

DOCUMENT PUBLIC

***Cartographie précise de cavités souterraines par
localisation d'un dipôle magnétique basse fréquence***

Test sur une cavité karstique de la source du Loiret

B. Bourgeois

**décembre 2000
BRGM/RP-50614-FR**



Mots clés : Géophysique, Électromagnétisme, Localisation, Profilage, Inversion 3D, Cavités, Karsts, Loiret.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Bourgeois B. (2000) - Cartographie précise de cavités souterraines par localisation d'un dipôle magnétique basse fréquence. Test sur une cavité karstique de la source du Loiret. BRGM/RP-50614-FR, 47 p., 19 fig.

© BRGM, 2000, ce document ne peut être reproduit en totalité sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

À la demande de P. Albéric (université d'Orléans), et en collaboration avec le club « Spéléologie Subaquatique Loiret », un essai méthodologique de localisation précise d'une cavité souterraine par la méthode dite du dipôle magnétique oscillant a été réalisé dans le système karstique du Loiret, sur les emprises du parc floral d'Orléans.

La méthode consiste à disposer un dipôle magnétique basse fréquence dans une cavité accessible, et à localiser cet émetteur par profilage du champ magnétique alternatif en surface.

La méthode classique a été modernisée en utilisant la mesure 3-composantes fournies par le nouvel équipement d'électromagnétisme en forage « SlimBoris » (ou son prototype « Arlett »), et par l'utilisation d'un logiciel d'inversion 3D (« Optem »), tous deux développés dans le cadre d'un récent projet de recherche européen à vocation minière (GeoNickel).

La précision de positionnement obtenue est conforme à la précision espérée, à savoir 1 à 2 % de la profondeur de la cavité, contre 5 à 10 % avec la méthode classique. L'essai a en effet permis de positionner la cavité avec une précision en X , Y , Z de l'ordre de 30 cm, à environ 17 m sous la surface. Noter que la cavité utilisée pour ce premier test était proche de l'entrée du système karstique (moins de 20 m du bouillon en projection horizontale), et que le positionnement obtenu n'apporte donc pas d'information nouvelle sur la cartographie de ce système. L'expérience permet seulement de valider la méthode, de voir ses limites et d'évaluer les problèmes pratiques.

La nouvelle mise en œuvre est très souple : contrairement à la méthode classique, elle ne nécessite aucune contrainte sur l'orientation de l'émetteur souterrain, et les stations de surface peuvent être disposées de manière quelconque (ligne brisée, intervalle irrégulier) et en nombre relativement réduit (une dizaine).

Les rendements qui en résultent sont importants : hormis les questions de disponibilité et de réglementation des plongeurs, une équipe de deux personnes peut cartographier, dans les conditions du Parc floral, environ trois positions d'émetteur par journée de terrain. Une fois réglés les problèmes généraux de compilation (système de coordonnées, déclinaison magnétique...), l'interprétation demande ensuite environ une demi-journée de géophysicien par position d'émetteur.

Grâce à la relative proximité de l'entrée du réseau, le câble diagraphie, qui sert à l'alimentation et à la commande à distance de la sonde émettrice, n'a pas posé de gros problèmes de mise en place pour cette première expérience, malgré les craintes initiales des plongeurs. Toutefois, pour une opération à plus grande distance de l'entrée, une source autonome, fonctionnant sur batterie 12V par intervalles de temps programmables, a été imaginée et pourrait être fabriquée pour un coût relativement faible.

Sommaire

Introduction	7
1. Considérations théoriques	11
2. Modélisations numériques	15
3. Déroulement des mesures	23
4. Essai méthodologique au Parc floral	25
4.1. Moyens mis en œuvre	26
4.2. Les mesures sur le site du Parc floral	27
4.2.1. Enregistrement Arlett avec dipôle émetteur horizontal	28
4.2.2. Enregistrement SlimBoris avec dipôle émetteur horizontal	30
4.2.3. Enregistrement SlimBoris avec dipôle émetteur vertical	31
4.3. Discussion sur la précision de la méthode	32
Conclusion	43
Remerciements	45
Bibliographie	47

Liste des figures

Fig. 1 - Inversion du champ magnétique créé par un dipôle magnétique horizontal orienté selon Ox	17
Fig. 2 - Inversion du champ magnétique créé par un dipôle magnétique horizontal orienté selon Oy	17
Fig. 3 - Inversion du champ magnétique créé par un dipôle magnétique orienté verticalement	18
Fig. 4 - Inversion du champ magnétique créé par un dipôle magnétique orienté selon le vecteur (3,1,1)	18
Fig. 5 - Inversion du champ magnétique créé par le dipôle émetteur orienté selon le vecteur (3,1,1) avec les données réparties sur les deux profils croisés P0 et P1	19
Fig. 6 - Inversion du champ magnétique créé par le dipôle émetteur orienté selon le vecteur (3,1,1) avec les données réparties sur le profil anguleux bâti sur P0 et P1	19
Fig. 7 - Inversion du champ magnétique créé par le dipôle émetteur orienté selon le vecteur (3,1,1) avec restriction du profil anguleux à trois points proches de l'aplomb de la source	20
Fig. 8 - Inversion du champ magnétique créé par le dipôle émetteur orienté selon le vecteur (3,1,1) avec profil s'étendant sur 120 m de part et d'autre de la source au pas de 30 m	20
Fig. 9 - Inversion du champ magnétique créé par le dipôle émetteur orienté selon le vecteur (3,1,1) avec profil limité à 3 points s'étendant sur 100 m d'un seul côté de la source (profondeur oblique ≈ 77 m)	21
Fig. 10 - Schéma de mise en œuvre de la méthode du dipôle magnétique oscillant et situation des profils de mesure sur le site du parc floral d'Orléans (projection Lambert II étendu)	28
Fig. 11 - Inversion des mesures Arlett à 70 Hz pour le dipôle émetteur subhorizontal	34

Fig. 12 - Inversion des mesures Arlett à 70 Hz pour le dipôle émetteur subhorizontal avec restriction des données au seul profil A	35
Fig. 13 - Inversion des mesures Arlett à 70 Hz pour le dipôle émetteur subhorizontal avec restriction des données aux profils B, C et D	36
Fig. 14 - Inversion des mesures Arlett à 70 Hz pour le dipôle émetteur subhorizontal avec restriction des données aux profils C et D	37
Fig. 15 - Inversion des mesures Arlett à 70 Hz pour le dipôle émetteur subhorizontal avec restriction des données au seul profil D	38
Fig. 16 - Inversion des mesures SlimBoris à 70 Hz pour le dipôle émetteur subhorizontal	39
Fig. 17 - Inversion des mesures SlimBoris à 70 Hz pour le dipôle émetteur subhorizontal avec restriction des données aux profils B, C et D	40
Fig. 18 - Inversion des mesures SlimBoris à 70 Hz pour le dipôle émetteur subvertical	41
Fig. 19 - Inversion des mesures SlimBoris à 70 Hz pour le dipôle émetteur subvertical avec restriction des données aux profils B, C et D	42

Introduction

Les chenaux karstiques du Loiret en amont de sa source (ou « bouillon ») sont connus partiellement par les travaux d'exploration effectués par le club « Spéléologie Subaquatique du Loiret » (P. Boismoreau, P. Albéric, J. Munerot) sur les emprises du parc floral d'Orléans. La topographie des zones explorées est connue seulement de manière incertaine par des relèvements à la boussole et au topofil effectués par les plongeurs. Ces relèvements s'avèrent difficiles en raison du milieu subaquatique, de la turbidité de l'eau (visibilité 2-3 m) et de la grande sinuosité des tracés (dans les trois directions).

Cet état de fait peut se traduire par des erreurs cumulées importantes à grande distance de l'entrée du réseau : une erreur d'azimut de 3°, correspondant à une erreur de positionnement transversal de 5 % de la distance à l'origine, et une erreur du même ordre sur le positionnement radial sont tout à fait envisageables. Sachant que le réseau exploré s'étend sur plus d'un kilomètre en direction de la station d'épuration et au-delà, l'erreur peut très bien atteindre 30 m au niveau de cette station, et plus de 50 m en fin de réseau. Sachant d'autre part, que les spéléologues découvrent régulièrement de nouvelles salles, parfois en des zones critiques pour la sécurité publique, il paraît fondamental de chercher à réduire cette incertitude.

Dans cette optique, P. Albéric, hydrogéologue de l'université d'Orléans et plongeur spéléologue, a contacté le BRGM en juin 2000 pour essayer de trouver une méthode géophysique permettant de préciser la cartographie du réseau en quelques points de calage caractéristiques (ex. le centre d'une salle ou un croisement de galeries).

J'ai proposé d'utiliser, en la modernisant, la méthode dite du dipôle magnétique oscillant (Baudouin *et al.*, 1969 ; Rouaud et Rogin, 1969 ; Wait, 1971), qui consiste à disposer un émetteur magnétique basse fréquence dans une cavité accessible et à le repérer par profilage magnétique en surface. Cette méthode est justement destinée à localiser avec précision toute cavité souterraine d'accès difficile dont on ne peut déterminer la position par topographie classique.

Des appareils commerciaux basés sur ce principe existent pour le traçage des conduites souterraines non métalliques (ex. société Radiodetection) mais leur profondeur d'investigation est limitée à une dizaine de mètres sous la surface.

Dans la méthode classique, on emploie une boucle émettrice de quelques mètres de diamètre (ex. 3 m) disposée horizontalement dans la cavité (donc équivalente à un dipôle magnétique vertical, ou DMV) et on repère en surface le maximum du champ

vertical. Celui-ci se trouve théoriquement à l'aplomb du centre de la boucle quand celle-ci est parfaitement horizontale, ce qui est difficile à garantir en pratique. L'incertitude obtenue est de l'ordre de 5 à 10 % de la profondeur de la cavité (ex. 2,5 à 5 m pour une cavité à 50 m sous terre).

J'ai proposé d'améliorer cette méthode de trois façons :

- en utilisant la mesure triaxiale fournie par le nouvel équipement d'électromagnétisme (EM) en forage « SlimBoris » (IRIS), ou son prototype « Arlett » (BRGM) ;
- en employant l'émetteur de forage du système SlimBoris ;
- en réalisant l'interprétation à l'aide du logiciel d'inversion 3D « Optem » développé au BRGM pour l'EM en forage¹.

La mesure triaxiale orientée fournie par les sondes réceptrices 3-composantes de type Arlett (Bourgeois *et al.*, 1999) ou SlimBoris (Alayrac *et al.*, 1999) apporte en effet des informations bien plus riches que la seule mesure verticale utilisée dans la méthode classique. Nous verrons en outre qu'elle permet de disposer les stations de mesure de manière quelconque en surface.

L'émetteur de forage du système SlimBoris est un solénoïde d'environ 1 m de long, contenu dans une sonde étanche de 2 m de long, alimenté et commandé depuis la surface par le câble diagraphie (jusqu'à 1 km de long). Son moment magnétique (environ 230 Am² à 70 Hz) donne un rapport signal/bruit suffisant jusqu'à plus de 50 m de profondeur. Cet émetteur devrait donc apporter un grand confort d'utilisation, malgré certaines craintes des plongeurs concernant la mise en place du câble.

Le logiciel d'inversion « Optem », développé pour l'interprétation des mesures EM triaxiales en forage, est basé sur des modèles simples tels que dipôles ou filaments de courant en espace infini homogène (Bourgeois *et al.*, 2000). Son usage permet à la fois une grande souplesse lors de l'acquisition des données et une précision de localisation accrue.

En effet :

- l'approche par inversion ne requiert pas de connaître avec précision l'orientation de l'émetteur, puisque cette information est déterminée par l'inversion en même temps que sa localisation ;
- elle ne nécessite pas d'avoir les mesures sur un profil rectiligne au-dessus de la source, ce qui est souvent difficile en environnement urbain : quelques points de mesure à pas irrégulier sur une ligne brisée passant dans la zone de l'émetteur sont suffisants ; il n'est pas nécessaire que le profil passe à l'aplomb de la source, ni de resserrer le pas dans la zone du maximum de réponse comme dans l'approche classique ;

¹ SlimBoris et Optem sont des développements récents issus du projet GeoNickel, projet européen d'exploration minière (1996-1998). Arlett est un développement plus ancien issu du projet « Ceinture Sud Ibérique » (1993-1995).

- l'approche par inversion est celle qui lisse le mieux le bruit et les erreurs de mesure en les répartissant sur l'ensemble des données ;
- enfin cette approche est très rapide : l'inversion proprement dite d'un jeu de données prend quelques secondes contre plusieurs heures en interprétation classique, et ce pour un résultat bien plus précis !

Dans ces conditions, la précision relative annoncée était de l'ordre de 1 % de la profondeur² (soit 0,5 m à une profondeur de 50 m) tant que les données ne seraient pas trop bruitées, soit vraisemblablement jusqu'à 50 m de profondeur et peut-être plus.

Des modélisations numériques préliminaires ayant confirmé l'intérêt théorique de cette méthode, un financement exceptionnel a été accordé par la Direction de la Recherche pour réaliser un essai méthodologique sur le site du Parc floral.

Les objectifs de ce test étaient multiples :

- s'assurer que les systèmes de forage SlimBoris ou Arlett sont bien utilisables dans cette configuration de mesure de surface, et inventorier les éventuels problèmes pratiques (ex. mise en place du câble d'alimentation dans les boyaux étroits et tortueux) ;
- confirmer la souplesse opérationnelle par rapport à la méthode classique (disposition de la source, implantation des stations) ;
- estimer la productivité de la méthode ;
- entériner la procédure d'inversion avec « Optem » ;
- confirmer la précision de localisation du dipôle source.

Ces objectifs dépassent largement le cadre de la résurgence du Loiret, et la méthode proposée pourrait s'appliquer à tout réseau de cavités souterraines d'accès difficile dans lequel la topographie classique (par théodolite) n'est pas envisageable ou est trop coûteuse.

² Il s'agit très exactement d'un pourcentage de la distance oblique entre l'émetteur et le profil de mesure. On voit donc que le seul inconvénient de déporter le profil trop loin de l'aplomb de la source est de faire augmenter l'incertitude absolue de positionnement.

1. Considérations théoriques

À une distance électriquement faible (c'est-à-dire petite devant l'épaisseur de peau δ dans le sol, et *a fortiori* petite devant la longueur d'onde λ_0 dans l'air), le champ d'un dipôle alternatif est donné par les formules statiques (voir ci-dessous), ou « champ dans le vide ».

On rappelle que l'épaisseur de peau dans le sol est donnée par la formule :

$$\delta \approx 503 \sqrt{\rho / f} , \quad (1)$$

où f est la fréquence et ρ la résistivité « moyenne »³ du sol entre la surface et le boyau à localiser.

Pour une résistivité moyenne de l'ordre de 100 ohm.m, à une fréquence de l'ordre de 100 Hz on a une épaisseur de peau de l'ordre de 500 m. On voit donc que jusqu'à une profondeur de l'ordre de 50 m, l'approximation statique est parfaitement justifiée⁴.

Bien que cette profondeur soit déjà suffisante pour bon nombre d'applications, on notera qu'elle ne représente pas la limite de validité de notre technique. On peut montrer, en effet que l'inversion du champ en phase par un dipôle statique (*i.e.* dans le vide) n'est que faiblement affectée par la conductivité du sol, en ce qui concerne la localisation du dipôle, tant que la profondeur reste inférieure à une demi-épaisseur de peau⁵ (Wait, 1971), soit jusqu'à 250 m à 100 Hz dans un terrain à 100 ohm.m. On peut donc affirmer, sans crainte, que l'inversion dans le vide est parfaitement valide jusqu'à la portée pratique des équipements dont nous disposons aujourd'hui, qui est de l'ordre de 50 à 200 m selon le récepteur utilisé.

Afin de pouvoir comparer le système SlimBoris et son prototype Arlett, nous avons adopté une fréquence de mesure de 70 Hz, qui est la plus basse fréquence commune aux deux systèmes. De toute façon, une seule fréquence plus basse est proposée par SlimBoris (35 Hz), mais cette fréquence est à éviter en raison d'un niveau de bruit trop élevé à la réception. La fréquence choisie est donc un peu plus favorable que la fréquence 100 Hz utilisée dans la discussion précédente, puisqu'elle correspond à une épaisseur de peau d'environ 600 m.

³ Il s'agit en fait de la moyenne des inverses des résistivités, *i.e.* des conductivités.

⁴ L'erreur liée à cette approximation est de l'ordre de $(r/\delta)^2$; elle est donc meilleure que le pour cent si r/δ reste inférieur à 0,1 (West and Macnae, 1991).

⁵ Ceci n'a pas pu être vérifié par manque de temps dans le cadre de cette étude, mais, dans une étude similaire (Suignard, 1997), on a pu constater une erreur de localisation de 5 % sur la distance au profil, à une distance de $0,4 \times \delta$, correspondant à 200 m dans les conditions ci-dessus.

Pour un dipôle magnétique⁶ de moment \vec{M} et de phase nulle (*i.e.* réel), placé en un point \vec{r}_0 , le champ magnétique quasi-statique \vec{H} produit en un point \vec{r} est la somme vectorielle d'une composante radiale \vec{H}_r et d'une composante orthoradiale \vec{H}_θ (il y a symétrie cylindrique autour de l'axe polaire) :

$$\vec{H}(\vec{r}) = \vec{H}_r(\vec{r}) + \vec{H}_\theta(\vec{r}) \quad (2)$$

où
$$\vec{H}_r(\vec{r}) = \frac{2[\vec{M} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_0)](\vec{r} - \vec{r}_0)}{4\pi r^5} \quad (3)$$

et
$$\vec{H}_\theta(\vec{r}) = \frac{[\vec{M} \wedge (\vec{r} - \vec{r}_0)] \wedge (\vec{r} - \vec{r}_0)}{4\pi r^5} \quad (4)$$

et où $r = \|\vec{r} - \vec{r}_0\|$. (Dans ces formules une variation temporelle en $e^{i\omega t}$ est sous-entendue.)

L'inconnue principale de notre problème est la position \vec{r}_0 de l'émetteur. Si le vecteur moment \vec{M} est parfaitement connu, en amplitude comme en orientation, il suffit théoriquement d'une seule mesure des trois composantes de \vec{H} en un seul point \vec{r} de la surface pour déterminer \vec{r}_0 .

Cependant, il n'est pas toujours facile de disposer l'émetteur dans une orientation canonique, ou de mesurer son orientation avec précision, particulièrement en milieu hostile ; de plus, dans certaines configurations (ex. émetteur autonome), la norme du moment (amplitude crête) n'est pas connue avec précision. De manière générale, \vec{M} est donc mal connu et doit être considéré comme une inconnue du problème. Dans ce cas, il faut théoriquement deux mesures triaxiales judicieusement disposées en surface pour résoudre nos six inconnues. En fait, à cause d'une possible ambiguïté dont nous reparlerons plus loin, le nombre minimal de mesures doit être en général de trois stations disposées en triangle.

En pratique, il est vivement recommandé d'acquérir au moins une dizaine de points car cela permet de lisser statistiquement les inévitables bruits et erreurs de mesure. Idéalement, ces stations seront réparties dans la zone de l'aplomb supposé du dipôle source (voir plus loin).

On notera que les coordonnées de tous les points \vec{r} de mesure doivent être connues en 3D (*i.e.* pas seulement en positionnement horizontal mais aussi en nivellement vertical), et que la précision de ces données doit être évidemment meilleure que celle espérée sur la détermination de \vec{r}_0 .

⁶ On rappelle que l'approximation dipolaire est valable avec une précision meilleure que le pour cent dès que la distance est supérieure à 5 fois la taille de l'émetteur, soit à partir de 5 m pour la sonde émettrice utilisée.

En outre, il faut impérativement que les axes de projection du champ soient strictement parallèles aux axes de la grille géographique utilisée (ex. Lambert II). Pour une détermination de \bar{r}_0 à 1 % de r , ceci suppose la connaissance de la déclinaison magnétique terrestre [$D_m = \text{angle} (\text{Ngéo} \rightarrow \text{Nmag})$] et de l'angle de convergence des méridiens [$C_m = \text{angle} (\text{Ngéo} \rightarrow \text{Ncarte})$] du lieu avec une précision de l'ordre de 0,1°.

On rappelle en effet que le champ \vec{H} est d'abord mesuré dans le repère intrinsèque de la sonde (variable), puis projeté dans le repère fixe défini par le Nord magnétique terrestre (Nmag, Emag, Bas), et enfin pivoté dans le trièdre géographique choisi (Ncarte, Ecarte, Bas) par rotation autour de la verticale d'un angle égal et opposé à la déclinaison magnétique apparente : [$D_a = \text{angle} (\text{Ncarte} \rightarrow \text{Nmag}) = D_m - C_m$].

2. Modélisations numériques

Les figures qui suivent montrent l'inversion du champ magnétique 3D synthétique créé par un dipôle magnétique source enfoui à $Z = 50$ m sous l'origine des coordonnées. (La profondeur apparente ou oblique est en fait de 58,3 m car les profils utilisés ne passent pas à l'aplomb de la source mais sont décalés latéralement de 30 m).

Le dipôle oscille à la fréquence de 100 Hz dans un terrain à 100 ohm.m. Dans ces conditions, l'épaisseur de peau est $\delta = 503$ m, donc la « profondeur électrique » de la source est faible ($Z/\delta \approx 0,1$, *i.e.* champ proche ou basse induction). Ceci entraîne que le champ en phase du dipôle sera très peu différent de celui dans le vide (mieux que 1 %), tandis que le champ en quadrature restera négligeable. Pour cette raison, l'inversion se fera sur les composantes en phase (composantes dominantes), et le modèle utilisé pour la reconstruction sera un dipôle magnétique dans le vide⁷.

Le champ est d'abord inversé sur un profil de mesure rectiligne (P0) situé à la surface du sol en $Y = 30$ m et s'étendant sur 250 m de part et d'autre de la source (au pas de 10 m). Le dipôle est orienté successivement suivant chaque axe de coordonnée, O_x , O_y , O_z (fig. 1 à 3), puis selon une orientation oblique proche de l'horizontale [vecteur (3,1,1) normé] (fig. 4)⁸.

L'étude de ces figures montre que, contrairement à une idée reçue, la qualité de la localisation ne dépend quasiment pas de l'orientation du dipôle émetteur. Curieusement, l'erreur la plus forte (2,7 cm) est obtenue pour le dipôle vertical⁹ (fig. 3), qui était pourtant jugé le plus performant dans la méthode classique. On ne voit pas ce qui a pu motiver cette idée reçue, car même en ne considérant que le champ vertical, le seul

⁷ Le logiciel « Optem » permet, bien entendu, de faire rayonner le dipôle dans un espace conducteur. Cependant, dans ce cas, la résistivité de l'hôte est un paramètre supplémentaire à inverser. A basse induction, la sensibilité à ce paramètre étant faible, son inversion conduit souvent à des itérations divergentes (en l'absence d'information *a priori* permettant de le contraindre durant l'inversion).

⁸ Noter que ces figures ont toutes la même présentation :

- la partie gauche montre la géométrie, selon les trois plans de projection, du dipôle réel (astérisque avec segment épais) et de sa reconstruction après inversion (carré avec segment tireté) : le symbole matérialise le centre du dipôle ; le segment donne son orientation. L'erreur globale sur la localisation est indiquée sur l'une des trois projections (ex. $\Delta \approx 1\text{cm} \approx 0,02\%$) ; les pourcentages s'entendent par rapport à la profondeur oblique (ici ≈ 58 m).
- la partie droite montre les graphes des trois composantes du champ magnétique inversé, *i.e.* les observations (astérisques), et l'ajustement qui est obtenu après inversion (courbes épaisses), avec le souci d'une échelle verticale identique pour les trois graphes. L'erreur d'ajustement des champs, $RMS(\%) = 100 \times \sqrt{\chi^2}$ (où χ^2 est l'erreur quadratique moyenne) est indiquée dans la légende des champs, au dessus de la courbe épaisse : elle est très faible (0,01 à 0,1 %) car les données simulées sont exemptes de bruit artificiel.

⁹ Pour expliquer ce comportement, il faudrait peut-être essayer de voir si l'émetteur vertical n'est pas le plus affecté par la réflexion du champ sur l'interface air/sol.

mesuré dans la méthode classique, et en rajoutant mentalement du bruit, la courbe n'est ni plus aiguë (ce qui définirait mieux la position) ni plus haute¹⁰ (ce qui la dégagerait mieux du bruit) pour l'émetteur vertical (fig. 3) que pour les émetteurs horizontaux (fig. 1 ou 2).

On notera à ce propos que les appareils commerciaux utilisés pour le traçage des canalisations non métalliques (ex. appareils de la marque « Radiodétection ») utilisent un dipôle émetteur horizontal et réalisent une mesure du champ magnétique horizontal, configuration qui correspond aux deux courbes de champ les plus hautes de la figure 1.

Pour clore le débat sur l'orientation idéale du dipôle émetteur, on notera (pour l'anecdote) que la configuration de la figure 2, où le dipôle est horizontal et perpendiculaire au profil de mesure, est la seule qui pourrait éventuellement faire apparaître une solution symétrique si le profil passait juste à l'aplomb de l'émetteur ($Y = 0$). En effet, d'après Bourgeois *et al.* (2000), une ambiguïté totale apparaît entre deux dipôles magnétiques symétriques par rapport au forage dès que l'un des dipôles est orthogonal au plan qui joint son centre au profil (supposé rectiligne). Cette ambiguïté disparaît dès que le profil est suffisamment différent d'une droite. De toute façon, l'ambiguïté n'est pas gênante dans la présente mise en œuvre car le dipôle symétrique est ici situé **au-dessus de la surface du sol**, et est donc évident à éliminer.

Sur la figure 5, le dipôle émetteur garde son orientation oblique [vecteur (3, 1, 1) normé], mais le profil P0 est doublé d'un profil perpendiculaire (P1) passant à $X = 30$ m. Sur les figures 6 et 7, ce couple de profils est progressivement dégénéré, d'abord en un profil anguleux formé de deux portions de profils (fig. 6), puis en trois points disposés à angle droit dans la zone de l'aplomb de la source (fig. 7).

Il ressort de tous ces modèles qu'avec des données sans bruit, on arrive toujours à déterminer de manière précise et non ambiguë la position et l'orientation du dipôle dès que l'on a au moins trois points de données.

Sur la figure 8, toujours avec l'émetteur oblique, on revient au profil P0, mais avec une extension de profil limitée à 120 m de part et d'autre de la source et avec un pas de mesure de 30 m. **Cette figure montre qu'un échantillonnage satisfaisant du champ magnétique est obtenu avec une extension de profil de l'ordre de 3 fois la profondeur oblique** (les données de $X = -90$ à $+90$ m contiennent en effet l'essentiel de l'information), **et avec un intervalle de mesure égal à environ la moitié de la profondeur oblique**, ce qui correspond à 7 stations de mesure.

¹⁰ Sous-entendu en amplitude crête-crête. En amplitude zéro-crête, la courbe du champ vertical est effectivement 1,6 fois plus haute avec le dipôle vertical qu'avec le dipôle horizontal suivant Ox, ce qui ne représente de toute façon qu'un gain de 17 % sur la distance maximale ($1,6^{1/3} = 1,17$).

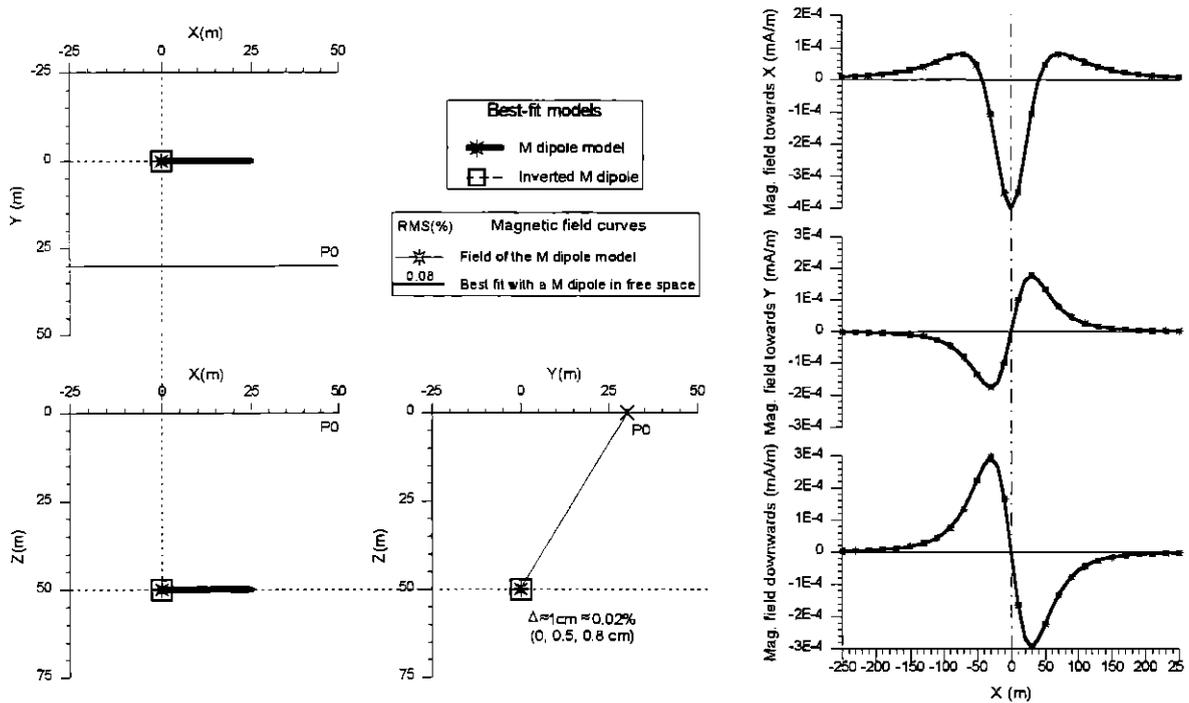


Fig. 1 - Inversion du champ magnétique créé par un dipôle magnétique horizontal orienté selon Ox. Le dipôle est enfoui à 50 m de profondeur dans un terrain à 100 ohm.m et oscille à 100 Hz. La donnée inversée est le champ magnétique en phase sur le profil de surface P0 (longueur 500 m au pas de 10 m). Le modèle inverse utilisé est un dipôle magnétique dans le vide.

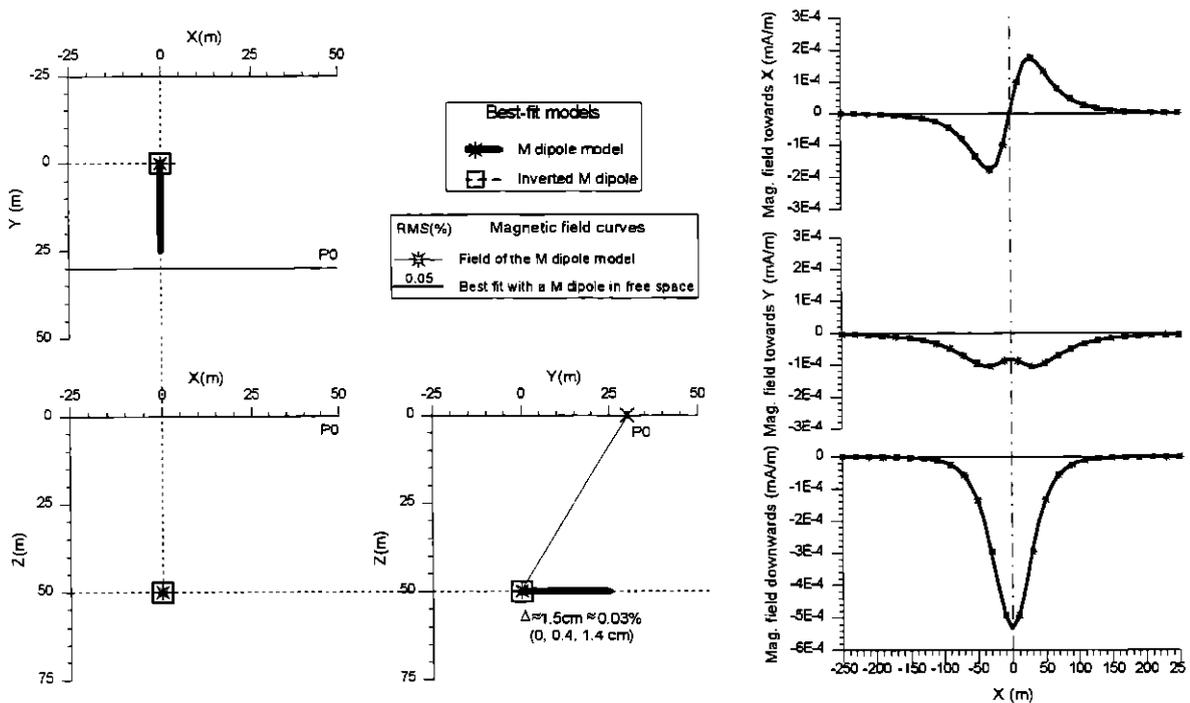


Fig. 2 - Inversion du champ magnétique créé par un dipôle magnétique horizontal orienté selon Oy.

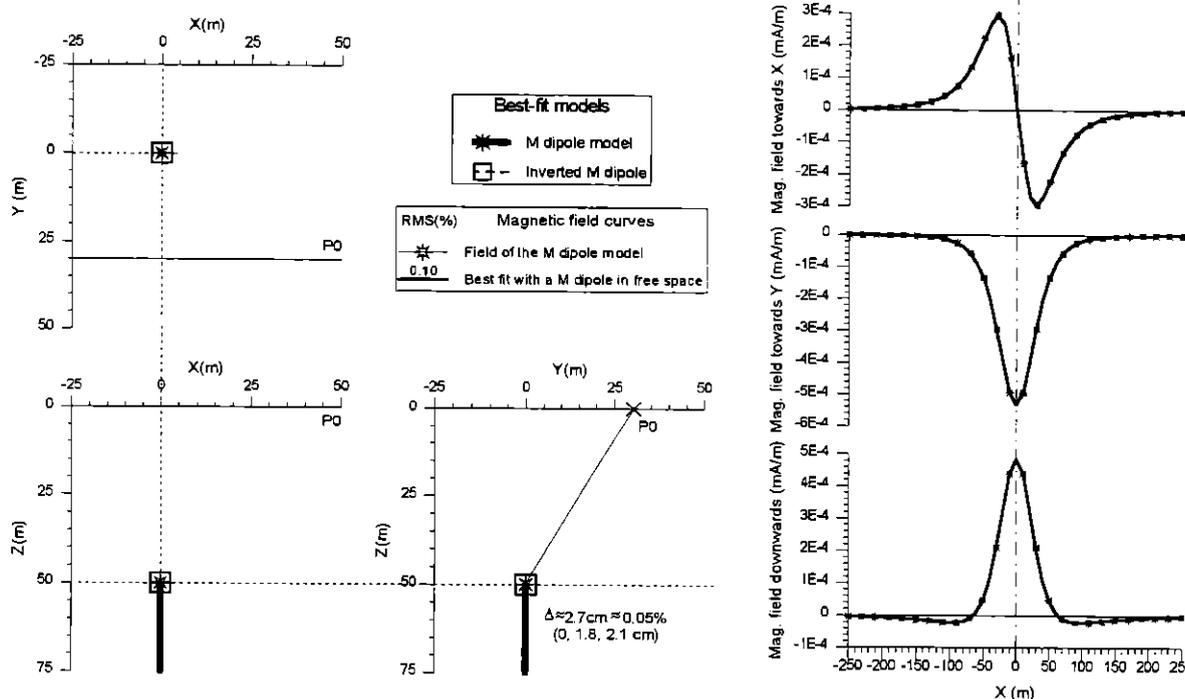


Fig. 3 - Inversion du champ magnétique créé par un dipôle magnétique orienté verticalement.

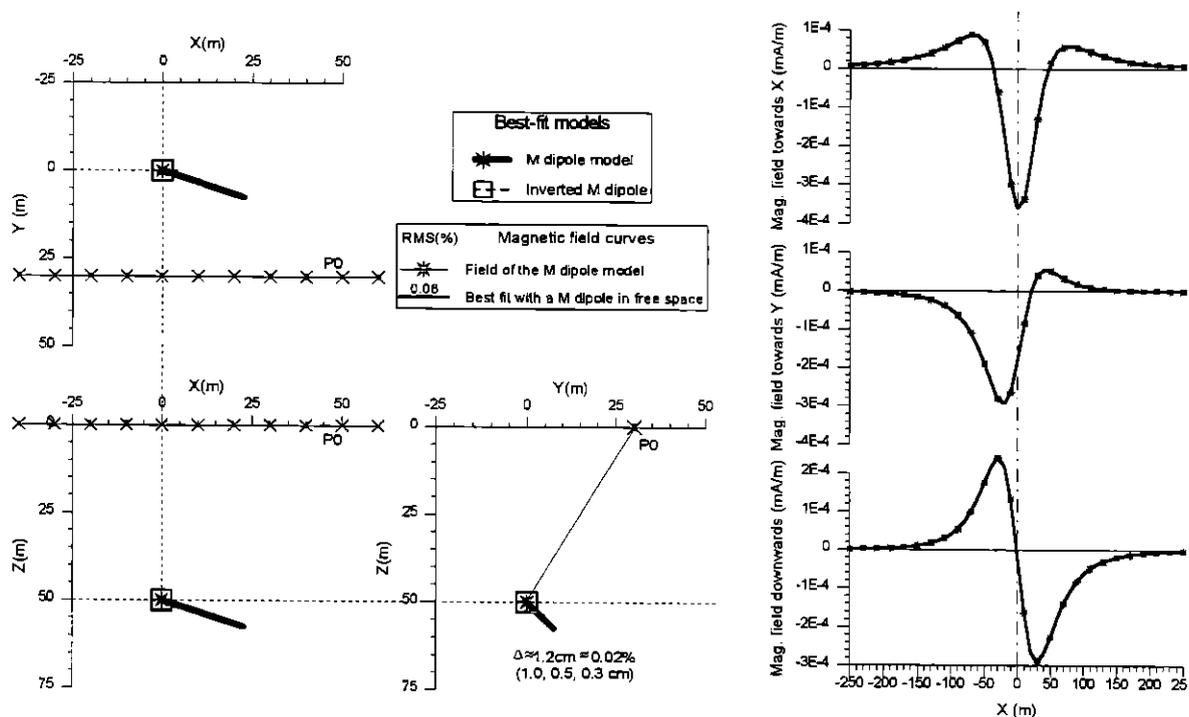


Fig. 4 - Inversion du champ magnétique créé par un dipôle magnétique orienté selon le vecteur (3,1,1).

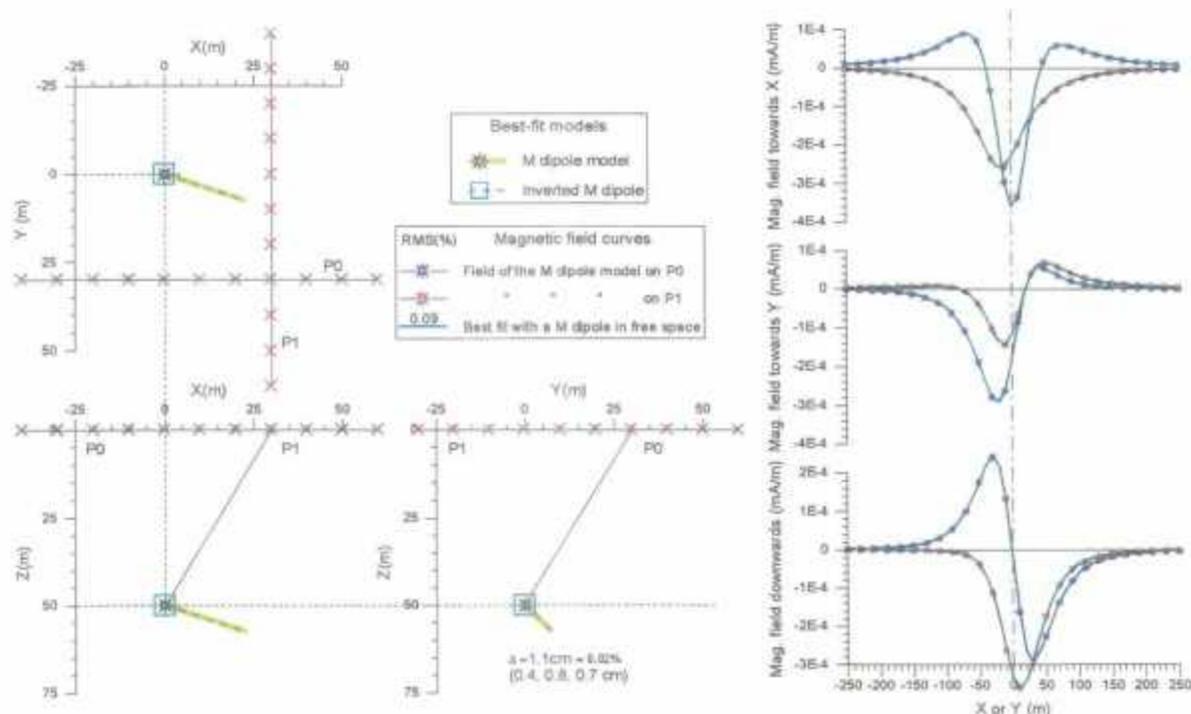


Fig. 5 - Inversion du champ magnétique créé par le dipôle émetteur orienté selon le vecteur (3,1,1) avec les données réparties sur les deux profils croisés P0 et P1. L'abscisse sur le tracé des données représente indifféremment X ou Y selon qu'on est sur le profil P0 (astérisques rouges) ou P1 (astérisques bleus).

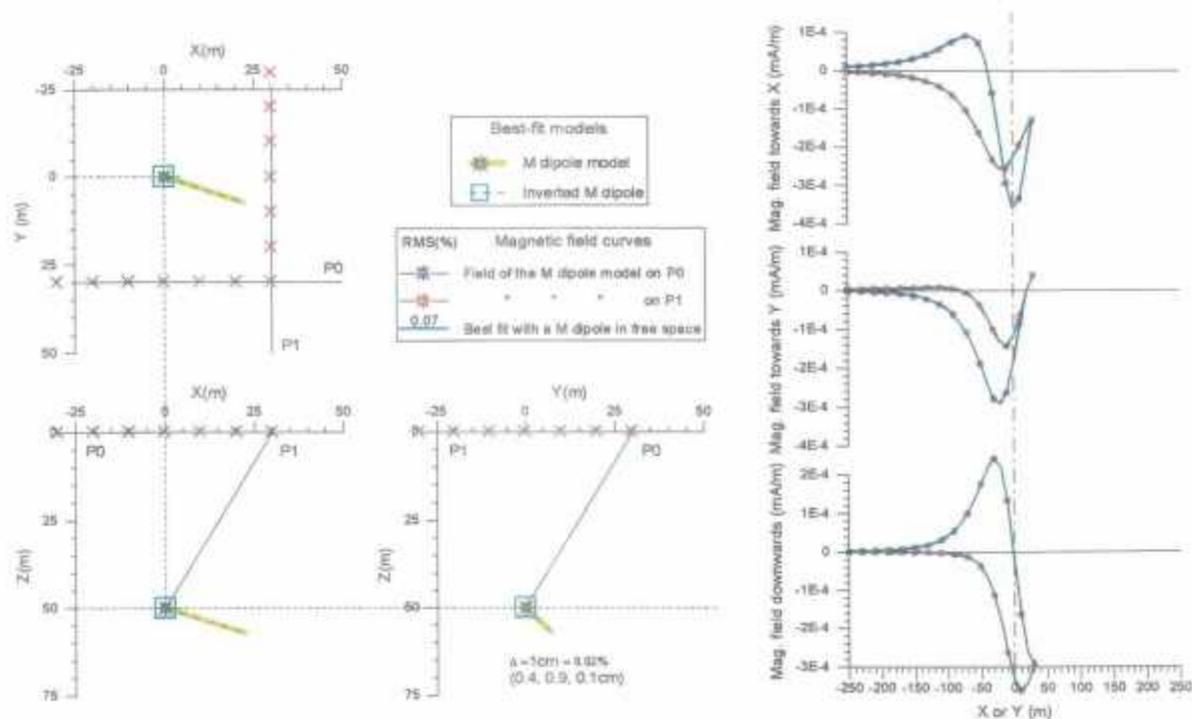


Fig. 6 - Inversion du champ magnétique créé par le dipôle émetteur orienté selon le vecteur (3,1,1) avec les données réparties sur le profil angulaire bâti sur P0 et P1.

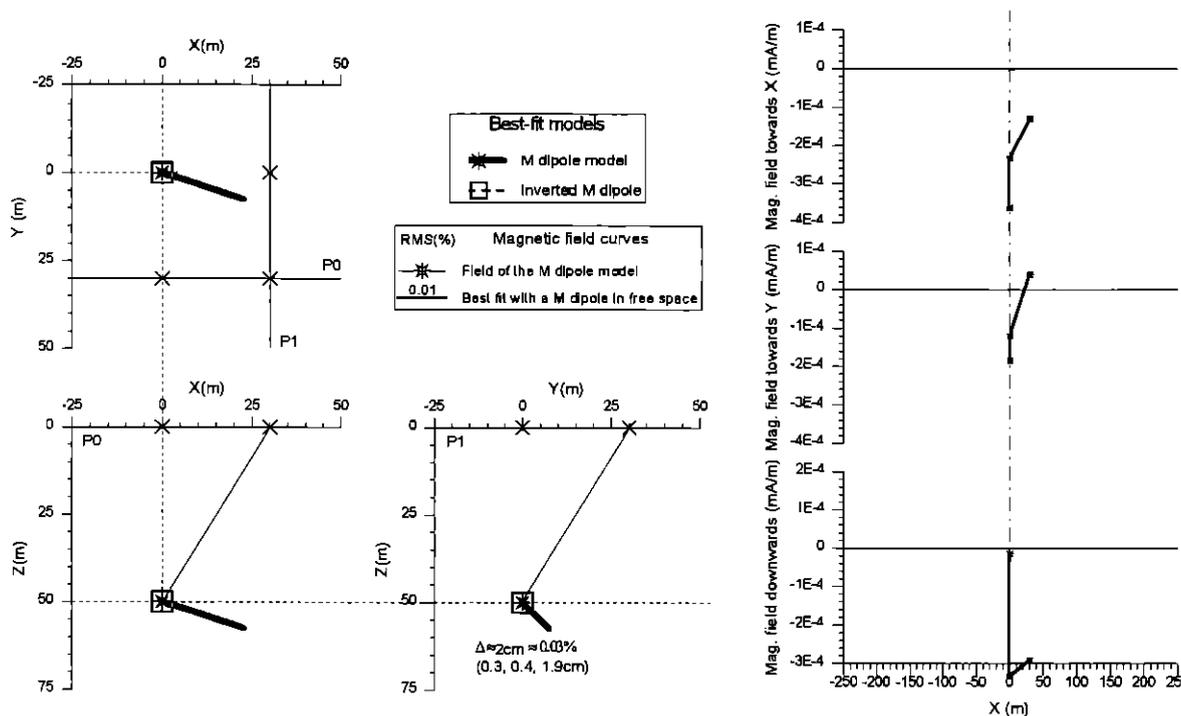


Fig. 7 - Inversion du champ magnétique créé par le dipôle émetteur orienté selon le vecteur (3,1,1) avec restriction du profil angulaire à trois points proches de l'aplomb de la source.

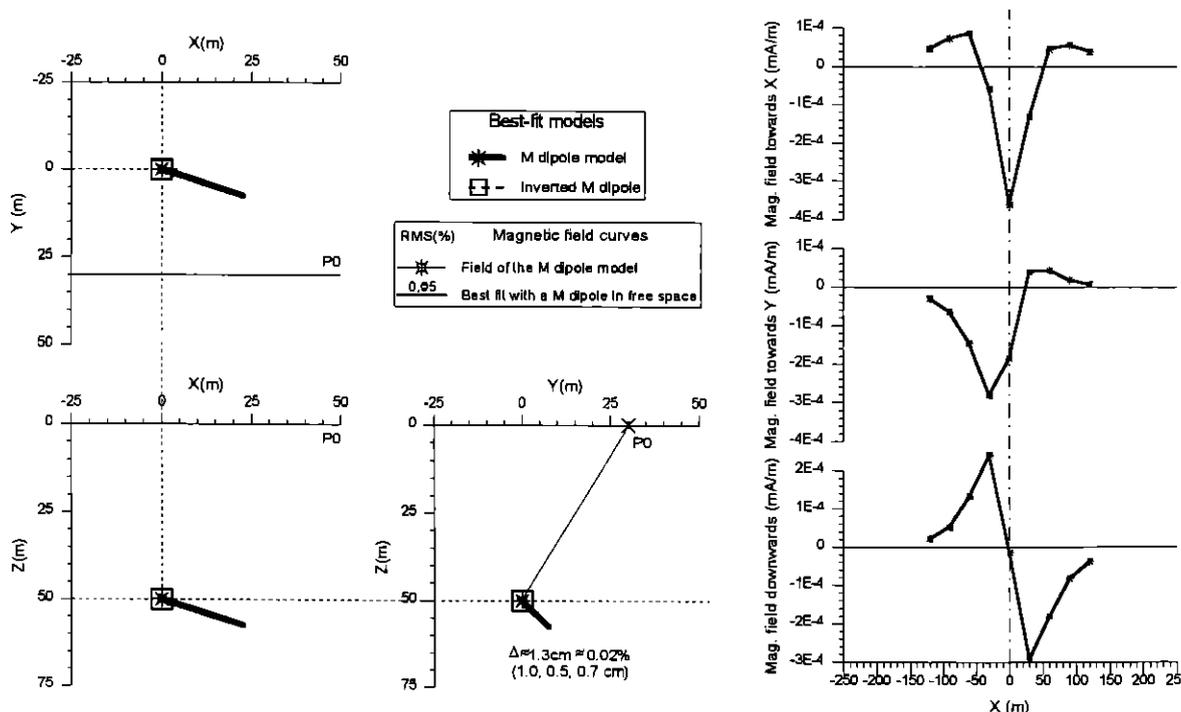


Fig. 8 - Inversion du champ magnétique créé par le dipôle émetteur orienté selon le vecteur (3,1,1) avec profil s'étendant sur 120 m de part et d'autre de la source au pas de 30 m.

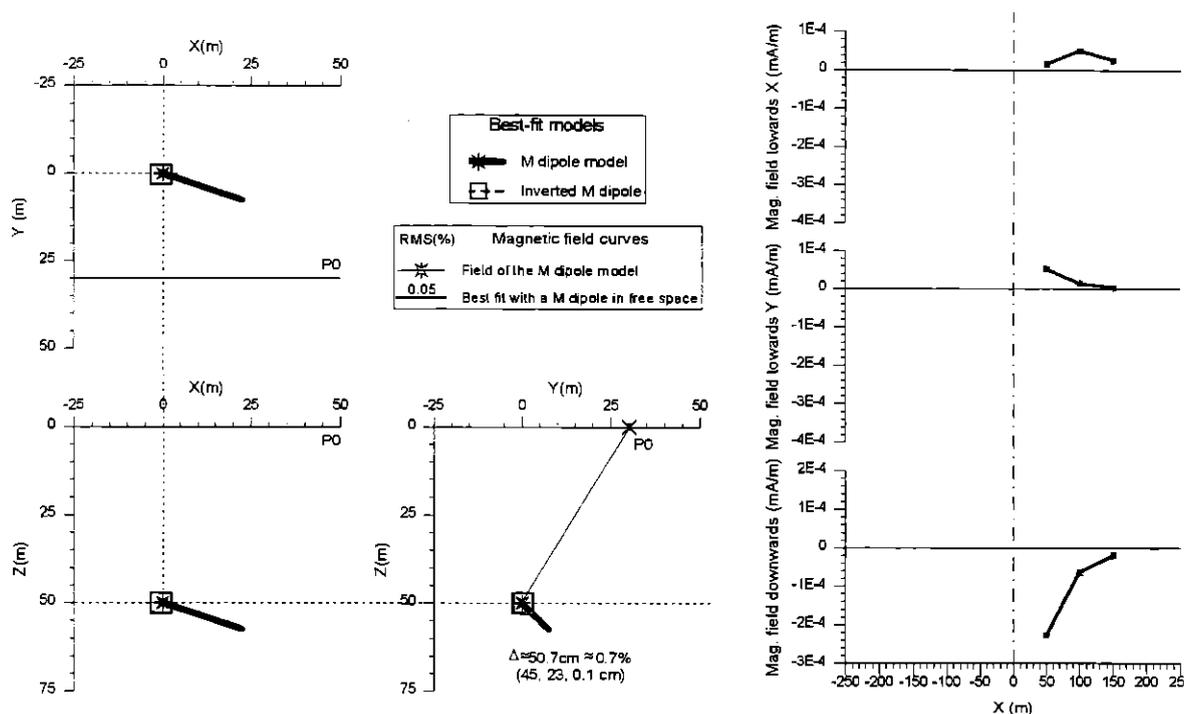


Fig. 9 - Inversion du champ magnétique créé par le dipôle émetteur orienté selon le vecteur (3,1,1) avec profil limité à 3 points s'étendant sur 100 m d'un seul côté de la source (profondeur oblique \approx 77 m).

Enfin, sur la figure 9, on a décimé davantage l'information du profil P0 en la limitant à 3 points plus éloignés de l'aplomb de la source ($X = +50$ à $+150$ m). L'erreur de localisation devient plus importante : 0,5 m, soit 1 % de la profondeur vraie ou 0,7 % de la profondeur oblique. Ceci vient évidemment du fait que l'information est mal échantillonnée et conditionne moins bien l'inversion. À plus grande distance, le phénomène s'accroît encore plus vite à cause de la réponse non négligeable du sol conducteur lorsque le rapport r/δ augmente.

3. Déroulement des mesures

Soit à localiser avec précision un point caractéristique d'un réseau souterrain (ex. le centre d'une salle ou un croisement de galeries) dont la position est connue seulement de manière approximative.

On commence par définir une station de base qui soit à la fois à portée de câble émetteur du point souterrain à localiser et à portée de câble récepteur de tous les points de réception envisagés. Les treuils de l'émetteur (Tx) et du récepteur (Rx) sont déposés en cette base, et le câble Tx est déroulé depuis ce lieu vers le point d'émission souterrain.

Une fois installé le dipôle magnétique (ici la sonde Boris Tx) en ce point, on repère avec soin le centre d'émission par rapport aux références du lieu souterrain (déport latéral, hauteur par rapport au sol ou au plafond). C'est en effet ce centre d'émission qui sera localisé par l'inversion. Sachant que la sonde émettrice a une longueur de 2 m, cette précaution n'est pas anodine. En revanche, il n'est pas nécessaire de noter avec précision l'orientation du dipôle.

Par ailleurs, on implante les stations de réception dans une zone située autour de l'aplomb probable du dipôle. D'après les modélisations précédentes, **on peut se contenter d'une dizaine de points disposés sur une ligne brisée balayant une distance minimale de 3 fois la profondeur présumée de la cavité, avec un pas égal au plus à la moitié de cette profondeur**. Par sécurité, si la position de la cavité est mal connue, on plantera plutôt le profil sur une distance de 5 fois la profondeur présumée¹¹.

Si l'on doit déterminer successivement divers points de calage du réseau souterrain, on multipliera les profils de réception, ce qui se traduira soit par un seul long profil soit par divers profils parallèles.

La précision de l'implantation des stations doit être supérieure à celle espérée sur la localisation du dipôle. Cela signifie que l'erreur sur le positionnement des stations doit rester faible devant l'incertitude de localisation du dipôle qui résulterait des seuls bruits et erreurs sur la mesure des champs (et aussi parfois de l'inadaptation du modèle employé, ex. dipôle dans le vide en présence d'un recouvrement très conducteur). Cette condition est généralement satisfaite dans le cas d'une topographie réalisée au GPS différentiel ou au théodolite. Si tel n'est pas le cas, l'incertitude finale de localisation reflétera principalement l'incertitude sur la position des stations de mesure.

¹¹ Au Parc floral, la profondeur présumée de la cavité sélectionnée est d'environ 15 m, donc un profil de 75 m au pas de 7,5 m serait adéquat.

Les points de mesure seront repérés par des clous de topographe ou par des piquets. Dans la mesure du possible, éviter les clous métalliques et utiliser plutôt des clous plastiques.

Les appareils ayant été installés à la station de base, la procédure d'acquisition consiste (pour une position d'émission donnée), à mesurer en chaque station de surface avec la sonde réceptrice (à la fréquence 70 Hz). Noter que le centre de réception de la sonde (centre géométrique du capteur triaxial) doit être placé le plus près possible (quelques centimètres) du repère topographique de la station. En revanche, la sonde peut être orientée de manière quelconque en azimut et inclinaison, car elle est munie de capteurs d'orientation (3 magnétomètres de type fluxgate, 2 à 3 inclinomètres) qui permettent de la réorienter dans le référentiel géographique fixe.

La mesure proprement dite dure en moyenne 1 mn avec Arlett et 2 mn avec SlimBoris, auxquelles il faut rajouter le temps de déplacement d'une station à la suivante (2 mn en moyenne).

Après acquisition, le traitement des données consiste à projeter le champ mesuré sur le repère géographique courant à l'aide du logiciel « Borem ». Ce champ est ensuite inversé par un modèle de dipôle magnétique dans le vide grâce au logiciel « Optem ».

4. Essai méthodologique au Parc floral

Grâce à l'attribution d'un financement en urgence, l'intervention sur le terrain a pu être réalisée *in extremis* la dernière semaine de juillet 2000. En raison du calendrier de chacun, cette semaine était en effet la dernière possible de la saison estivale. Cette période était propice en raison de la disponibilité des plongeurs et des bonnes conditions de plongée : courants faibles et eau transparente (du moins en théorie, comme on le verra plus loin).

L'acquisition des données s'est déroulée sur trois jours, à raison d'un jeu de données par jour, correspondant à trois configurations de mesure différentes :

- enregistrement SlimBoris avec dipôle émetteur vertical ;
- enregistrement SlimBoris avec dipôle émetteur horizontal ;
- enregistrement Arlett avec dipôle émetteur horizontal.

Cette répétition des mesures deux à deux était destinée d'une part à comparer deux configurations d'émission avec un même appareil de mesure (SlimBoris), d'autre part à comparer Arlett et SlimBoris dans une même configuration d'émission.

L'intérêt pratique de la première comparaison est, comme nous le verrons plus loin, d'estimer la précision du positionnement en relatif, entre deux déterminations indépendantes. C'est le seul moyen de procéder dans notre cas, puisque la position absolue du point d'émission n'est pas connue avec précision. Pour des raisons que nous allons voir plus loin, cet objectif n'a pu être atteint que partiellement (uniquement sur le positionnement en profondeur).

Dans les trois expériences, la position du centre de l'émetteur se voulait à peu près constante. En fait, à cause de la longueur appréciable de la sonde, le passage de vertical à horizontal s'effectue inévitablement avec un léger déplacement, d'ordre métrique, lié à la rotation de la partie émettrice de la sonde autour de sa partie électronique, censée rester fixe (la sonde est en effet constituée de deux parties d'environ 2 m chacune reliées par un flexible). Cette rotation devait normalement être contrôlée avec précision.

Or, à cause d'un fort courant d'inversac¹² existant le jour de la rotation de l'émetteur, la visibilité était très réduite (≈ 1 m) et le plongeur n'a pas pu relever avec précision le sens précis de la rotation à compas ; il pense seulement qu'elle a eu lieu vers l'intérieur du système karstique, donc sensiblement vers l'est. En outre, toujours à cause du courant, le plongeur a involontairement déplacé la partie électronique de l'émetteur, qui devait

¹² Ce terme désigne un fonctionnement inversé de la résurgence, c'est-à-dire en perte, causé par de fortes pluies ayant eu lieu dans les heures précédentes. Une telle situation entraîne toujours de fortes turbidités car les vases et sédiments du Loiret sont entraînés dans le réseau karstique.

théoriquement rester fixe. La valeur et l'orientation exactes du déplacement n'ont pas pu être relevées, mais le déport est estimé à moins de 1 m. Cet état de fait rendra malheureusement plus difficiles les conclusions sur la précision de la méthode.

4.1. MOYENS MIS EN ŒUVRE

- **Moyens humains**

Le personnel qui est intervenu est le suivant :

F. Lenain (BRGM) : préparation et adaptation du matériel ;

B. Bourgeois (BRGM) : conception du test, acquisition et interprétation des données, rapport ;

P. Boismoreau, P. Albéric, J. Munerot (plongeurs spéléo) : mise en place et repli de l'émetteur ;

Étudiant(e) X ou Y : déplacement de la sonde de mesure à la surface.

- **Moyens matériels**

Les principaux équipements utilisés sont les suivants :

- système SlimBoris n° 1, appartenant au BRGM, composé d'une sonde émettrice axiale (Tx), d'une sonde réceptrice triaxiale (Rx), des boîtiers de surface correspondants et de la connectique spécifique ;
- système prototype Arlett du BRGM, composé d'une sonde réceptrice triaxiale et de son boîtier de surface ;
- treuil diagraphie motorisé (sur batterie 12V) avec 500 m de câble 4-conducteurs (utilisé pour Tx), appartenant à IRIS Instruments ;
- treuil diagraphie manuel avec 300 m de câble 4-conducteurs (utilisé pour Rx), appartenant au BRGM ;
- bobine supplémentaire de 100 m de câble diagraphie servant à faciliter la mise en place de l'émetteur dans le boyau ;
- raccord spécial mâle-mâle fabriqué par IRIS pour connecter deux pieds de câble diagraphie ;
- PC portable équipé du logiciel « BorisLog », appartenant à IRIS, pour acquisition SlimBoris ;
- station HP332 portable équipée du logiciel « Arlus », appartenant au BRGM, pour prototype Arlett ;
- système GPS différentiel de marque Trimble appartenant au service ARN/ARS pour le positionnement des stations de mesure en surface.

4.2. LES MESURES SUR LE SITE DU PARC FLORAL

Pour cette expérience particulière, la question de la mise en place du câble d'émission en profondeur a été résolue, grâce à la proximité de l'entrée du réseau karstique, en utilisant une bobine de rallonge de 100 m que le plongeur dévidait (en la portant à la main) en remontant depuis la cavité vers la surface. La procédure inverse, qui consisterait à installer le câble en descendant (*i.e.* en déroulant le treuil laissé fixe sur la berge) est en effet jugée difficile et même dangereuse car elle supposerait de faire glisser le câble le long de galeries aux tracés complexes (nombreux puits subverticaux, passages étroits) présentant des arêtes tranchantes et des blocs instables.

L'implantation de 41 stations de mesure en surface par méthode GPS a été réalisée gracieusement par F. Lebert à l'occasion d'un stage de formation par compagnonnage. La précision de ce positionnement est d'ordre centimétrique, ce qui est plus que suffisant pour notre usage. Les stations sont réparties sur quatre profils étiquetés de A à D (fig. 10). Noter que la partie NW du profil A dessine un quart de cercle autour de la vasque du bouillon. L'absence de stations au centre de la figure est due à une zone boisée interdisant la réception GPS.

Bien entendu, la grande extension de la grille de mesure utilisée ne se justifie pas par la profondeur présumée du point d'émission, mais uniquement par un but méthodologique : évaluer les limites de la méthode, aussi bien au niveau de la qualité des données que de leur interprétation. En effet, compte tenu de la profondeur d'émission (≈ 15 m), le profil A serait à lui seul suffisant (extension 62 m).

Une variable de report unique est utilisée pour identifier de manière univoque toutes les stations de mesure. Cette variable représente l'abscisse curviligne en mètres, mais avec une origine différente sur chaque profil. Ceci permet de rassembler toutes les données sur un unique profil global dans lequel chaque profil individuel occupe une plage d'abscisse distincte (cf. fig. 11). Le point zéro de cette numérotation est situé au croisement de l'axe de l'allée des Fougères (allée prolongeant le Loiret en amont de sa source) avec le bord intérieur de l'allée circulaire contournant la vasque, point facilement reconnaissable en surface.

Dans les figures 10 et suivantes, les coordonnées horizontales sont celles du système Lambert II étendu, auxquelles on a soustrait une constante de 570 km sur la coordonnée est, et une autre de 2 316 km sur la coordonnée nord.

La coordonnée verticale est orientée vers le bas, il s'agit donc d'une profondeur. Le trièdre utilisé (nord, est, bas) est direct. La profondeur est exprimée par rapport au niveau des mers, ce qui donne une valeur moyenne de l'ordre de - 93 m à la surface du sol.

La projection du champ magnétique sur les axes du système Lambert II a été effectuée avec les paramètres suivants : déclinaison magnétique (en juillet 2000) $D_m = - 1,86^\circ$, angle de convergence local $C_m = - 0,29^\circ$, d'où il résulte une déclinaison magnétique apparente $D_a = - 1,57^\circ$.

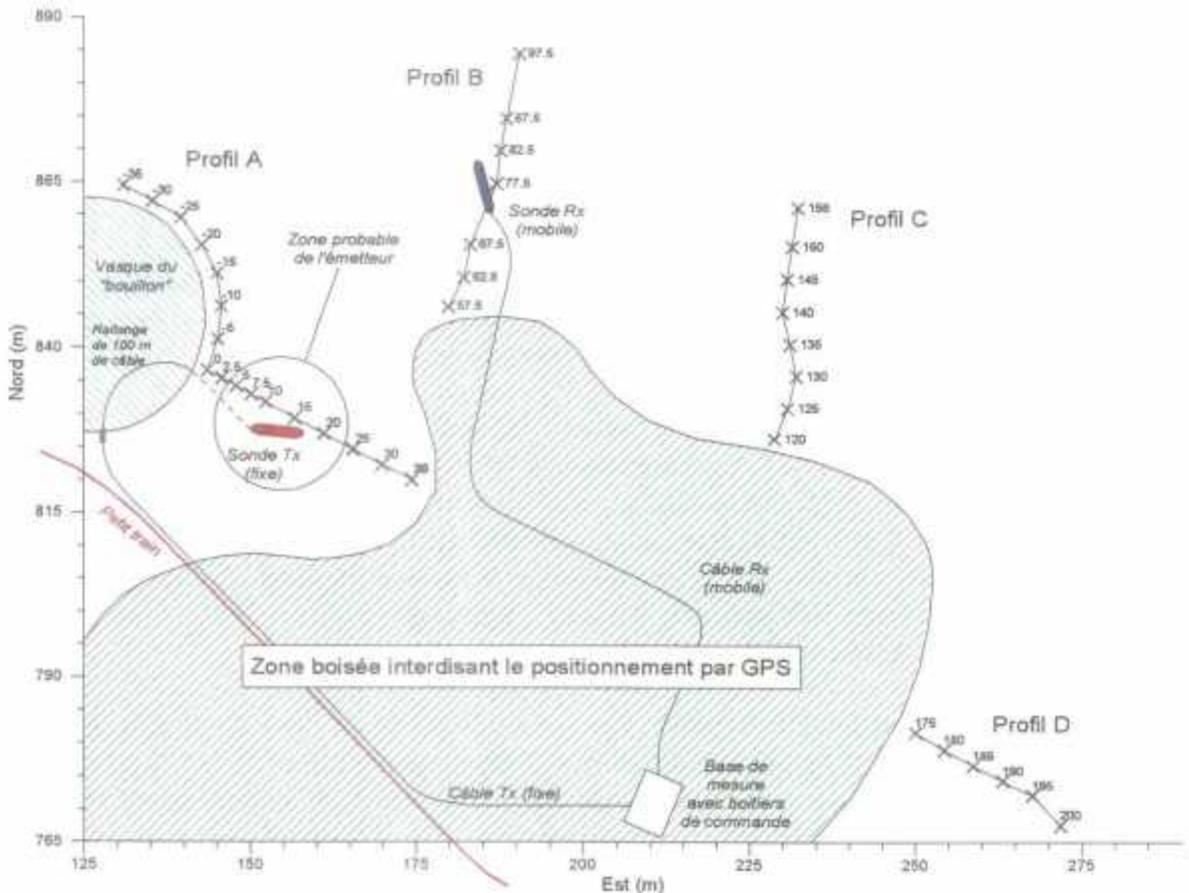


Fig. 10 - Schéma de mise en œuvre de la méthode du dipôle magnétique oscillant et situation des profils de mesure sur le site du parc floral d'Orléans (projection Lambert II étendu).

4.2.1. Enregistrement Arlett avec dipôle émetteur horizontal

On commence par l'étude de cet enregistrement, car c'est celui qui a fourni les meilleurs résultats ; il servira ensuite de référence pour la comparaison avec les autres configurations de mesure. Le dipôle émetteur était posé au sol dans une position subhorizontale. C'est donc la profondeur du sol de la cavité qui sera déterminée par l'inversion.

La figure 11 montre l'inversion du champ magnétique en phase pour l'ensemble des stations (profils A à D). La solution obtenue est située très exactement à 17,33 m sous la surface¹³, à peu près à la verticale de la station 10. Le dipôle solution est orienté essentiellement vers l'est : conformément à la sensation du plongeur, la sonde émettrice a donc bien tourné vers l'est dans sa rotation de la verticale vers l'horizontale. Malgré l'exagération verticale de la figure, il apparaît aussi que la sonde émettrice était relativement pentée ($\approx 10^\circ$ vers l'ouest). L'ajustement des champs est très satisfaisant (écart RMS $\approx 6\%$). Le résultat de cette inversion sera pris comme référence dans la

¹³ On peut estimer que cela laisse environ 15 m de mort-terrain en clef de voûte de la cavité.

suite de la discussion. On le repérera par des lignes de report en trait pointillé, et par un symbole carré à segment tireté.

La figure 12 montre l'inversion des données restreintes aux seules stations du profil A. L'inversion est très peu affectée par l'abandon des profils B, C, D, ce qui prouve d'une part la cohérence globale des données, d'autre part que le profil A contient la quasi-totalité de l'information.

À l'opposé, la figure 13 montre l'inversion basée sur les seuls profils B, C, et D, qui sont assez excentrés par rapport à la verticale du point d'émission (distance 35 m au point le plus proche). L'ajustement avec les données continue d'être excellent, mais on observe un léger décalage du dipôle solution vers l'est, d'environ 34 cm, soit environ 2 % de la profondeur verticale. En fait, les profils B-C-D ne passant pas à l'aplomb de l'émetteur, il est plus juste d'apprécier ce décalage par rapport à la distance oblique émetteur/profils, qui est d'environ 39 m au point le plus proche des profils. Cela nous donne un écart relatif de 0,9 %.

La figure 14 montre l'inversion basée sur les seuls profils C et D, donc en s'éloignant encore davantage du point d'émission. Le décalage du dipôle solution s'est nettement aggravé (3,93 m) ; cependant, lorsqu'il est exprimé par rapport à la distance oblique émetteur/profils (≈ 82 m), ce décalage ne représente que 5 % d'écart relatif.

En outre, il faut tenir compte du fait que la 4^e station du profil C (station 135) est certainement mal positionnée : son clou topographique ayant été retiré par les promeneurs¹⁴, cette station a dû être remise en place approximativement. Étant donné que l'interpolation a été faite entre deux stations distantes de 10 m, dans une courbe importante du chemin, une erreur transversale jusqu'à 1 m est tout à fait envisageable. Or, à cette distance de l'émetteur, une telle erreur de positionnement se répercute par une erreur de près de 4 % sur le champ magnétique (3 fois l'erreur de positionnement), ce qui est compatible avec l'ondulation observée à la station 135.

La figure 15 vient confirmer le fait qu'un (ou plusieurs) problème(s) de positionnement des stations entachent les données du profil C. En effet, cette figure montre l'inversion en utilisant uniquement les mesures du profil D, situé à une distance oblique émetteur/profil encore plus grande (environ 113 m). Or, au lieu de s'aggraver, le décalage de la solution par rapport au dipôle de référence a légèrement diminué (3,87 m), portant l'écart relatif à seulement 3,4 % de la distance oblique. Malgré une distance à l'émetteur accrue, les données du profil D sont donc meilleures que celles du profil C. Corrélativement, on notera qu'aucun erreur de positionnement importante n'a pu être réalisée sur le profil D, puisque aucun repère topographique n'y avait été dérobé.

¹⁴ De nombreuses stations ont ainsi disparu dans les quelques jours qui se sont écoulés entre l'implantation des stations et les mesures, ceci clairement en raison de la ressemblance des clous utilisés avec des pièces de monnaie ! Pour cette raison, prévoir plutôt des clous plastiques.

On peut encore noter sur les figures 14 et 15 que le dipôle solution se couche de plus en plus lorsque la distance à l'émetteur augmente, pour devenir complètement horizontal sur la figure 15.

Les figures 13 à 15 reviennent à faire un zoom sur les données lorsque la distance à l'émetteur augmente, c'est-à-dire lorsque le signal diminue (décroissance en $1/r^3$) et donc lorsque le bruit relatif augmente. Si l'on met de côté les petites ondulations observées dans la première moitié du profil C, qui reflètent les points de forte courbure du profil (outre le point mal positionné déjà indiqué), il n'y a quasiment aucune évidence de bruit sur les mesures, même sur le profil D qui se termine pourtant à près de 150 m de l'émetteur. Seul le 2^e point de ce profil (station 180) peut paraître suspect (fig. 15) : si l'on admet que ce point est bruité, l'estimation de bruit qui en découle est toutefois inférieure à $1 \mu\text{A/m}$ (on obtient le même résultat si l'on base une estimation de bruit sur la répétition multiple de la station 175).

Avec cette estimation et un moment magnétique de 230 Am^2 (valeur déterminée par les inversions), on peut calculer que le champ magnétique devient égal au bruit (en première position de Gauss) seulement à 330 m de la source ; dans ces mêmes conditions, un rapport signal/bruit de 5 est respecté jusqu'à environ 200 m de la source.

Cette dernière valeur nous donne une idée de la profondeur maximale à laquelle on doit pouvoir localiser une cavité souterraine dans la configuration matérielle de cet enregistrement, à savoir émission avec sonde SlimBoris Tx, réception avec sonde Arlett, et fréquence de travail 70 Hz.

4.2.2. Enregistrement SlimBoris avec dipôle émetteur horizontal

L'enregistrement avec dipôle émetteur horizontal a été répété en utilisant la sonde réceptrice SlimBoris à la place de la sonde Arlett.

L'inversion portant sur l'ensemble des stations (profils A à D) est présentée sur la figure 16. On y constate que les données de champ sont extrêmement bruitées, de sorte qu'on retrouve à peine l'allure des courbes observées avec Arlett (fig. 11). On n'attendait pourtant qu'un simple facteur de proportionnalité entre les deux figures, reflétant simplement les différences de normalisation entre les deux systèmes¹⁵.

¹⁵ Avec SlimBoris, les champs sont normalisés par le moment magnétique de l'émetteur. Ceci explique la plus petite amplitude des courbes SlimBoris.

L'origine de ce bruit reste mystérieuse ; il ne s'agit nullement du bruit normal de l'appareil, comme nous le confirmera l'enregistrement suivant. Peut-être y a-t-il eu des saturations de champ sur certaines voies, mais l'appareil est censé les signaler, ce qui n'a pas été le cas.

Ce qui est remarquable en tout cas, c'est que malgré le bruit considérable sur les données, le dipôle solution est relativement proche de la solution Arlett de référence (écart 1,8 m, soit environ 10 % de la profondeur verticale), ce qui démontre la grande robustesse de la procédure d'inversion.

Les données ne s'améliorent pas lorsqu'on abandonne le profil A. Au contraire, on constate sur la figure 17 (inversion sur les profils B, C, D) que les données sont bruitées à toutes les échelles. Il en résulte des solutions de plus en plus aberrantes au fur et à mesure qu'on s'éloigne du point d'émission. En effet, en présence de données bruitées, l'inversion est mal contrainte (les courbes ajustées ont le choix entre de nombreuses trajectoires possibles), ce qui laisse libre cours à des solutions aberrantes obtenues par le biais de quasi-symétries ou d'équivalences diverses. Il ne sert à rien de zoomer plus avant sur ce jeu de données.

4.2.3. Enregistrement SlimBoris avec dipôle émetteur vertical

Le dernier jeu de données étudié est un enregistrement avec la sonde réceptrice SlimBoris pour un dipôle émetteur en position subverticale.

La figure 18 montre l'inversion de ce jeu de données pour l'ensemble des stations (profils A à D). À l'échelle de cette figure, les données apparaissent de qualité comparable à celles de l'enregistrement Arlett. Il s'ensuit que l'ajustement des champs est satisfaisant ($RMS \approx 10\%$).

L'écart du dipôle solution par rapport à la solution de référence Arlett (avec émetteur horizontal) est de (- 2 ; - 0,45 ; - 1,2) m. L'écart global, de 2,38 m essentiellement vers le sud, représente 13,7 % de la profondeur verticale. Si on replace les choses dans leur déroulement chronologique, cet écart signifie que la rotation de l'émetteur de vertical à horizontal s'est effectuée avec un déplacement du centre d'émission de 2 m vers le nord, 0,45 m vers l'est et 1,2 m vers le bas.

On ne peut discuter véritablement que sur la partie verticale de ce déplacement, la seule qui soit maîtrisée avec assez d'assurance : dans le mouvement de rotation vers l'est, le centre d'émission est forcément descendu de sa propre hauteur, plus celle du flexible, ce qui représente très exactement 0,9 m. Le reliquat de déplacement vertical, de 0,3 m, sera considéré comme l'erreur de localisation (verticale) des données SlimBoris par rapport aux données Arlett.

On s'en tiendra à cette observation (plutôt favorable il est vrai) car il ne sert à rien d'échafauder des hypothèses plus ou moins alambiquées sur le déplacement horizontal, malheureusement inconnu. Si on admet que l'incertitude est isotrope, cette erreur nous conduit à une erreur relative globale SlimBoris/Arlett de l'ordre de 3 % de la profondeur verticale.

Comme nous l'avons fait pour l'enregistrement Arlett, analysons maintenant les données SlimBoris à distance croissante de l'émetteur pour essayer d'apprécier la limite de mesure liée au bruit.

La figure 19 présente, à l'instar de la figure 13, l'inversion des données des profils B-C-D. Ces données apparaissent beaucoup plus bruitées que les données Arlett. L'examen de la voie verticale conduit à une estimation du bruit de l'ordre de 5×10^{-5} mA/m, soit 0,05 μ A/m. Cette valeur ayant été estimée pour un moment magnétique unitaire, on en déduit un bruit de plus 10 μ A/m pour la véritable valeur du moment magnétique émis (≈ 230 Am²).

Une conséquence du bruit est que l'inversion basée sur les profils B-C-D est très mal contrainte par les données. Il en résulte que le dipôle solution est déplacé de plus de 10 m par rapport à la solution de la figure précédente, écart représentant 27 % de la profondeur oblique. (À titre de comparaison, l'écart entre les solutions Arlett des figures 11 et 13, c'est-à-dire pour des jeux de données identiques, n'est que de 0,9 % de la profondeur oblique).

À la fréquence 70 Hz, **le bruit sur le récepteur SlimBoris apparaît donc plus de 10 fois supérieur à celui observé sur le récepteur Arlett**¹⁶. En conséquence, les données enregistrées avec SlimBoris apparaissent impropres à une inversion de qualité au-delà du profil B, c'est-à-dire au-delà de 70 m. Ceci implique évidemment que la profondeur maximale de la cavité pour un levé avec ce récepteur sera beaucoup plus faible qu'avec Arlett (probablement inférieure à 50 m).

4.3. DISCUSSION SUR LA PRÉCISION DE LA MÉTHODE

Compte tenu de la mauvaise qualité des données SlimBoris sur ce test, et du déplacement indéterminé de la sonde entre les deux configurations d'émission, il ne paraît finalement pas judicieux d'estimer la précision de la méthode par comparaison des expériences avec les deux systèmes.

¹⁶ Ceci confirme bien, en pratique, que le récepteur Arlett assure une bien meilleure réjection du bruit à basse fréquence que le récepteur SlimBoris. Ce fait, connu de manière théorique, vient d'un manque de résolution spectrale du récepteur SlimBoris aux basses fréquences : la durée d'acquisition est en effet trop faible, en raison d'une fréquence d'acquisition beaucoup trop élevée, inadaptée à la fréquence de mesure. Ce problème pourrait être résolu par de la décimation numérique avant FFT.

Seul le reliquat de déplacement vertical SlimBoris/Arlett, estimé à 30 cm, paraît digne de foi. Le positionnement vertical obtenu par nos déterminations concorde d'ailleurs bien avec l'estimation de profondeur faite par les plongeurs. La profondeur barométrique donnée par ces derniers est en effet de 15 m, donc en tenant compte d'une surélévation de terre d'environ 2 m au-dessus du niveau de la vasque, on retrouve une profondeur de l'ordre de 17 m sous le niveau du sol.

La précision de la méthode dépend en fait étroitement du matériel utilisé. On retiendra que **la configuration matérielle idéale consiste à utiliser l'émetteur du système SlimBoris et le récepteur du système Arlett.**

On peut estimer qu'un ordre de grandeur réaliste de la précision de la méthode dans cette configuration est donné par comparaison entre deux jeux de données totalement indépendants obtenus dans cette configuration de mesure. Or, si on compare l'inversion du seul profil A (fig. 12) avec celle des profils B-C-D (fig. 13), on observe un écart de localisation global d'environ 36 cm, qui représente environ 2 % de la profondeur verticale ou 1 % de la distance oblique sous le profil B.

On retiendra donc que, dans la meilleure configuration matérielle, la précision est de l'ordre de 1 à 2 % de la distance oblique séparant la source et le profil de mesure.

A posteriori, on peut regretter de ne pas avoir eu ni le temps ni la présence d'esprit de confirmer cette précision en réalisant un quatrième enregistrement avec l'émetteur placé en une station de surface : par exemple, enregistrement des profils B-C-D (avec le récepteur Arlett), l'émetteur SlimBoris étant placé à la station 0 du profil A.

Bien que non représentatif de la réalité, en particulier des distorsions éventuelles causées par les terrains superficiels, un tel enregistrement aurait balayé les doutes que la discussion précédente peut laisser, en permettant une estimation de la précision dans l'absolu. Cependant, il aurait fallu savoir à l'avance que la situation d'inversac allait rendre délicate la détermination de la précision en relatif. En outre ce test supplémentaire, qu'il fallait *a priori* réaliser pour les deux systèmes récepteurs, rajoutait au moins 1 jour de terrain et autant pour l'interprétation, ce qui était matériellement difficile. Maintenant que la procédure est bien rodée, cette confirmation pourrait être réalisée en quelques heures à l'occasion d'une éventuelle application commerciale.

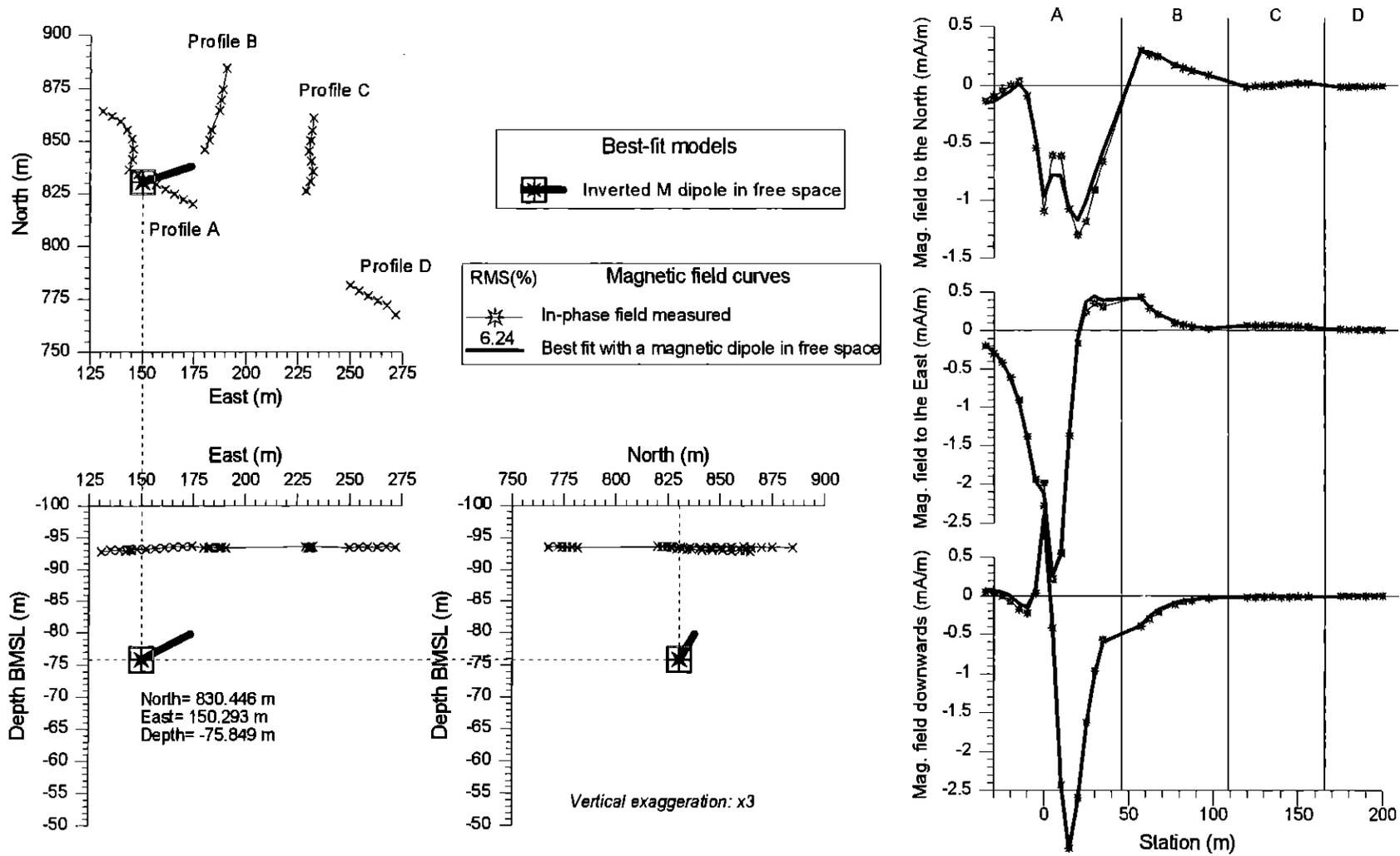


Fig. 11 - Inversion des mesures Arlett à 70 Hz pour le dipôle émetteur subhorizontal. La donnée inversée (courbes en trait fin avec astérisques) est le champ magnétique en phase mesuré sur l'ensemble des profils A, B, C et D. Le modèle utilisé pour l'inversion est un dipôle magnétique dans le vide. Le dipôle solution (celui qui donne le meilleur ajustement des champs) est matérialisé par un carré avec astérisque central et par un segment épais indiquant son orientation. Le champ de ce dipôle est figuré en trait épais. Noter que les projections verticales sont affectées d'une exagération verticale de x3, qui déforme l'orientation réelle du dipôle.

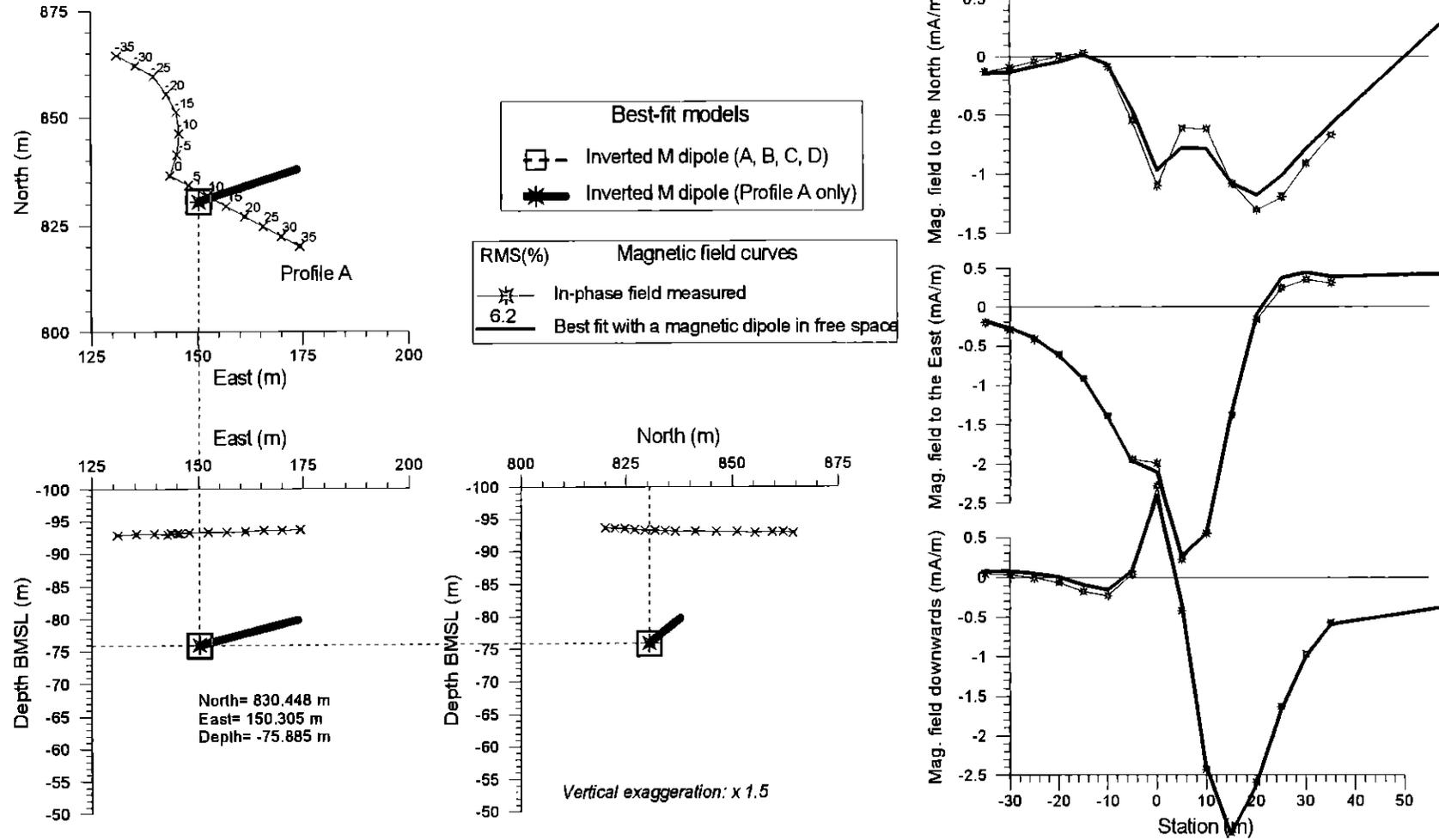


Fig. 12 - Inversion des mesures Arlett à 70 Hz pour le dipôle émetteur subhorizontal avec restriction des données au seul profil A. Les lignes de report en pointillés matérialisent la solution de référence donnée par la figure 11 (données Arlett sur l'ensemble des profils). Cette solution de référence est en outre matérialisée par un carré central avec un axe tireté. La solution dipolaire courante est figurée par un astérisque noir avec un axe plein. L'écart entre cette solution et la solution de référence est de (0,2 ; 1,2 ; 3,6) cm sur les directions (nord, est, bas) ; l'écart global, de 3,8 cm, est essentiellement vers le bas et représente 0,2 % de la profondeur.

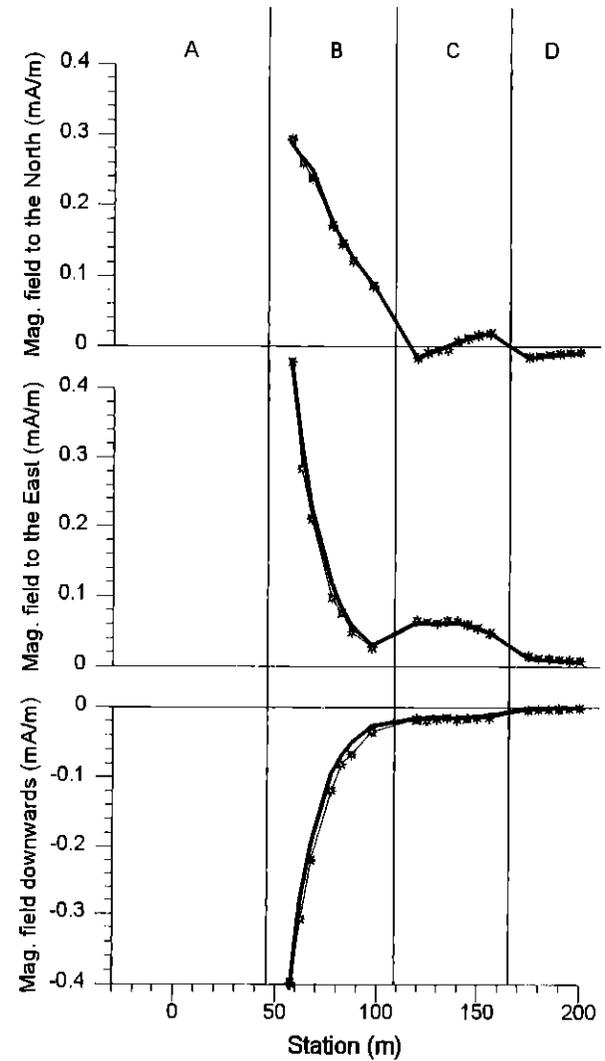
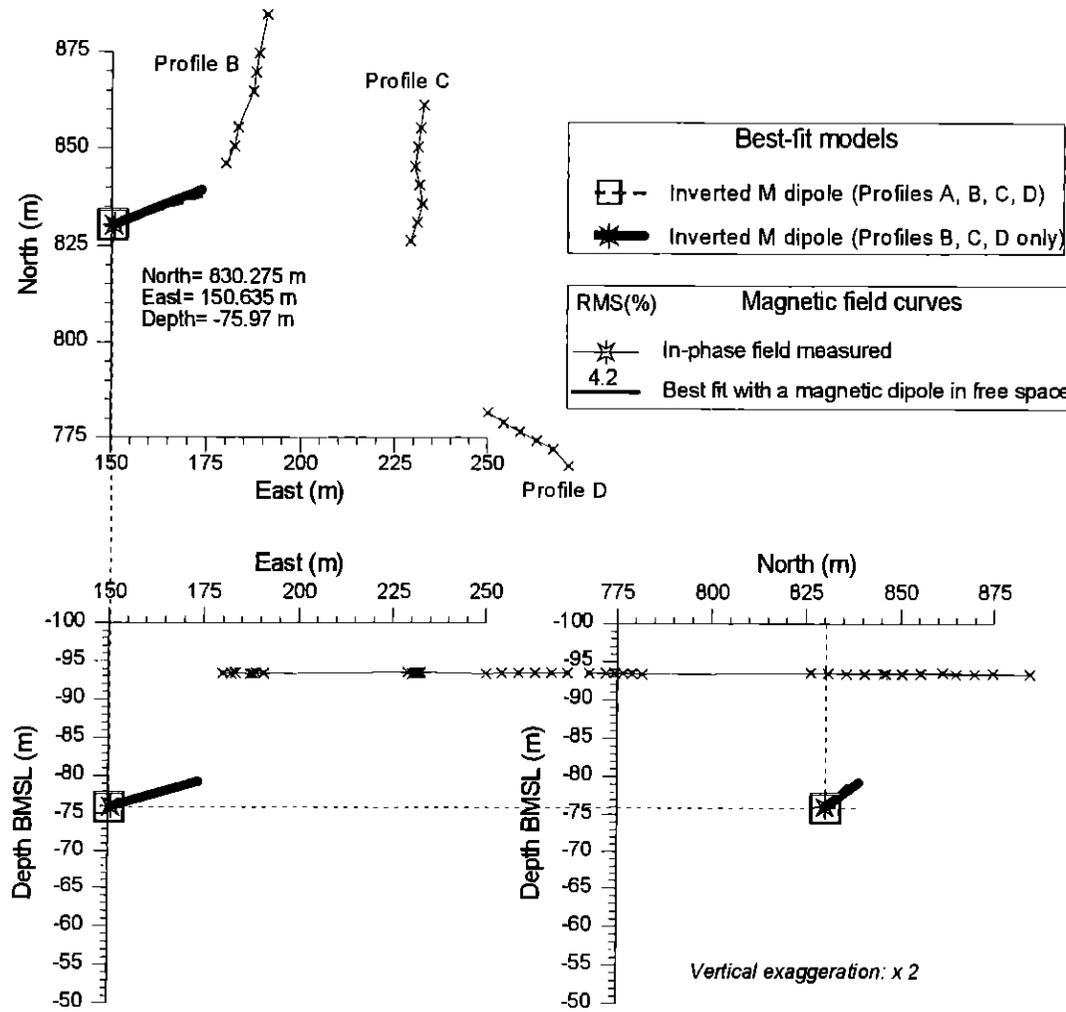


Fig. 13 - Inversion des mesures Arlett à 70 Hz pour le dipôle émetteur subhorizontal avec restriction des données aux profils B, C et D. L'écart entre la solution courante et la solution de référence est de (2,9 ; 34,2 ; - 12,1) cm sur les directions (nord, est, bas). L'écart global, de 36,4 cm, est essentiellement vers l'est et représente 2,1 % de la profondeur verticale ou 0,9 % de la profondeur oblique (qui est ici d'environ 39 m).

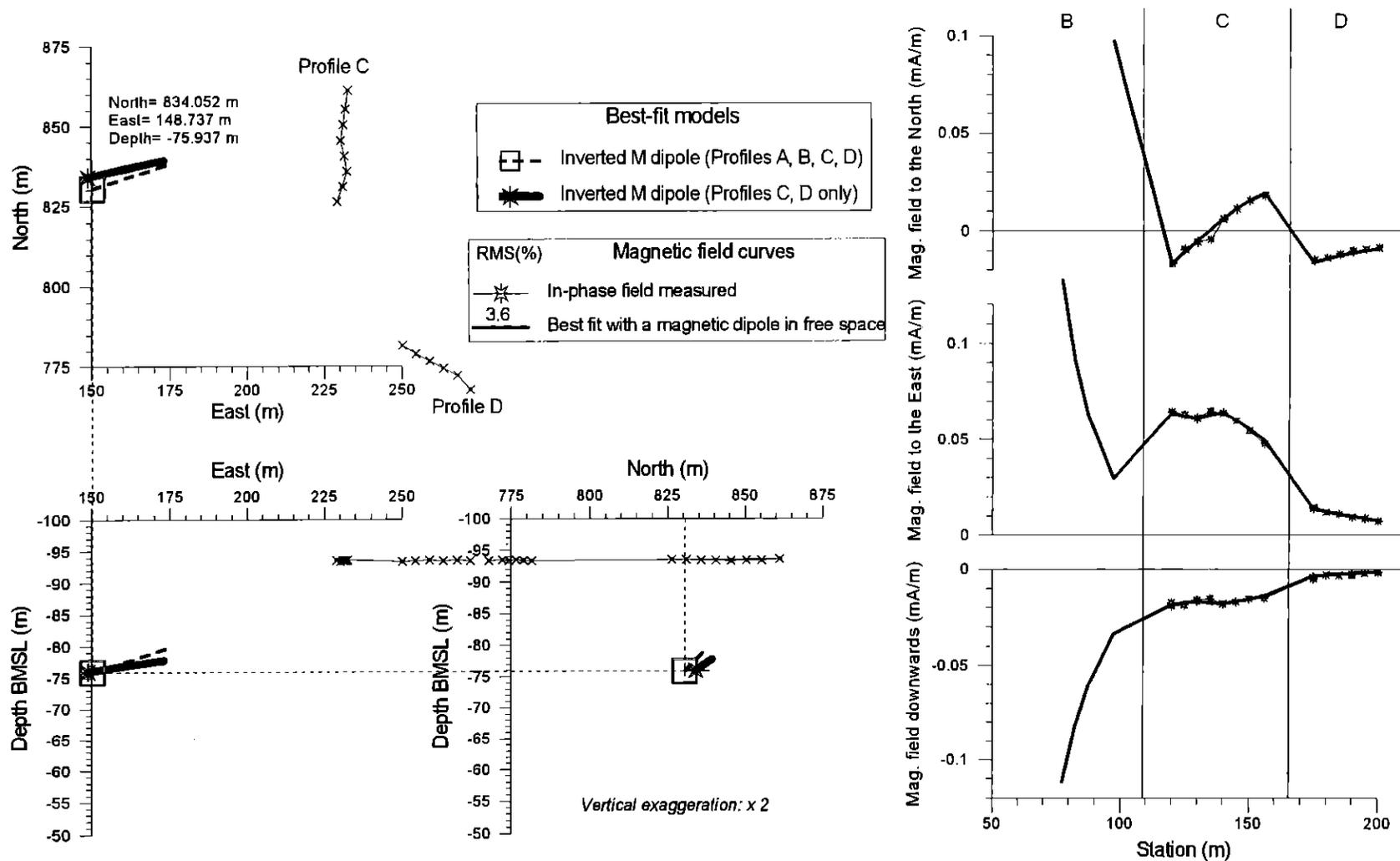


Fig. 14 - Inversion des mesures Arlett à 70 Hz pour le dipôle émetteur subhorizontal avec restriction des données aux profils C et D. L'écart entre la solution courante et la solution de référence est de (3,61 ; - 1,56 ; - 0,09) m sur les directions (nord, est, bas). L'écart global, de 3,93 m, est essentiellement vers le nord et représente 22,7 % de la profondeur verticale ou 4,8 % de la distance oblique (qui est ici d'environ 82 m).

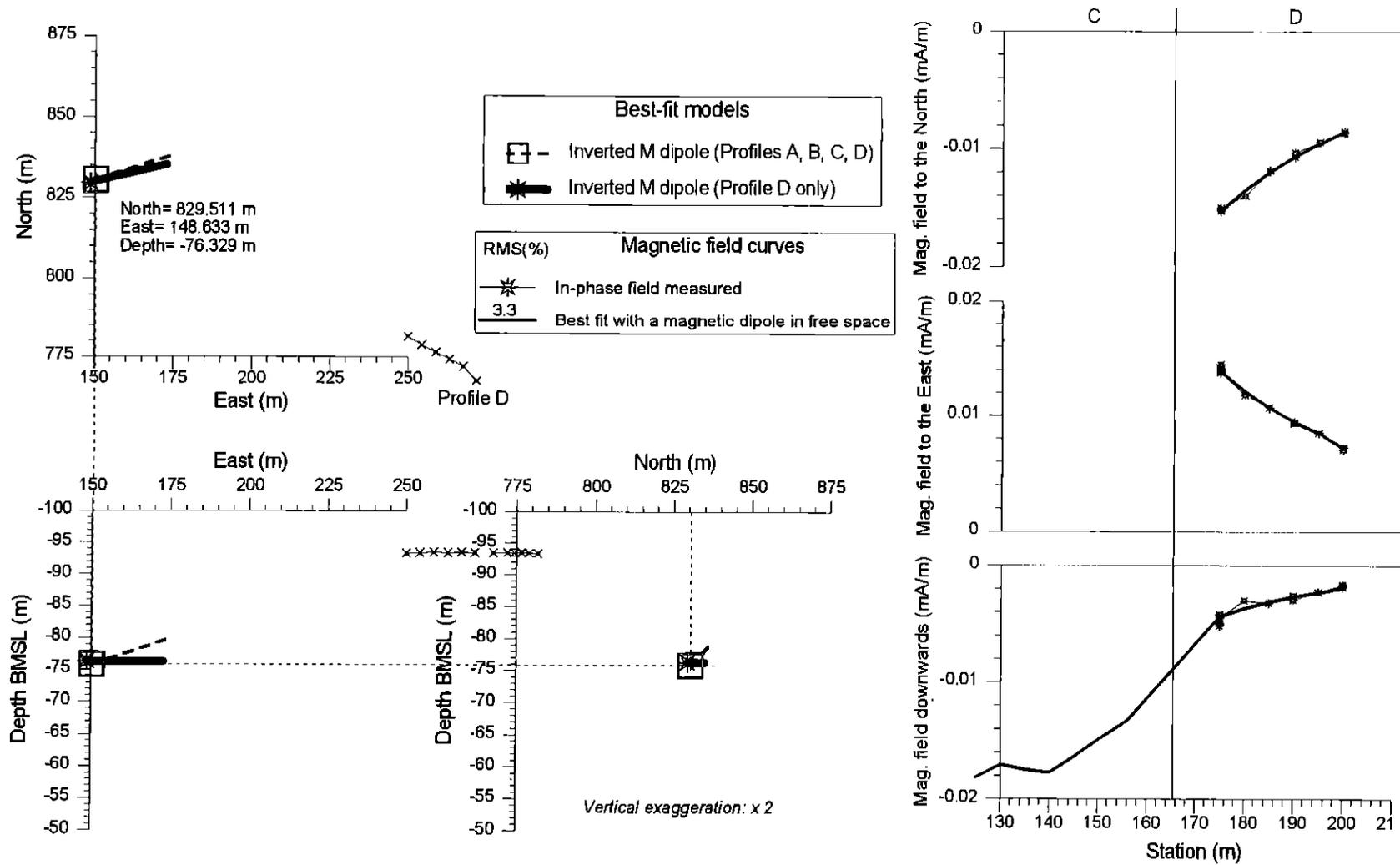


Fig. 15 - Inversion des mesures Arlett à 70 Hz pour le dipôle émetteur subhorizontal avec restriction des données au seul profil D. L'écart entre la solution courante et la solution de référence est de (- 0,94 ; - 1,66 ; - 0,48) m sur les directions (nord, est, bas). L'écart global, de 3,87 m, est essentiellement vers le SW et représente 22,3 % de la profondeur verticale ou seulement 3,4 % de la distance oblique (qui est ici d'environ 113 m).

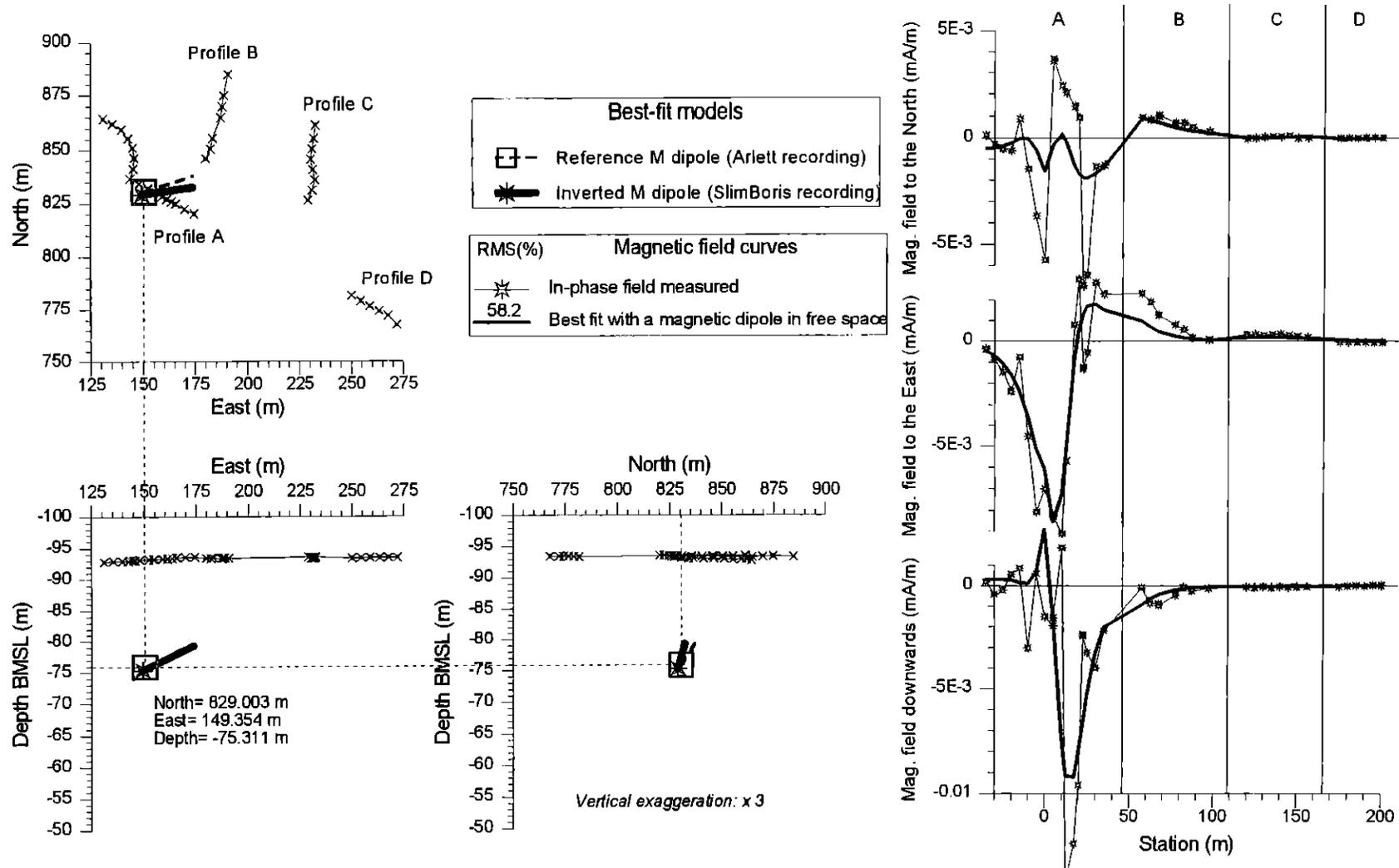


Fig. 16 - Inversion des mesures SlimBoris à 70 Hz pour le dipôle émetteur subhorizontal. La donnée inversée est le champ en phase sur l'ensemble des profils A, B, C et D. Le dipôle solution est matérialisé par un astérisque central et un segment épais indiquant son orientation. Le champ de ce dipôle est figuré en trait épais. La solution de référence obtenue avec Arlett est matérialisée par un symbole carré avec segment tiré. L'écart entre la solution SlimBoris courante et la solution Arlett est de (-1,44 ; -0,94 ; 0,54) m sur les directions (nord, est, bas). L'écart global, de 1,8 m vers le SW représente 10,3 % de la profondeur verticale.

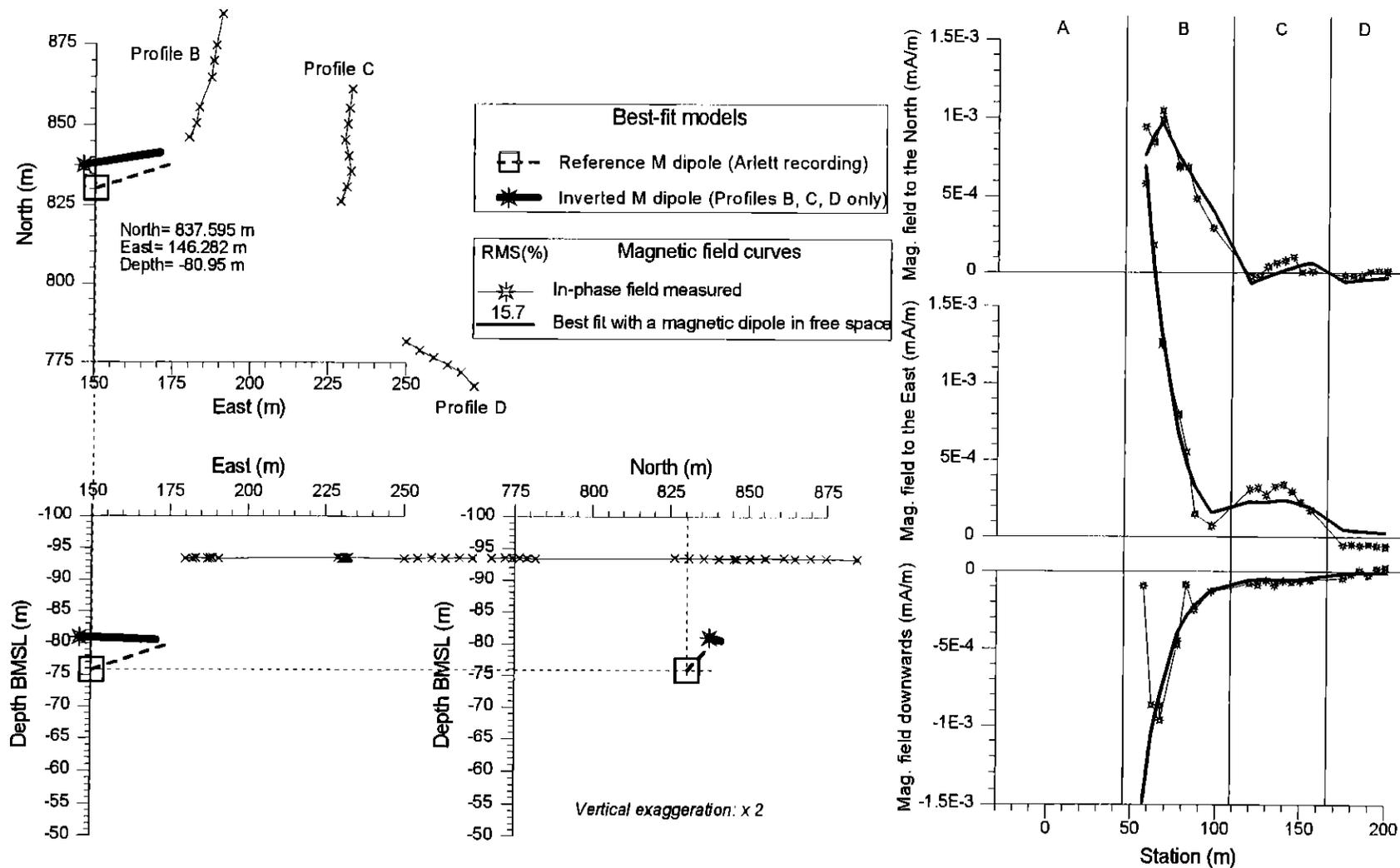


Fig. 17 - Inversion des mesures SlimBoris à 70 Hz pour le dipôle émetteur subvertical avec restriction des données aux profils B, C et D. L'écart entre la solution courante et la solution Ariett de référence est de (7,15 ; - 4,01 ; - 5,1) m sur les directions (nord, est, bas). L'écart global, de 9,7 m, représente 55 % de la profondeur verticale ou 25 % de la profondeur oblique (qui est ici d'environ 39 m).

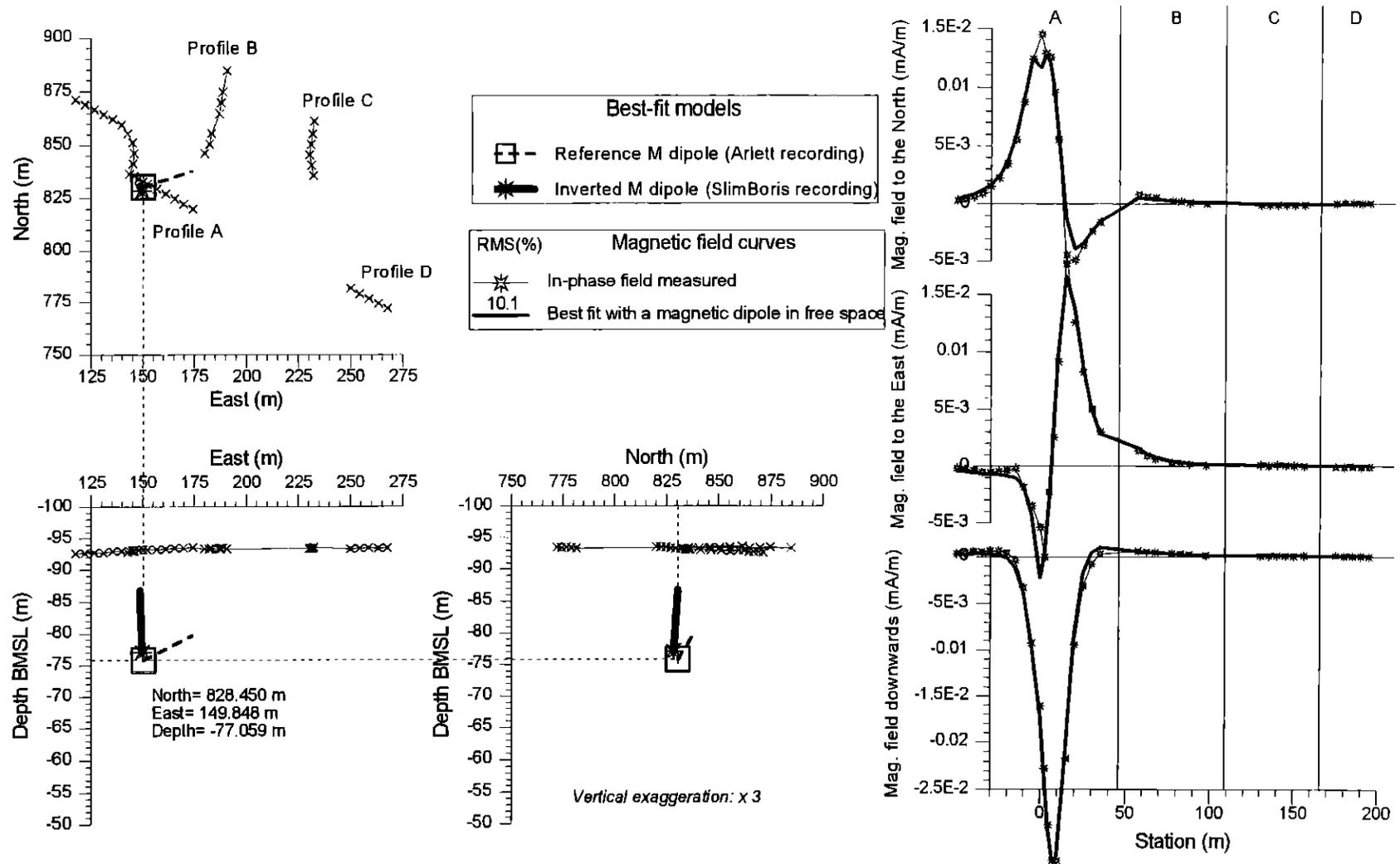


Fig. 18 - Inversion des mesures SlimBoris à 70 Hz pour le dipôle émetteur subvertical. La donnée inversée est le champ en phase sur l'ensemble des profils A à D. Le dipôle solution est matérialisé par un astérisque central et un segment épais indiquant son orientation. Le champ de ce dipôle est figuré en trait épais. La solution de référence obtenue avec Arlett est matérialisée par un symbole carré avec segment tiré. L'écart entre la solution SlimBoris courante et la solution Arlett est de (- 2,0 ; - 0,45 ; - 1,2) m sur les directions (nord, est, bas).

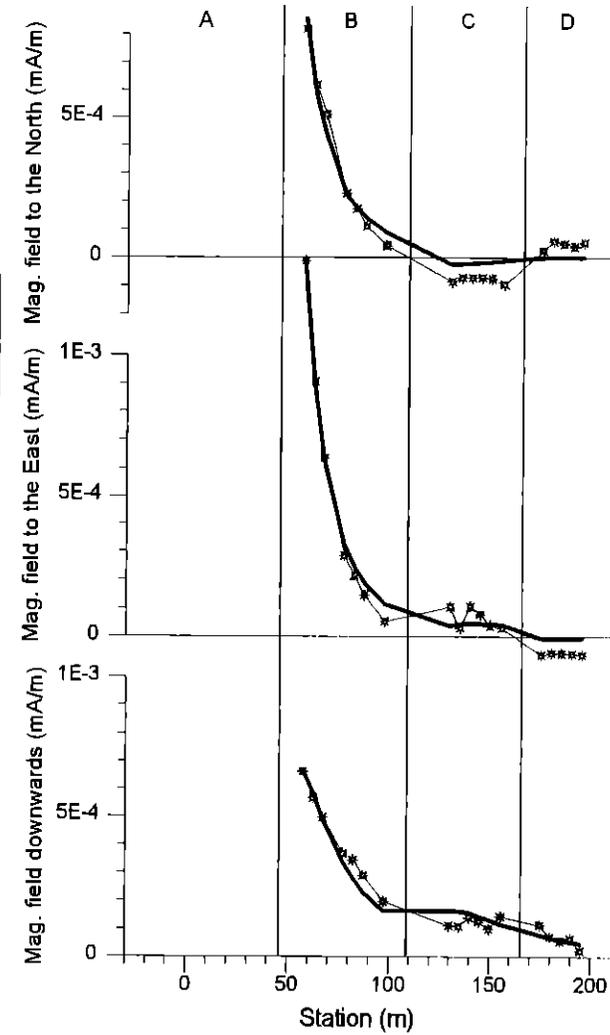
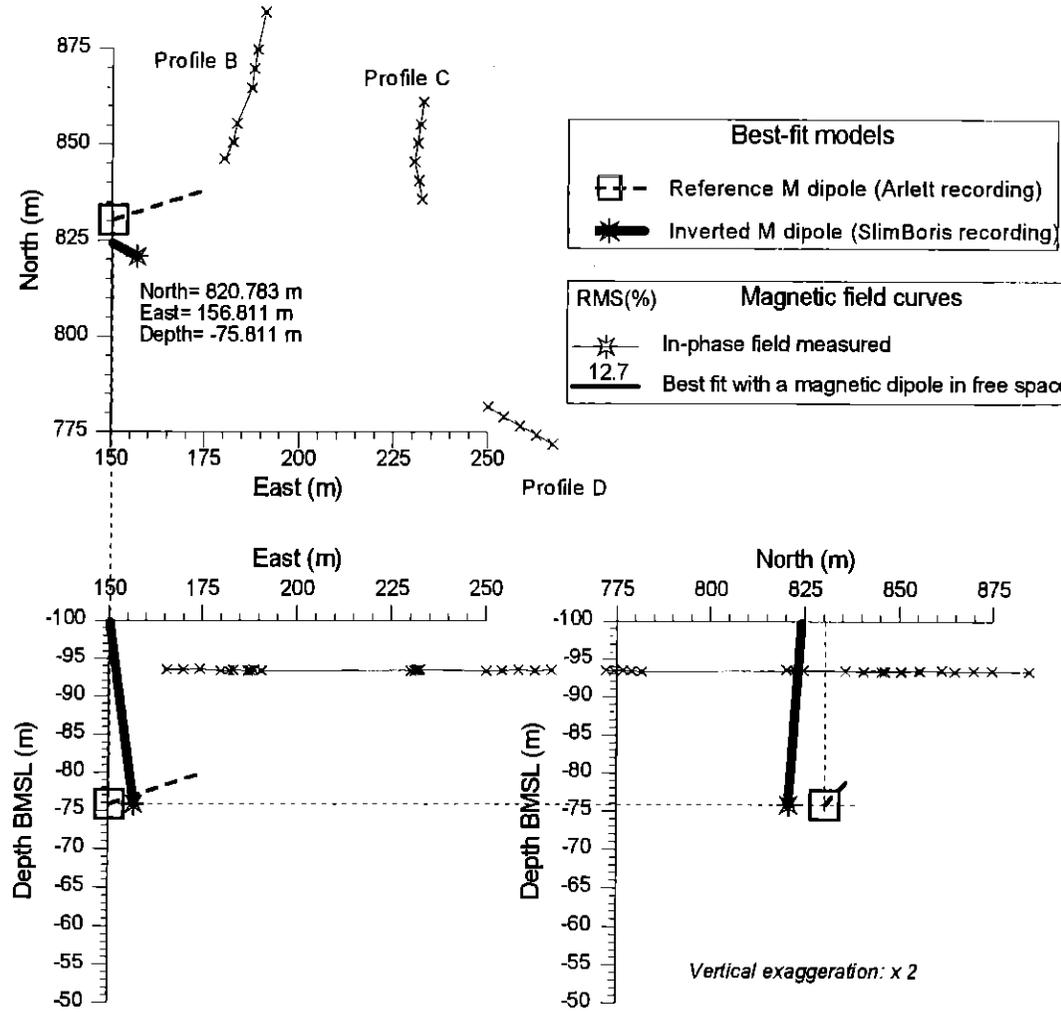


Fig. 19 - Inversion des mesures SlimBoris à 70 Hz pour le dipôle émetteur subvertical avec restriction des données aux profils B, C et D. L'écart entre la solution courante et la solution de référence est de (- 9,66 ; 6,52 ; 0,04) m sur les directions (nord, est, bas). L'écart global, de 11,7 m, est vers le SE et représente 67 % de la profondeur verticale ou 30 % de la profondeur oblique (qui est ici d'environ 39 m).

Conclusion

Le test réalisé avec la méthode du dipôle magnétique oscillant a été concluant, dans la mesure où il a permis de localiser une cavité avec une précision en X, Y, Z de l'ordre de 30 cm à une profondeur d'environ 17 m sous la surface (soit environ 2 % de la profondeur).

La configuration matérielle idéale a été définie. Elle consiste à utiliser la sonde émettrice du système SlimBoris avec la sonde réceptrice du système Arlett, à la fréquence 70 Hz.

Dans cette expérience particulière, la question de la mise en place du câble a été résolue, grâce à la proximité de l'entrée du réseau karstique, en utilisant une bobine de rallonge de 100 m que le plongeur dévidait en remontant depuis la cavité vers la surface.

Pour une opération à plus grande distance de l'entrée du réseau (par exemple au-delà de 100 m), cette procédure ne pourra probablement pas être appliquée. Pour ce type de cas, une source autonome fonctionnant sur batterie 12V par intervalles de temps programmables a été imaginée et pourrait être fabriquée pour un coût relativement faible.

Dans les conditions du Parc floral, les données de productivité pour la phase d'acquisition (hors mise en place et repli) sont les suivantes :

- **montage/démontage de la chaîne d'acquisition** : 2 h à 2 personnes par journée de mesure ;
- **mesure des stations en surface** : 2 h à 2 personnes par point souterrain à localiser (hors intervention plongeur).

Ces données permettent d'envisager le repérage d'environ trois positions souterraines par journée de terrain. Ce rendement est à revoir à la baisse si la profondeur des cavités est plus grande, en raison des plus grandes distances à parcourir et de la décroissance du rapport signal/bruit qui demande des durées d'acquisition plus grandes.

À cela s'ajoute le temps de traitement et d'interprétation des données : une fois réglés les problèmes généraux de compilation (système de coordonnées, angle de convergence des méridiens, déclinaison magnétique...), cette seconde phase demande environ une demi-journée de géophysicien par position d'émetteur.

La réflexion menée dans cette étude dépasse largement le cadre du réseau karstique du Loiret, et la méthode utilisée pourrait s'appliquer à tout réseau de cavités souterraines d'accès difficile dans lequel la topographie classique (par théodolite) n'est pas envisageable ou est trop coûteuse. On pourrait par exemple concevoir une action d'aide à la topographie des cavités de la ville d'Orléans (repérage précis par rapport au plan cadastral) dans le cadre d'une action locale de Service public.

Remerciements

Cette étude a été financée par la Direction de la Recherche du BRGM dans le cadre du projet de recherche en géophysique dirigé par G. Grandjean. Je remercie vivement les décideurs pour l'attribution d'urgence, en période de congés, de ce financement imprévu.

IRIS Instruments a participé gracieusement au test de terrain en mettant à disposition le treuil de 500 m, le PC d'acquisition SlimBoris, et en fabriquant un connecteur étanche destiné à relier deux pieds de câbles femelles.

L'implantation topographique des stations de mesure a été réalisé gracieusement dans le cadre d'un stage de formation au GPS organisé par F. Lebert (BRGM).

Je remercie vivement les plongeurs du club « Spéologie Subaquatique Loiret », P. Albéric, P. Boismoreau et J. Munerot, qui ont installé la sonde émettrice dans le boyau karstique. Un remerciement spécial est adressé à P. Boismoreau qui m'a assisté pendant toute la durée de l'intervention, ainsi qu'à deux étudiants de P. Albéric qui servirent de manœuvres tandis que j'effectuais les acquisitions à la station de base.

Enfin, la direction du Parc floral est remerciée pour son appui logistique : autorisation de circuler, fourniture de courant électrique, aide des jardiniers pour le transport sur les pelouses...

Bibliographie

- Alayrac C., Bourgeois B. and Valla P. (1999) - A borehole Slingram System for mineral exploration, 2nd Quart. Symp. in Three-Dimensional Electromagnetics, Salt Lake City, Oct. 1999. Expanded abstracts, p. 244-247.
- Baudoin P., Rogin G. et Rouaud A. (1969) - Localisation d'un dipôle magnétique oscillant à travers un recouvrement, Rap. BRGM 69 GPH 036.
- Bourgeois B., Legendre D., Lambert M. and Hendrickson G. (1999) - Arlett : a prototype 3-component borehole EM system, in Oristaglio M. and Spies B. Eds. Three-Dimensional Electromagnetics (SEG series 'Investigations in Geophysics'), p. 625-657.
- Bourgeois B., Suignard K., and Perruson G. (2000) - Electric and magnetic dipoles for geometric interpretation of 3-component electromagnetic data in geophysics. Inverse Problems, 16, p. 1225-1261.
- Rouaud A., et Rogin G. (1969) - Localisation par la méthode du dipôle magnétique oscillant d'une cavité karstique à Port-Pin, Port-Miou (Cassis). Rap. BRGM 69 GPH 037.
- Suignard K. (1997) - Interprétation de données électromagnétiques triaxiales par méthodes inverses. Mémoire de stage (IRIS/BRGM) pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'EOST.
- Wait J. R. (1971) - Electromagnetic induction technique for locating a buried source, IEEE trans. On geoscience and electronics, GE-9, 95-98.
- West G. F. and Macnae J-C. (1991) - Physics of the Electromagnetic Induction Exploration Method in Nabighian M. N. Ed. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol. II, Part A, p. 1-45.

BRGM
Service Reprographie
Impression et façonnage