champ magnétique primaire  $H_p$ .
2. Ce champ primaire  $H_p$  induit des courants secondaires dans l'encaissant ( $I_e$ ) et la cible ( $I_c$ ). Ceux-ci seront d'autant plus importants que la cible et/ou l'encaissant seront conducteurs. Souvent, on va négliger l'induction dans l'encaissant.
3.  $I_e$  et  $I_c$  produisent un champ magnétique secondaire  $H_s$  enregistré par le récepteur. Ce champ secondaire est toujours beaucoup plus faible que le champ primaire qui est également enregistré par le récepteur.

### Analogie du Circuit RL

Pour quantifier la réponse du sous-sol à une excitation magnétique, nous allons faire une analogie avec un circuit RL traversé par un flux

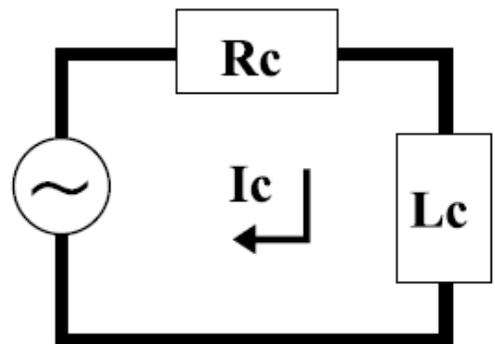


Fig. 3: Circuit RL analogue à l'induction EM (Blakely, 1995).

magnétique harmonique  $\phi_p$  de pulsation  $\omega$ . On suppose donc que tous les champs et courants sont de la forme  $e^{i\omega t}$ .

La force électromotrice d'induction dans le circuit est donnée par la Loi de Lenz :

$$e = -\frac{\partial\phi_p}{\partial t} = -i\omega\phi_p$$

L'impédance de notre circuit RL est donnée par  $R_c + i\omega L_c$ , donc on peut calculer le courant  $I_c$  avec la loi d'Ohm :

$$I_c(\omega) = \frac{e}{R_c + i\omega L_c} = -\frac{i\omega\phi_p}{R_c + i\omega L_c}$$

Introduisons la constante de temps du circuit  $\tau = L_c/R_c$ , on retrouve :

$$I(\omega) = \left[ -\frac{i\omega\tau}{1 + i\omega\tau} \right] \frac{\phi_p}{L_c} = A(\omega) \frac{\phi_p}{L_c}$$

Le terme  $A(\omega)$ , sans dimension, est la fonction de réponse du circuit.  $A(\omega)$  est complexe, on peut donc le décomposer en une partie réelle (en phase) et une partie imaginaire (en quadrature) :

$$\Re(A(\omega)) = \frac{-1}{1 + \frac{1}{\omega^2\tau^2}}$$

$$\Im(A(\omega)) = \frac{-1}{\omega\tau + \frac{1}{\omega\tau}}$$

Selon la valeur de  $\omega\tau$ , on retrouve trois domaines :

**1.  $\omega\tau \rightarrow \infty$**

Dans ce cas, la partie réelle de  $A = -1$  et la partie imaginaire tend vers 0. On a donc une réponse réelle et de signe opposé à l'excitation. Ceci revient à dire que le flux secondaire induit est opposé au flux primaire à l'intérieur du circuit. Reprenons l'expression pour l'impédance: on a  $R_c + i\omega L_c$ . Or, si  $\omega\tau$  tend vers l'infini, cela signifie que  $\omega$  est très grand et que donc le terme  $L_c$  (inductif) va dominer l'impédance. On dit que nous sommes dans un régime de haute induction. La self-inductance  $L$  n'est malheureusement pas une propriété physique caractéristique des roches et donc on ne peut pas caractériser les objets du sous-sol en haute induction.

**2.  $\omega\tau \rightarrow 0$**

Dans ce cas, la partie réelle de  $A$  tend vers 0 mais la partie imaginaire est plus élevée. On a donc une réponse imaginaire. Ceci revient à dire que le flux secondaire induit est déphasé (retardé) par rapport au flux primaire. Ici,  $\omega$  tend vers 0 et donc le terme  $R_c$  (résistif) va dominer l'impédance. Nous sommes dans un régime de basse induction. La résistance  $R_c$ , ou plutôt la résistivité  $\rho$ , est une propriété physique caractéristique des roches et donc on peut caractériser les objets du sous-sol en basse induction. Les instruments de prospection EM, dont l'EM34, sont tous des appareils à basse induction

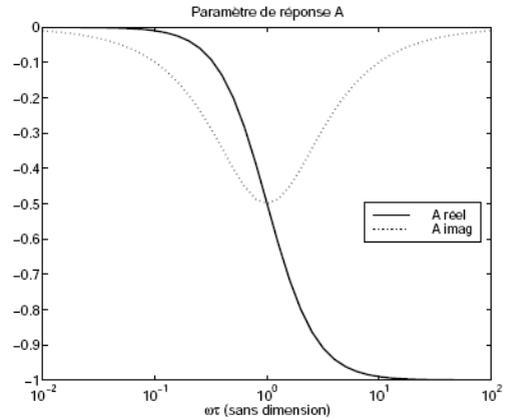


Fig. 4: Fonction de réponse  $A(\omega)$  (Blakely, 1995).

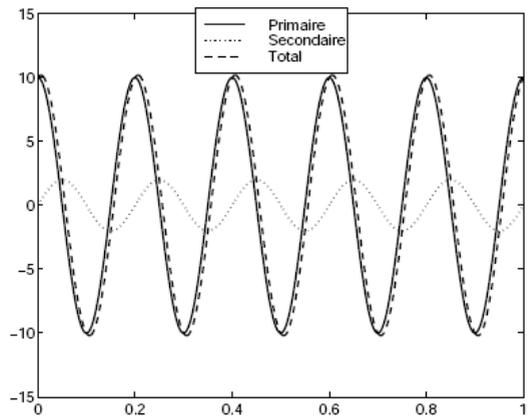


Fig. 5: Exemple de réponse en basse induction. Le déphasage permet la détection du signal secondaire même s'il est faible (Blakely, 1995).

3.  $\omega\tau = 1$

Ici, la partie réelle et la partie imaginaire de A sont égales et l'amplitude de A y est maximum. Le flux secondaire induit est donc d'amplitude maximum par rapport au flux primaire. Cette réponse maximale indique que le corps est en résonance avec l'excitation. Cette propriété peut apparaître prometteuse: en effet, on devrait pouvoir caractériser très bien le corps si on trouve sa fréquence de résonance. Qu'en est-il en pratique?

La résistivité électrique des objets varie sur plusieurs (6, voire plus) ordres de grandeur. Il en est donc de même pour la fréquence de résonance. Il semble alors difficile de concevoir un appareil qui balayerait six ordres de grandeur en fréquence, sans compter le temps que prendrait chaque point de mesure. Nous laisserons donc tomber cette approche pour des raisons pratiques.

Donc, seuls les appareils à basse induction seront intéressants. On note cependant que dans ce régime, la réponse est très faible. Pour être sûr de détecter cette réponse, on va se baser sur le retard (déphasage) de la réponse. La figure 5 illustre un

exemple de signaux primaire et secondaire, on voit que ce retard permet la détection aisée de la réponse malgré un signal secondaire faible

Dans le cas présent, nous nous intéresserons principalement à la composante de susceptibilité magnétique mesurée par l'appareil, qui met en évidence les masses ferriques.

Résultats

Appareillage

L'appareillage utilisé est un Geonics EM34. De manière à investiguer à une profondeur suffisante, les bobines source et réceptrice ont été espacées de 40 m. De cette manière, cette profondeur est de l'ordre de 60 m.

Les valeurs données sur les cartes de résultats (fig. 6) sont exprimées en mS/m.

Tab. 1: Localisation et valeurs de conductivité de chaque point de mesure des profils de prospection P01 à P06. (coordonnées X et Y en WGS84 UTM (UTM31N),  $\sigma_v$  et  $\sigma_h$  en mS/m)

P01				P02			
X	Y	$\sigma_v$	$\sigma_h$	X	Y	$\sigma_v$	$\sigma_h$
712208.57	5534216.14	8	8	712242.00	5534213.00	0	-2
712208.48	5534211.14	8	9	712241.91	5534208.00	-2	-2
712208.39	5534206.14	10	8	712241.83	5534203.00	-3	-3
712208.30	5534201.14	9	8	712241.74	5534198.00	-3	-3
712208.22	5534196.14	9	10	712241.65	5534193.00	-2	-5
712208.13	5534191.14	11	11	712241.56	5534188.00	-2	-1
712208.04	5534186.14	10	12	712241.48	5534183.00	-1	-1
712207.95	5534181.14	12	11	712241.39	5534178.01	-1	-2
712207.87	5534176.15	12	12	712241.30	5534173.01	-1	0
712207.78	5534171.15	19	21	712241.21	5534168.01	-4	-2
712207.69	5534166.15	22	23	712241.13	5534163.01	-4	-2
712207.61	5534161.15	52	26	712241.04	5534158.01	-6	-2
712207.52	5534156.15	21	10	712240.95	5534153.01	-6	-3
712207.43	5534151.15	7	6	712240.87	5534148.01	-5	-3
712207.34	5534146.15	8	7	712240.78	5534143.01	-1	-2
712207.26	5534141.15	7	8	712240.69	5534138.01	-4	-1
712207.17	5534136.15	20	16	712240.60	5534133.01	-1	-2
712207.08	5534131.15	19	18	712240.52	5534128.01	-3	-3
712206.99	5534126.15	18	20	712240.43	5534123.01	-3	0
712206.91	5534121.15	17	7	712240.34	5534118.01	-5	-1
712206.82	5534116.15	7	6	712240.25	5534113.02	1	-1
712206.73	5534111.16	6	6	712240.17	5534108.02	-1	0
712206.65	5534106.16	7	7	712240.08	5534103.02	1	0
712206.56	5534101.16	7	7	712239.99	5534098.02	5	0

Tab. 1: suite

P03				P05			
X	Y	$\sigma_v$	$\sigma_h$	X	Y	$\sigma_v$	$\sigma_h$
712267.00	5534207.46	0	1	712337.18	5534165.12	6	19
712267.00	5534202.46	-1	-2	712337.26	5534160.12	5	22
712267.00	5534197.46	0	-1	712337.35	5534155.12	6	52
712267.00	5534192.46	-2	0	712337.44	5534150.12	8	21
712267.00	5534187.46	-1	2	712337.53	5534145.12	7	7
712267.00	5534182.46	-21	1	712337.61	5534140.12	5	8
712267.00	5534177.46	0	6	712337.70	5534135.12	4	7
712267.00	5534172.46	-1	2	712337.79	5534130.12	5	20
712267.00	5534167.46	-1	1	712337.87	5534125.12	10	19
712267.00	5534162.46	-2	1	712337.96	5534120.12	4	18
712267.00	5534157.46	-2	0	712338.05	5534115.13	5	17
712267.00	5534152.46	0	2	712338.14	5534110.13	6	7
712267.00	5534147.46	-2	3	712338.22	5534105.13	7	6
712267.00	5534142.46	-15	12	712338.31	5534100.13	5	7
712267.00	5534137.46	1	4	712338.40	5534095.13	5	7
712267.00	5534132.46	2	1	712338.48	5534090.13	5	4
712267.00	5534127.46	1	1	712338.57	5534085.13	5	4
712267.00	5534122.46	-1	1				
712267.00	5534117.46	2	2				
712267.00	5534112.46	0	2				
712267.00	5534107.46	1	1				
712267.00	5534102.46	0	1				
712267.00	5534097.46	1	2				
712267.00	5534092.46	0	2				

P04				P06			
X	Y	$\sigma_v$	$\sigma_h$	X	Y	$\sigma_v$	$\sigma_h$
712292.00	5534210.04	4	1	712472.00	5534243.00	3	-20
712292.35	5534205.05	5	13	712473.63	5534238.27	2	-14
712292.70	5534200.06	4	9	712475.27	5534233.55	5	-12
712293.05	5534195.07	-4	8	712476.90	5534228.82	4	-14
712293.40	5534190.08	4	5	712478.53	5534224.10	5	-14
712293.74	5534185.10	4	5	712480.16	5534219.37	5	-20
712294.09	5534180.11	3	12	712481.80	5534214.64	4	-50
712294.44	5534175.12	4	7	712483.43	5534209.92	9	130
712294.79	5534170.13	4	6	712485.06	5534205.19	11	25
712295.14	5534165.14	2	8	712486.70	5534200.47	5	23
712295.49	5534160.16	2	4	712488.33	5534195.74	4	12
712295.84	5534155.17	-2	5	712489.96	5534191.02	8	12
712296.19	5534150.18	3	5	712491.59	5534186.29	11	6
712296.53	5534145.19	4	8	712492.66	5534181.40	10	1
712296.88	5534140.21	4	5	712493.73	5534176.52	8	8
712297.23	5534135.22	5	3	712494.80	5534171.64	8	5
712297.58	5534130.23	5	5	712495.87	5534166.75	8	4
712297.93	5534125.24	6	6	712496.94	5534161.87	5	4
712298.28	5534120.25	5	6	712498.01	5534156.98	7	5
712298.63	5534115.27	6	6	712499.17	5534152.12	5	5
712298.98	5534110.28	5	6	712500.34	5534147.26	4	5
712299.32	5534105.29	10	8	712501.52	5534142.40	7	6
712299.67	5534100.30	7	7	712502.69	5534137.54	6	6
712300.02	5534095.32	5	6	712503.76	5534132.66	3	5
				712504.00	5534127.67	8	5
				712504.23	5534122.67	4	9
				712504.47	5534117.68	5	7
				712504.70	5534112.69	5	5
				712504.94	5534107.69	2	5

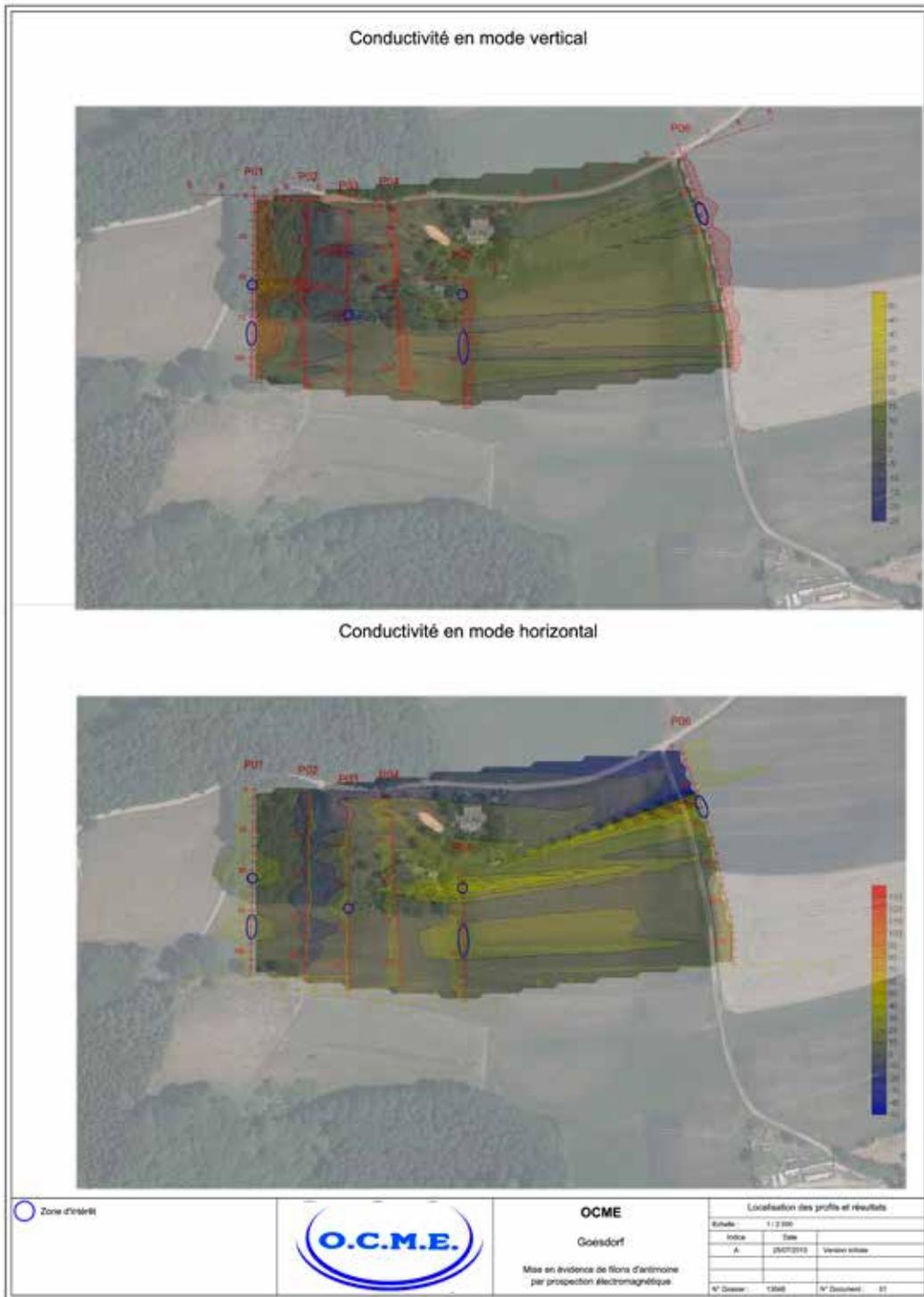


Fig. 6: Cartes de synthèse des anomalies électromagnétiques mesurées.

## Implantation

Les mesures ont été effectuées le long de profils traversant la zone minéralisée. Le pas de mesure est de 5 m. Les filons et lentilles d'antimoine étant orientés Est-Ouest, les six profils réalisés leur ont été positionnés perpendiculairement et réalisés du Nord vers le Sud, permettant ainsi d'une part la mise en évidence des filons au niveau de la mine elle-même et d'autre part leur extensions vers l'Est et vers l'Ouest (fig. 6).

## Résultats

Les mesures de la conductivité ont été prises dans le mode vertical et dans le mode horizontal. Les valeurs sont donnés dans le tableau 1.

## Conclusion

Ces résultats permettent une approche qualitative de la zone étudiée. Ils ont été reportés sur la carte reprise dans la figure 6, à la fois sous forme de graphiques en fonction de la position et sous forme de cartes d'iso-conductivité. Les échelles de conductivité sont identiques.

Pour le mode vertical, les valeurs positives sur les graphiques sont orientées vers la droite ; et vers la gauche pour le mode horizontal.

De manière globale, les valeurs sont faibles et très proches de 0. Des valeurs négatives sont même mesurées.

Des spots de conductivité sont mis en évidence en 6 endroits différents. Ils sont indiqués sous forme d'ellipses bleues sur la carte des résultats (fig.6).

P01, Spot à 55 m du point de départ du profile (coordonnées X=712207.61 et Y=5534161.15)

P01, Spot entre 80m et 90 m du point de départ du profile (coordonnées de X=712207.17 à X=712206.99 et de Y=5534136.15 à Y=5534126.15)

P03, Spot à 65 m du point de départ du profile (coordonnées X=712267.00 et Y=5534142.46)

P05, Spot à 10 m du point de départ du profile (coordonnées X=712337.35 et Y=5534155.12)

P05, Spot entre 35m et 50 m du point de départ du profile (coordonnées de X=712337.79 à X=712338.05 et de Y=5534130.12 à Y=5534115.13)

P06, Spot entre 35m et 45 m du point de départ du profile (coordonnées de X=712483.43 à X=712486.70 et de Y=5534209.92 à Y=5534200.47)

Ces spots marquent des zones où la conductivité plus élevée est induite par des zones plus conductrices en profondeur, probablement minéralisées.

## Hypothèses et propositions techniques

Suite à campagne électromagnétique, il apparaît que les filons minéralisés sont présents et mis en évidence sur le site de l'ancienne mine d'antimoine.

Dès lors, il serait intéressant de poursuivre la campagne électromagnétique en positionnant de nouveaux profils, à savoir :

- 2 profils à l'Ouest du profil P01 ;
- 2 profils entre les profils P05 et P06 ;
- 2 profils à l'Est du profil P06

Ces nouveaux profils permettraient de pouvoir mettre en évidence les occurrences des zones minéralisées ainsi que leurs extensions Est-Ouest.

Au niveau des zones de conductivités les plus marquées, il serait également intéressant de procéder à des forages de reconnaissance carottés permettant un recoupement des zones minéralisées, de mise en évidence du filon et de la possibilité de collecte d'échantillons minéralisés en vue de leur analyse ultérieure en laboratoire (diffraction des rayons X, étude microscopique, ...).

## Bibliographie

Blakely R.J. 1995. - Potential theory in gravity and magnetic application. Cambridge University Press, London, 441p.