

# L'effet de la géométrie sur la précision dans l'estimation de la profondeur d'un réseau de type pipeline avec la méthode magnétique

## The effect of the magnetic source's geometry on the accuracy of the depth estimation of a pipe using magnetic method

Pauline LE MAIRE<sup>1,2\*</sup>, Marc MUNSCHY<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CARDEM, France

<sup>2</sup>SOPRECO, France

<sup>3</sup>ITES (Institut Terre et Environnement, Strasbourg), France

**Résumé** Dans le secteur du BTP, le positionnement des réseaux est réglementé afin d'éviter les accidents. Il existe de nombreuses méthodes géophysiques pour aider à leurs positionnements comme l'électromagnétisme ou l'acoustique. Ces méthodes ont plusieurs inconvénients, par exemple la nécessité d'un accès au réseau afin d'injecter un signal ou une mise en place chronophage qui rend difficile la détection sur de très grandes surfaces. Dans ce travail, nous allons nous focaliser sur l'utilisation de la méthode magnétique pour la caractérisation de pipeline en domaine non urbain. Nous proposons une étude afin de quantifier l'effet de la géométrie sur la précision dans l'estimation de la profondeur. Les résultats obtenus pour trois méthodes basées sur des hypothèses de géométries différentes (3D/2D/hybride) seront comparés via une application sur des cas synthétiques. Les méthodes utilisées sont basées sur l'utilisation du signal analytique à deux et à trois dimensions.

**Abstract** In the construction industry, the 3D localization of pipe is regulated to avoid accidents. There are many geophysical methods to help in the 3D localization like electromagnetism or acoustic methods. The disadvantage of these methods is either the need to have access to the pipe in order to inject a signal, or time-consuming. In this work, we will focus on the use of the magnetic method for the characterization of pipeline in non-

---

\* Corresponding author: [pauline.le-maire@cardem.fr](mailto:pauline.le-maire@cardem.fr)

urban areas. We propose a study to quantify the effect of geometry on the accuracy of depth estimation. The results obtained for three methods based on different geometry assumptions (3D/2D/hybrid) will be compared via synthetic cases. The methods used are based on the use of two-dimensional and three-dimensional analytical signal.

## 1 Introduction

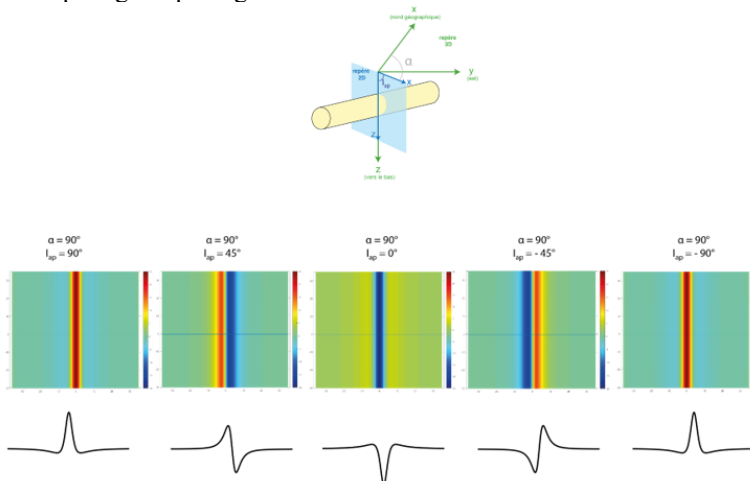
Afin d'éviter les accidents et les ruptures de réseaux, une réglementation existe pour classer ceux-ci en 3 catégories A, B et C en fonction de la qualité du positionnement. Ainsi un réseau sera classé en A si la localisation (dans l'espace) de celui-ci a une précision inférieure ou égal à 40 cm. Pour aider à leurs positionnements, les méthodes géophysiques sont employées, telles que l'électromagnétisme ou l'acoustique [1]. Ces méthodes ont plusieurs inconvénients, par exemple la nécessité d'un accès au réseau afin d'injecter un signal ou une mise en place chronophage qui rend difficile la détection sur de très grandes surfaces.

Cette étude s'intéresse à la méthode magnétique pour localiser des réseaux hors agglomération où il est possible de cartographier de grandes étendues. Des études ont déjà utilisé la méthode magnétique pour caractériser des canalisations [2][3], nous proposons de nous focaliser sur les effets des hypothèses concernant la géométrie des sources définies pour l'estimation des profondeurs.

## 2 Cas synthétiques

### 2.1 Modélisation d'un cylindre infini

La figure ci-dessous présente les cartes magnétiques obtenues pour cinq orientations différentes du champ magnétique. On observe des anomalies dont la répartition entre les parties positives (en rouges) et les parties négatives (en bleues) évolue en fonction de la direction du champ magnétique régional.



**Fig.1.** Schéma représentant le repère à deux dimensions (plan bleu) dans le repère à trois dimensions pour un cylindre infini. B) Cartes de l'intensité de l'anomalie magnétique pour un cylindre infini

orientés nord sud, placés à 4 m de profondeur. L'aimantation est supposée induite et cinq cas ont été modélisés pour une inclinaison apparente de 90°, 45°, 0°, -45° et 90°.

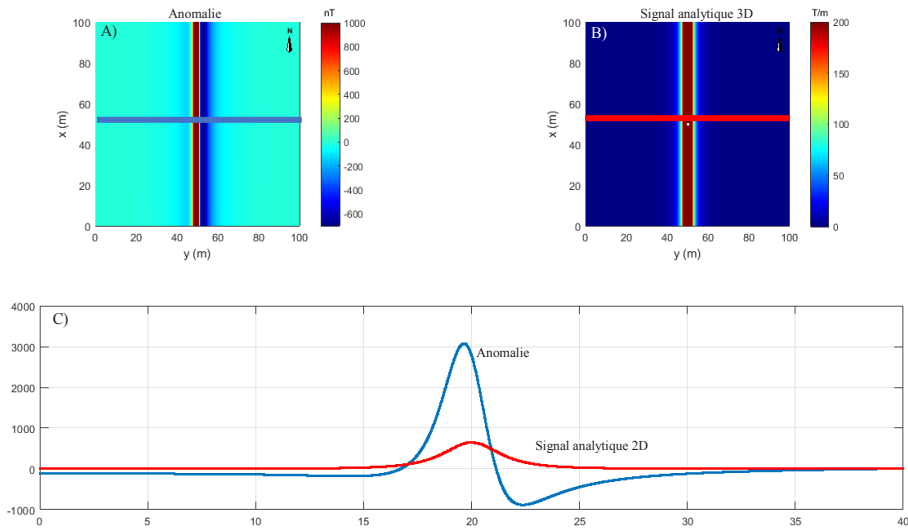
Nabighian (1972) a proposé l'application du signal analytique pour aider à l'interprétation de données magnétiques. En effet, son application et la visualisation de sa partie absolue permettent de transformer un signal asymétrique en signal symétrique, avec un maximum à l'aplomb de la structure 2D (profil), quelle que soit la direction de l'aimantation (Fig.2) [4].

$$A_s(c_x, c_z) = \frac{\partial T(c_x, c_z)}{\partial c_x} - i \frac{\partial T(c_x, c_z)}{\partial c_z} \tag{1}$$

Avec  $c_x, c_z$  les coordonnées de l'endroit où l'on réalise la mesure,  $a_x, a_z$  la localisation de la source

Une généralisation du concept a été proposée en 3D, en prenant la norme de la somme des dérivées partielles de l'anomalie [5] [6]

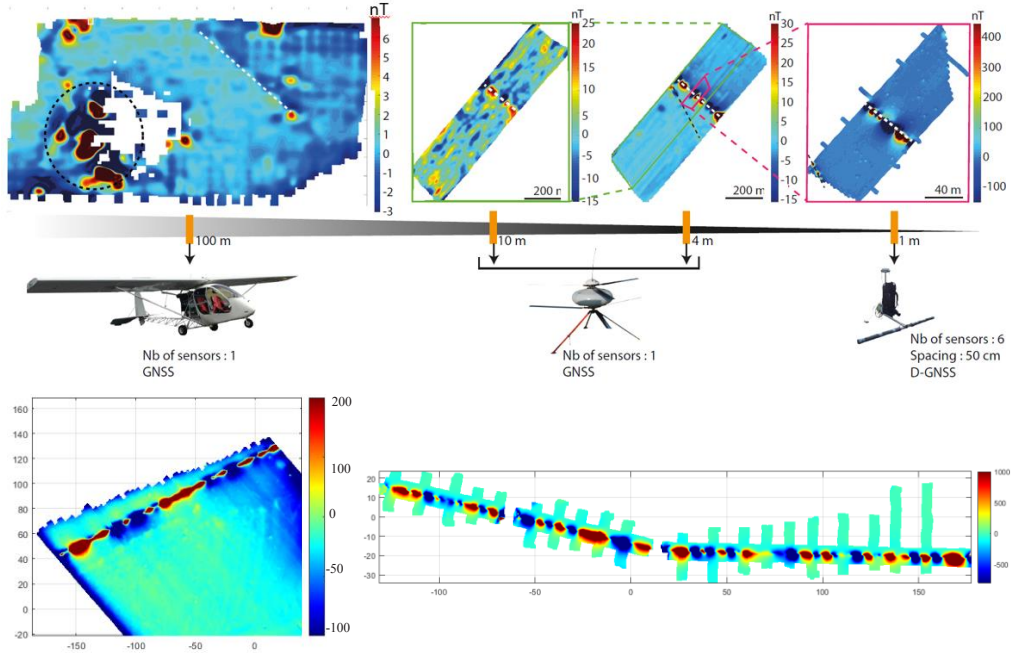
$$Sa_{vec} = \sqrt{\left(\frac{\partial T(c_x, c_y, c_z)}{\partial c_x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T(c_x, c_y, c_z)}{\partial c_y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T(c_x, c_y, c_z)}{\partial c_z}\right)^2} \tag{2}$$



**Fig. 2.** A) Carte de l'intensité de l'anomalie magnétique pour un cylindre aimanté orienté dans la direction nord-sud. B) Carte du signal analytique 3D (ou vectoriel) de la carte A. C) Profil de l'intensité de l'anomalie magnétique (en nT) en bleu et du signal analytique (en nT/m) en rouge.

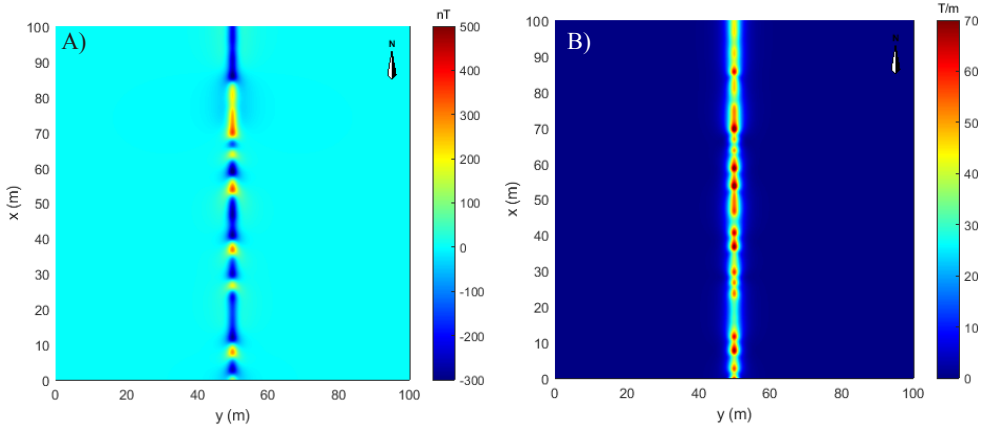
## 2.2 Modélisation d'un pipeline

La figure ci-dessous présente les données acquises à l'aplomb de différents réseaux. On constate que l'on n'a pas une unique anomalie linéaire comme dans les Fig.1-2, mais une succession d'anomalies magnétiques dipolaires.



**Fig. 3.** Cartes de l'intensité de l'anomalie magnétique à l'aplomb de réseaux acquise à différentes hauteurs et avec différents dispositifs.

Ainsi pour avoir une modélisation qui ajuste de façon correcte une carte de l'intensité de l'anomalie magnétique due à un pipeline, un modèle constitué de section de longueur variable (entre 3 et 5 m) et avec une aimantation aléatoire a été réalisé. La figure ci-dessous montre le résultat. On constate une répartition des anomalies magnétiques similaires au cas d'étude rencontré sur le terrain (Fig.3).



**Fig. 4.** A) Carte de l'intensité de l'anomalie magnétique pour un cylindre à 2 m de profondeur constitué de plusieurs sections aimantées orienté dans la direction nord-sud. B) Carte du signal analytique vectoriel de la carte A.

### 3 Estimation de la profondeur

#### 3.1 Hypothèse 2D / cylindre infini

Pour l'estimation de la profondeur d'une source à 2D, le choix s'est porté sur la méthode de la déconvolution eulérienne [7] combinée à l'utilisation de fonction complexe nommée anomalie magnétique complexe  $CMA^{(0)}$  [8]. A la différence de la définition eq 1., il s'agit non plus d'écrire une fonction complexe dépendant de deux variables réelles ( $c_x, c_z$ ), mais d'une fonction complexe dépendant d'une variable complexe ( $c = c_x + i c_z$ ). La réécriture permet d'obtenir un lien simple entre la fonction complexe  $CMA^{(0)}(c)$  et sa fonction dérivée  $CMA^{(1)}(c)$  [9] :

$$a = c + n \frac{CMA^{(0)}}{CMA^{(1)}} \quad (3)$$

Avec  $c = c_x + i c_z$  les coordonnées complexes de l'endroit où l'on réalise la mesure,  $a = a_x + i a_z$  la localisation de la source et  $n$  l'indice structural.

Ainsi, si l'on connaît l'indice structural de la source, la localisation et la profondeur sont directement obtenues. Dans le cas d'un cylindre infini l'indice structural est égal à 2.

#### 3.2 Hypothèse 3D / sphère

Dans le cas où l'on considère que notre source a une géométrie à trois dimensions, nous proposons d'utiliser le signal analytique d'une sphère pour estimer la profondeur [10].

$$SAv(x,y) = 3K \sqrt{\frac{5D^4 - 2r^2D^2 + r^4}{r^{12}}} \quad (4)$$

Avec  $K$  le moment dipolaire,  $r = \sqrt{(x - a_x)^2 + (y - a_y)^2 + (z - a_z)^2}$  et  $D = J_x R_x + J_y R_y + J_z R_z$  le produit scalaire de l'aimantation  $\mathbf{J}$  et du champ magnétique régional  $\mathbf{R}$ .

### 3.3 Solution hybride 2D/3D

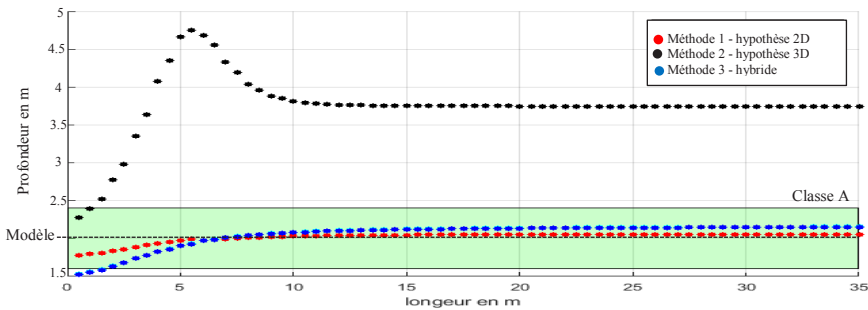
En reprenant l'équation 3, il est possible de poser :

$$c = a - n \frac{CMA^{(0)}}{CMA^{(1)}} \quad (5)$$

Il est possible d'estimer  $n$  et  $a$  en effectuant une inversion par moindre carré, c'est-à-dire en laissant libre l'indice structural et la position de l'objet.

### 3.4 Limite 2D/3D

Afin de comprendre où est la limite entre les hypothèses 2D et 3D et leurs erreurs sur l'estimation de la profondeur, un cas synthétique a été réalisé. Il s'agit d'une ligne aimantée placée à 2 m de profondeur. Les différentes méthodes vues précédemment ont été appliquées, afin d'analyser l'estimation de la profondeur pour différentes longueurs de section de 0.5 à 35 m. La figure ci-dessous montre les résultats obtenus. On constate que l'hypothèse 3D ne reste pas valide longtemps. En effet, pour un segment de longueur égale à 1 m, on est à la limite pour que l'estimation de la profondeur permette de classer en rang A le réseau. Pour des segments de longueur supérieur à 1 m, l'estimation de la profondeur est surestimée. Pour la méthode 2D, les profondeurs sont toujours dans la gamme de précision demandée et pour la méthode hybride, les résultats deviennent acceptables pour une longueur de section égale à 2 m.

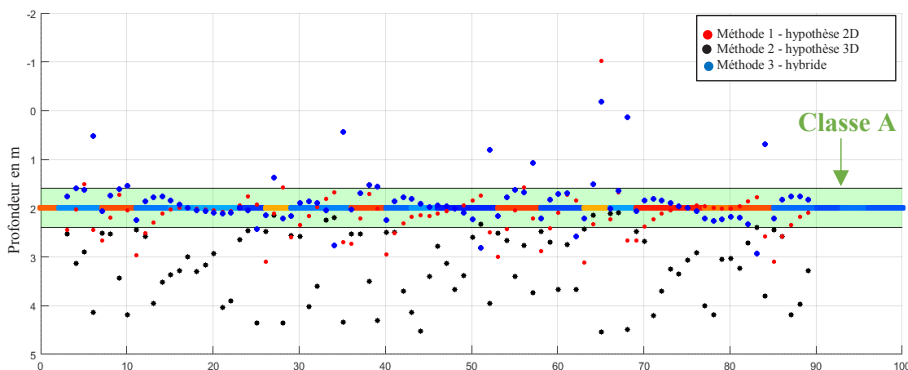


**Fig. 5.** Estimation de la profondeur pour les différentes méthodes présentées en fonction de la longueur de la section. La source est placée à 2 m de profondeur.

Il serait intéressant de réaliser d'autres modèles avec d'autres paramètres (aimantation et profondeur), afin de voir si ces observations sont représentatives du cas général. De plus, la signature d'un pipeline correspond à une somme des anomalies qui interfèrent entre elles et ainsi qui compliquent la tâche dans l'estimation de la profondeur.

## 4 Conclusion et perspectives

En conclusion, la figure ci-dessous combine l'ensemble des points discutés. L'estimation des profondeurs avec les trois méthodes a été appliquée sur le cas synthétique présenté en Fig.4. Pour ce faire 87 profils espacés de 1m ont été extraits pour les calculs des profondeurs pour les méthodes 2D et hybride.



**Fig. 6.** Profondeurs estimées pour les trois méthodes sur un modèle similaire à des données acquises à l’aplomb d’un réseau. Les sources ont été placées à 2 m de profondeur.

Pour la première méthode (2D), on a un écart moyen de 0.15 m par rapport à la profondeur réelle, dans 70 % des cas la profondeur a la précision permettant un classement en catégorie A. Pour la méthode reposant sur l’hypothèse 3D, l’écart moyen est important, de l’ordre de 1.18 m. dans uniquement 9 % des cas, la profondeur permet un classement en catégorie A.

Pour la méthode hybride, on a un écart moyen de 0.14 m., Dans 80 % des cas, la profondeur a une précision permettant un classement en catégorie A.

Contrairement, à la section précédente, c’est la méthode hybride qui donne les meilleurs résultats. L’étude va maintenant confronter les méthodes sur des jeux de données réelles, afin de voir si nos modèles sont bien représentatifs de la réalité.

## Références

1. Radiodetection, The theory of buried cable and pipe location. (2017)
2. M. Laichoubi, M. Munsch, S. Takillah, S. Decombe, V. Benet, A. Labrosse, D. Lefebvre, Pipeline Technology Conference, Berlin, Allemagne (2021)
3. L. Caifang, L. Dejun, J. Meng. Geophysics, **85**, 111-120 (2020)
4. M. Nabighian, Geophysics, **37**, 507-517 (1972)
5. M. Nabighian, Geophysics, **49**, 780-786 (1984)
6. W. Roest, J. Verhoef, M. Pilkington, Geophysics, **57**, 116-125 (1992)
7. D. Thompson, Geophysics **47**, 31–37 (1982)
8. P. Le Maire, M. Munsch, Geophysics, **83**, 1-13 (2018)
9. S. Brahimi, P. Le Maire, J.F. Ghienne, M. Munsch, Geophys. J. Int, **220**, 1447-1462 (2020)
10. A. Salem, D. Ravat, T.J. Gamey, K. Ushijima, J. Appl. Geophys., **49**, 231-244 (2002)