

Stage d'instrumentation en géophysique au château du Bouchet (Nièvre)

-

B. Bonnefoy, O. Lengliné, M. Pétronille, A. Pouillet Dit Erguy et H. Shamsborhan

-

Master Recherche IPGP-Paris 7

Présentation et objectifs du stage

Nous avons effectué un stage d'instrumentation en géophysique du 19 au 23 Avril 2005 au château médiéval du Bouchet situé dans le département de la Nièvre, à quelques kilomètres de la ville de Lormes. Le but de ce stage a été de retrouver la localisation en profondeur d'éventuels vestiges et aménagements médiévaux associés à ce château (douve, cavités souterraines entre autre) par l'intermédiaire de trois types de méthodes géophysiques à savoir : électriques, gravimétrique et magnétique, que nous allons développer par la suite. Ces trois méthodes apportent une information différente et souvent complémentaires sur la zone d'étude. L'intérêt étant d'adapter notre instrumentation en fonction de ce que l'on recherche. Pour cela, il est important d'effectuer un traitement rapide des données, et ce pour une meilleur adaptabilité aux problèmes rencontrés.

1 Méthodes électriques

1.1 Principe et Appareillage

Le principe de la prospection électrique consiste à injecter un courant I dans le sol à l'aide de deux électrodes d'injection et de mesurer la différence de potentiel induite entre deux électrodes de réception (Cf. fig 1). Dans le cas d'un milieu inhomogène, les équipotentielles et les lents de courant sont déformés. Ceci induit que nous mesurons non pas la résistivité réelle mais la résistivité apparente du sous-sol. Notée a , elle correspond à la moyenne des résistivités du milieu.

La résistivité apparente a ne dépendra pas de la longueur du dispositif mais de la configuration géométrique utilisée ainsi que de la nature des structures en profondeur (lithologie des roches sous-jacentes, présence d'eau ou pas...). La profondeur d'investigation dépend elle aussi des propriétés du sous-sol : une règle empirique simple donne cette profondeur entre $\frac{L}{6}$ et $\frac{L}{2}$ (L étant la distance entre les deux électrodes d'injection). Ainsi, il est possible de déterminer la structure du sous-sol.

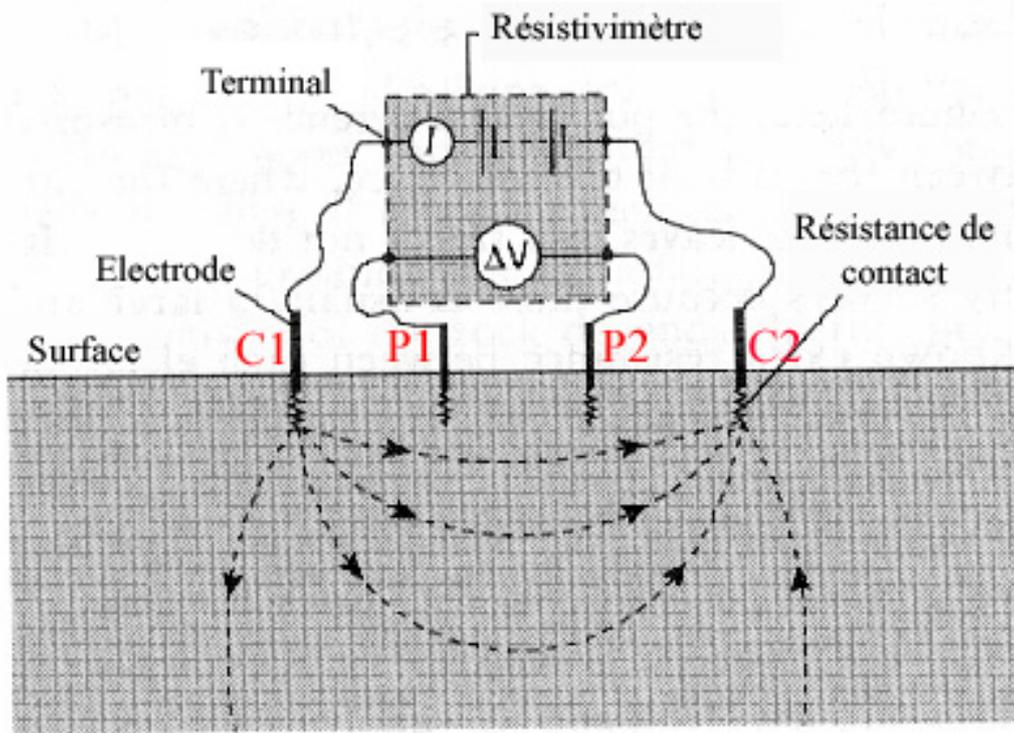


FIG. 1 – Schéma du dispositif expérimental utilisé dans le cas de la prospection électrique. Les électrodes C1 et C2 (injection) et P1 et P2 (potentiel) forment un quadripôle. La résistivité apparente (ρ_a) est déduite de la différence de potentiel.

Nous avons utilisé le matériel suivant pour les prospections électriques (Cf. fig 2) :

- Une batterie de 12 V (préalablement chargée) comme source de courant.
- Deux électrodes d'injection du courant électrique, C1 et C2.
- Deux électrodes de mesure du potentiel, P1 et P2.
- Un résistivimètre Terrameter SAS 300 Abem permettant de calculer la résistivité électrique apparente du sous-sol. Le courant injecté était de 50 mA pour l'ensemble des mesures.

1.2 Méthode Wenner : traîné électrique

Il s'agit de placer les quatre électrodes formant un quadripôle le long d'un profil linéaire. En conservant le dispositif de mesure de dimensions fixes et en le déplaçant tous les mètres sur la même ligne, nous avons obtenu un profil de résistivités apparentes à profondeur quasi constante. Nous avons ensuite déplacé le dispositif sur des profils espacés de 1 m et ceci sur 10 m au total afin de couvrir au mieux la zone supposée intéressante. Nous avons finalement obtenu des cartes de résistivités apparentes (Cf. paragraphe 4.1).

Dans un premier temps, nous avons choisi de placer les quatre électrodes à une équidistance de 1 m (Cf. fig.3) : dans ce cas, nous avons huit à dix points par profil et la profondeur d'investigation variait entre 0,50 et 1,50 m. Nous avons ensuite réalisé des profils aux mêmes emplacements que précédemment mais selon le dispositif de la figure 4 dans le but de sonder plus

profondément le sol, c'est-à-dire entre 0,83 (profondeur égale à $\frac{AB}{6}$) et 2,50 m ($\frac{AB}{2}$). Nous avons entre cinq et six points par profil.

Avantages et inconvénients de cette méthode : Elle permet de suivre la continuité latérale d'une couche, d'élaborer rapidement des profils aussi long que le permet le terrain ainsi que des cartes de résistivités pouvant couvrir de larges zones et donnant une bonne idée de la morphologie et de la lithologie du terrain étudié. Mais cette méthode étant très sensible à l'état hydrique du sol n'en reste pas moins approximative. De plus, la profondeur sondée maximale est de $\frac{AB}{2}$, soit dans notre cas seulement de 1,50 et 2,50 m.

1.3 Méthode Schlumberger : sondage électrique vertical

Les électrodes sont disposées de façon symétrique par rapport au centre du dispositif : les électrodes d'injection sont écartées progressivement par rapport au centre du profil afin de sonder le sol de plus en plus profondément à la verticale de ce point (Cf. fig.5). Donc contrairement au dispositif Wenner pour lequel nous avons déplacé les électrodes le long de profils parallèles, le dispositif de la méthode Schlumberger reste fixe sur un même profil tandis que l'on augmente les distances entre les électrodes : le courant passe alors dans un volume du sous-sol de plus en plus grand et on accroît progressivement la profondeur d'investigation. Nous avons réalisé trois sondages électriques parallèlement au mur d'enceinte (donc perpendiculaires aux profils effectués avec la méthode Wenner), à des distances de 1, 2 et 7 m.

Avantages et inconvénients de cette méthode : Elle permet d'avoir une bonne vision du sous-sol, donc de la succession des couches, à la verticale du point de mesure. Cependant, il est important de noter que cette méthode est théoriquement applicable à un sous-sol idéalement stratifié, homogène et infini, ce qui ne fut bien sûr par notre cas.

1.4 Calcul de la résistivité réelle

La résistivité électrique (en $\Omega.m$) est donnée par la formule :

$$\rho = \frac{\Delta V}{\Delta I} K \quad (1)$$

K est le facteur de forme. Il dépend de la configuration géométrique des électrodes. Il est ainsi donné par la formule :

$$K = 2\pi \frac{1}{\frac{1}{C1P1} - \frac{1}{P1C2} - \frac{1}{C1P2} + \frac{1}{P2C2}} \quad (2)$$

Ainsi, K sera de 2π dans le cas de la figure 3 et de 6π dans le cas présenté à la figure 4, tandis que sa valeur variera constamment au cours des sondages électriques.

2 Méthodes gravimétriques et topographiques

2.1 Principe et Appareillage

Dans le but de détecter des anomalies de masse en profondeur, nous avons employé un gravimètre. Le principe du gravimètre est de déterminer la valeur relative du champ de pesan-

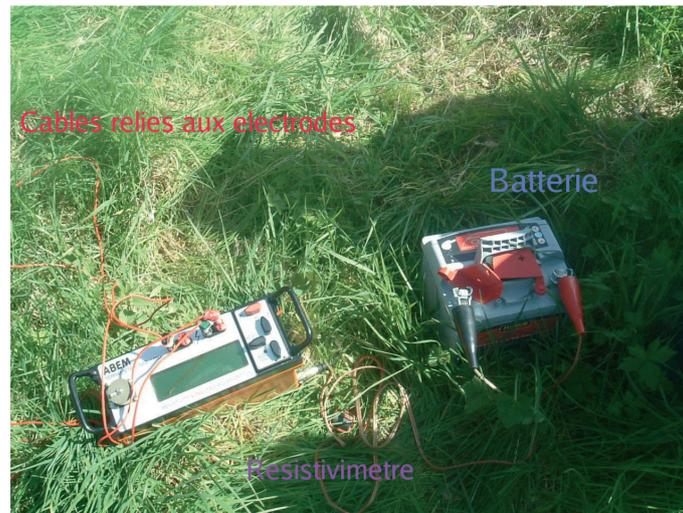


FIG. 2 – Photographie montrant les différents appareils utilisés pour les prospections électriques (Wenner et Schlumberger).

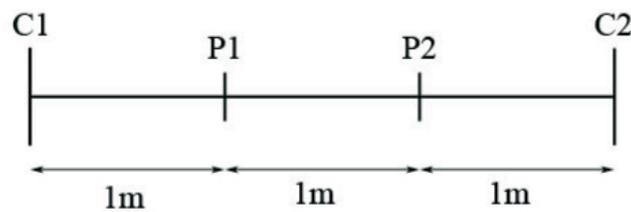


FIG. 3 – Principe de la prospection électrique type Wenner pour une profondeur de sondage comprise entre 0,50 et 1,50 m.

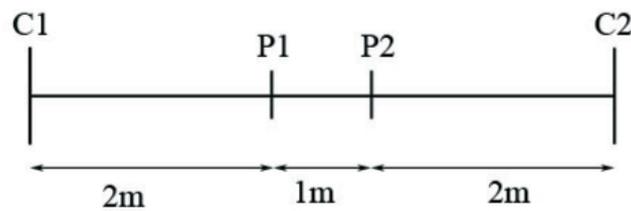


FIG. 4 – Principe de la prospection électrique type Wenner pour une profondeur de sondage comprise entre 0,83 et 2,50 m.

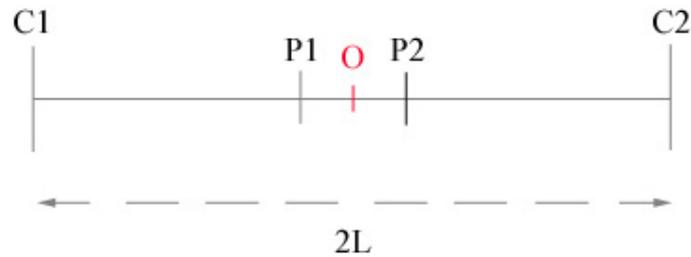


FIG. 5 – Principe général de la prospection électrique type Schlumberger à des profondeurs variables.

teur g au point de mesure. Pour cela, un ressort placé dans l'appareil s'allonge en fonction de l'intensité de la valeur de g (Cf. fig. 6). Un courant parcourant le ressort a donc une intensité qui change en fonction de la variation de la longueur du ressort. Finalement, cette mesure du courant est interprétée par l'appareil en terme de valeur du champ de pesanteur. Un gravimètre est un appareil de très haute précision qui requiert par conséquent une attention particulière lors de son utilisation. Il est ainsi capital de stabiliser horizontalement l'appareil (positionnement altimétrique de précision), tant pendant l'utilisation de l'appareil que pendant son repos.

Pendant certaines mesures, cette opération peut s'avérer délicate. En effet, pour des terrains très mous (terre gorgée d'eau) ou sur des surfaces sujettes à d'importantes vibrations (planches de bois du pont par exemple), il est difficile de garder l'horizontalité de l'appareil pendant toute la durée de la mesure. Pendant son temps de repos, le gravimètre doit aussi être horizontal et sous tension afin de conserver à l'intérieur de l'appareil une température constante. Il faut aussi prendre en compte le problème de la dérive instrumentale qui existe du fait des nombreuses pièces mécaniques de l'appareil (par exemple, la déformation plastique du ressort). De même, la valeur donnée par l'appareil est automatiquement corrigée des effets liés aux variations journalières du champ de pesanteur (marées terrestres). Pour finir, l'écart type appelé déviation standart est aussi donnée par le gravimètre et correspond à des micro-séismes. Il est pris en compte dans nos calculs.

Une fois le gravimètre positionné de façon horizontale, nous lançons une mesure qui consiste finalement à faire une moyenne sur cent calculs (un calcul par seconde) et les valeurs les plus aberrantes sont rejetées (au plus deux valeurs ont été rejeté par mesure, ce qui est tout à fait acceptable). Nous avons effectué nos mesures tous les 1 m , 2 m ou 4 m le long d'un profil de 50 m allant de l'arbre au milieu de la cours jusqu'à un chemin en pente plus en contrebas et passant par le pont (Cf. fig.17).

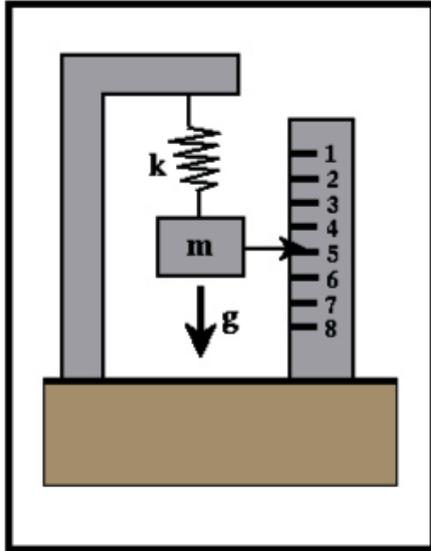


FIG. 6 – A gauche : schéma illustrant le principe de fonctionnement du gravimètre relatif thermostaté Scintrex utilisé. L'allongement du ressort à quartz sous l'effet de la gravité g modifie l'intensité du courant qui circule à travers l'appareil. Cette intensité est traduite par l'appareil en terme de gravité. A droite : photographie des expérimentateurs effectuant une mesure gravimétrique. L'appareil doit rester horizontal pendant toute la durée de la mesure.

2.2 Corrections

Pour que les valeurs déterminées par le gravimètre soient directement comparables entre elles, certaines corrections sont nécessaires :

- La correction liée à la dérive instrumentale (Cf. paragraphe précédent et Fig. 7).
Il faut corriger au cours du temps la variation introduite par le changement des propriétés de l'appareil. Pour cela, un retour à la base (piquet 15, soit une distance de 20 m) a été effectué toutes les cinq mesures.
- La correction à l'Air Libre : nous devons corriger nos valeurs mesurées afin de pouvoir les comparer entre elles. L'attraction gravitationnelle diminue avec la distance au centre de la Terre (champ newtonien). Ainsi un point de mesure se trouvant à une altitude plus élevée que notre niveau de référence nécessitera une correction Air Libre négative. Pour notre profil gravimétrique, le niveau de référence choisi est à la distance 0 m, c'est notre premier piquet.
- La correction de Plateau : à l'échelle à laquelle nous travaillons, la courbure de la Terre est négligeable. Nous devons tenir compte des masses situées entre le niveau de notre point de mesure et notre niveau de référence sur lequel nous calculons g . Pour pouvoir comparer nos valeurs entre elles, nous devons ajouter ou soustraire à la valeur mesurée l'effet des masses (selon que l'on se trouve au-dessus ou sous le niveau de référence) disposées selon un plateau horizontal semi-infini entre notre niveau de mesure et celui de référence.

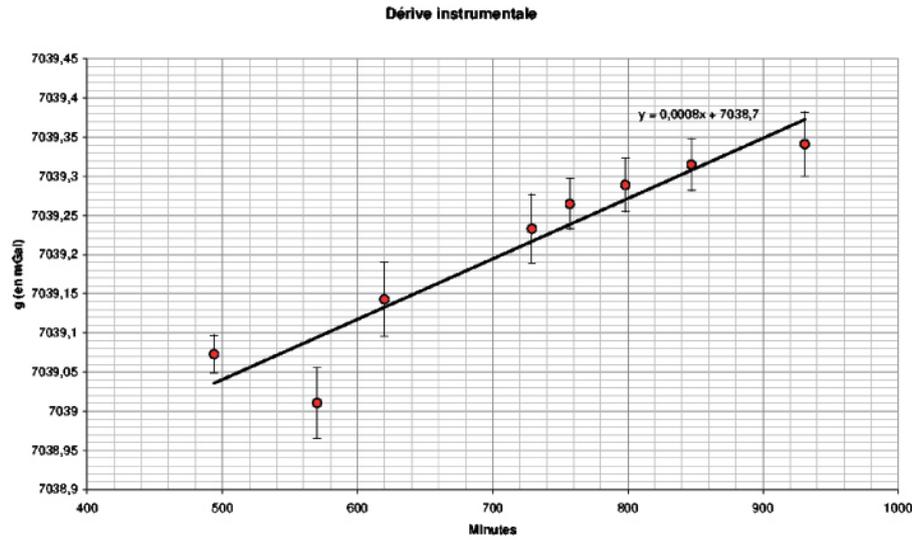


FIG. 7 – Valeurs mesurées du champ de pesanteur g à notre base (piquet numéro 15, soit une distance de 20 m) au cours du temps. Une régression linéaire de ces valeurs nous donne la dérive instrumentale.

2.3 Mesure de la topographie

La mesure de la topographie a été obtenue à partir d'un niveau de référence (piquet 1, distance 0 m). Les mesures ont été faites à l'aide d'une mire, au travers d'une visée (Cf. fig 8). Cette visée a été déplacée latéralement, le long du profil, de manière à ce que nous ayons deux mesures d'un même point selon deux références différentes, à savoir une mesure en avant et une autre en arrière (vrai pour tous les piquets sauf le premier) : il s'agit de la méthode de la visée par cheminement (Cf. fig 9). Ainsi, il est possible de définir chaque point par rapport au précédent, donc par rapport au niveau de référence.

2.4 Anomalie de Bouguer simple

En appliquant toutes ces corrections à nos valeurs mesurées, nous avons pu élaborer l'anomalie de Bouguer simple qui est donnée par la formule générale suivante :

$$A_{BS} = g_M - (g_T - 0,3086h + 0,0419\rho h) \quad (3)$$

où g_M et g_T sont respectivement les valeurs mesurée et théorique du champ de pesanteur, h est la hauteur en mètres (par rapport au point de référence) et ρ est une valeur de densité supposée pour le milieu (pour nos mesures nous avons pris $\rho = 2,5$). Nous avons finalement obtenu un profil gravimétrique corrigé de toutes les erreurs les plus importantes.



FIG. 8 – Photographie illustrant le principe de mesures topographiques. Un expérimentateur, à gauche, mesure à l'aide d'une visée, une mire tenue verticalement par un autre expérimentateur, à droite de la photographie. Deux valeurs en haut et en bas de la valeur principale sont aussi relevées afin de vérifier en faisant leur moyenne que la valeur centrale est bien correcte. Au final, nous obtenons la hauteur relative de la visée par rapport à l'endroit où est positionnée la mire.

3 Méthodes magnétiques

3.1 Principe et Appareillage

La méthode de prospection magnétique au sol s'appuie sur la mesure des composantes du champ magnétique terrestre et les variations occasionnées localement par la présence d'objets métalliques ou de minéraux magnétiques tels que les oxydes de fer. Sur Terre, la source principale du champ magnétique est liée à l'effet de dynamo provoquée par la rotation du noyau externe liquide autour de la graine solide. Mais un champ magnétique secondaire peut être produit par différentes sources plus localisées et s'ajouter ainsi au signal principal. Ce sont ces anomalies locales que nous avons essayé de déterminer. La valeur obtenue au point de mesure est soustraite de la valeur mesurée à la station de référence au même instant : cette différence est le reflet de la déformation des lignes de champ au point de mesure.

Pour mesurer la valeur du champ magnétique, nous avons utilisé un magnétomètre à proton (Cf. fig. 3.1) dont le principe repose sur la résonance magnétique nucléaire du noyau d'hydrogène. Les mesures ont été prises avec un pas de 1 m, préalablement choisi en fonction

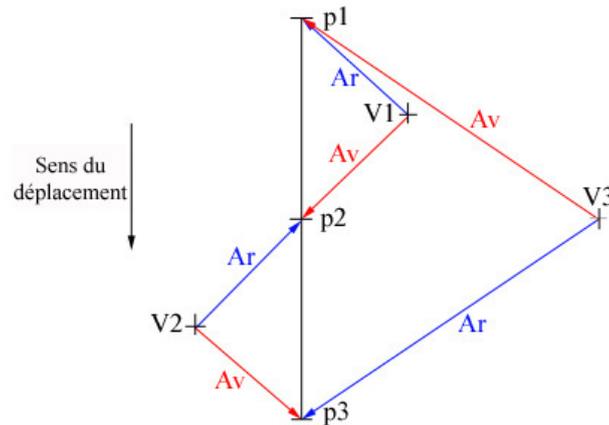


FIG. 9 – Schéma expliquant la méthode de la visée par cheminement.

de la taille de l'anomalie recherchée, et sur cinq profils au total pour $x = 0, 1, 5, 7$ et 9 m (Cf. fig.18).



FIG. 10 – Expérimentateur réalisant une mesure magnétique. Le déplacement se fait suivant une droite (profil). Une mesure est effectuée pour un intervalle de distance donné (1 m dans notre cas). Il faut bien faire attention à orienter l'antenne vers le Nord et ne porter aucun objet métallique au cours de l'expérience pour ne pas fausser les mesures.

3.2 Corrections

Dans le but de ne prendre en compte que les effets locaux introduits par des anomalies locales, nous avons soustrait à chacune des valeurs mesurées en un point une valeur dite "de base" (valeur mesurée au point de référence de coordonnées $(0;0)$, Cf. fig.18) qui tient compte de la variation du champ magnétique au cours du temps : cette différence est le reflet de la déformation des lignes de champ au point de mesure. Cette valeur de base est mesurée toutes les quatre minutes au point $(0;0)$ de notre zone d'étude et est censée refléter toutes les sources du champ magnétique à cet endroit, ainsi que ses variations au cours du temps. En corrigeant toutes nos mesures par rapport à cette valeur de base, nous avons obtenu directement l'anomalie magnétique locale.

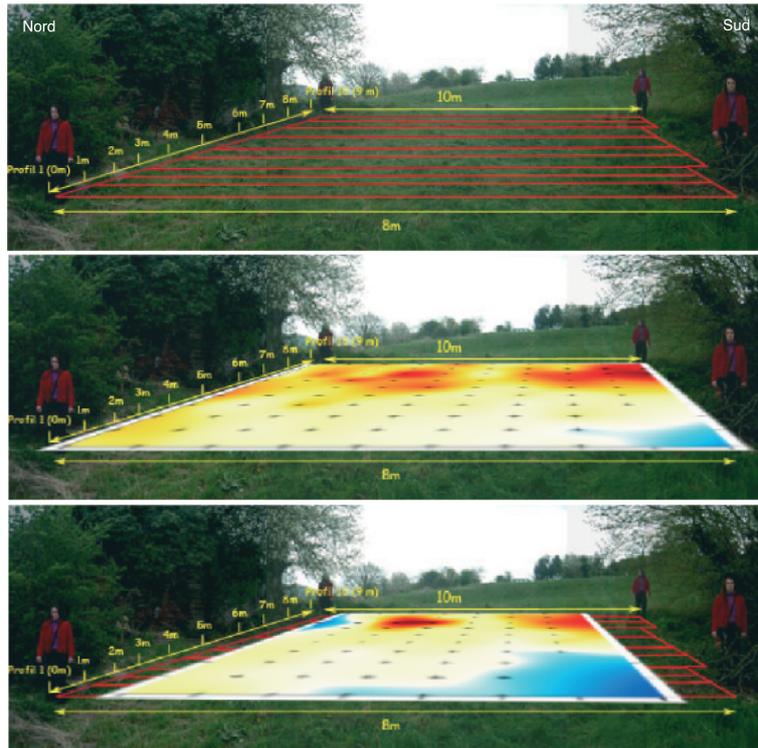


FIG. 11 – Résultats de la prospection électrique de type Wenner dans la zone d'étude. Sur la photographie du haut est représenté le terrain étudié ainsi que les profils réalisés (en rouge). Les distances sont indiquées en jaune sur les côtés. Les figures du milieu et du bas représentent respectivement les cartes de résistivités déterminées pour un espacement des électrodes de 1 m (Cf. fig.3) et 2 m (Cf. fig.4). Le Nord est vers la gauche de l'image.

4 Résultats et Interprétations

4.1 Mesures électriques

La prospection électrique effectuée sur le site du château du Bouchet avait pour objectif de retrouver d'hypothétiques douves le long du mur d'enceinte. Les cartes de résistivités électriques (Cf. fig. 11 et 12) que nous avons obtenu grâce à la méthode Wenner ont permis d'aller jusqu'à des profondeurs maximales de l'ordre de 1,50 m et 2,50 m ($\frac{AB}{2}$). Nous avons alors mis en évidence différentes structures : une zone de faible résistivité peut être observée dans le coin en bas de la carte ($Y < 5m$). La résistivité électrique semble augmenter pour les valeurs de Y supérieures à 7 m. Cette variation de la résistivité semble liée à la nature du terrain. En effet, la partie de plus forte résistivité est située dans une partie où nous avons observé une remontée de la roche mère. Cette observation semble en accord avec la localisation de la tour, qui doit être construite sur un terrain stable pour disposer de bonnes fondations.

Cependant nos cartes de résistivités électriques aux deux différentes profondeurs ne permettent pas de faire apparaître les douves que nous recherchons, à savoir des structures rectilignes de faible résistivité à proximité du mur. Nous pouvons seulement observer une linéation de faible résistivité (pour $X = 6$ m) sur nos deux cartes. Cette linéation pourrait être interprétée soit comme une variation de la profondeur des couches, soit comme un éventuel fossé comblé par du remblais.

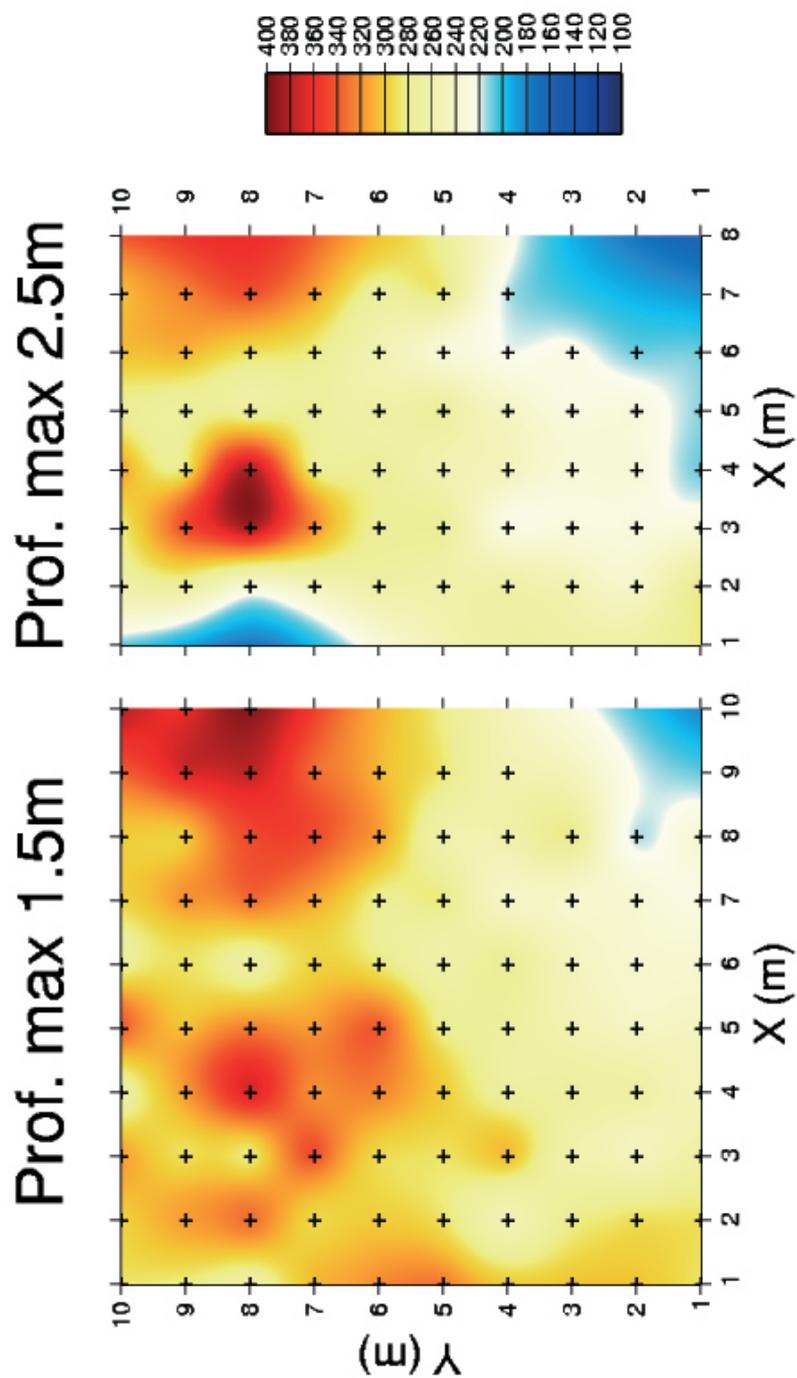


FIG. 12 – Cartes de résistivités électriques pour des profondeurs minimales de 0,50 et 0,83 m et respectivement maximales de 1,50 et 2,50 m. Le mur d'enceinte est quasiment confondu avec l'axe des Y. Le Nord pointe dans le sens des X décroissants (unités en $\Omega.m$).

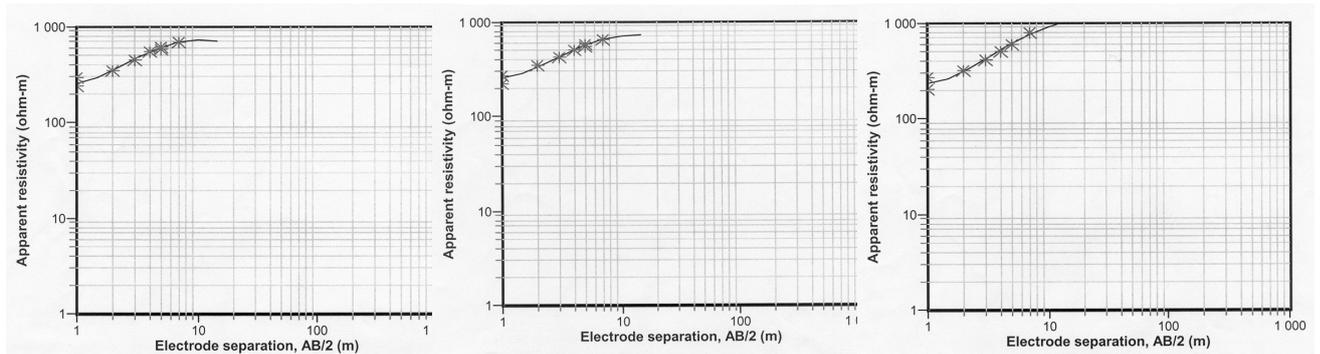


FIG. 13 – De gauche à droite : diagrammes bilogarithmiques obtenus pour les modèles déduits des sondages électriques A, B et C respectivement.

Épaisseur	Résistivité	Épaisseur	Résistivité	Épaisseur	Résistivité
1	225	1,2	236	1,3	225
5	1186	3,7	1225	6	2006,4
∞	428	∞	600	∞	1002,1

FIG. 14 – De gauche à droite : épaisseurs et résistivités obtenues pour les différentes couches des modèles déduits des sondages électriques A, B et C respectivement. Les épaisseurs sont en m et les résistivités en $\Omega.m$.

Pour la méthode Schlumberger, les sondages électriques effectués parallèlement au mur aux distances de 1, 2, et 7 m (respectivement les sondages A, B et C) mettent en évidence trois couches de résistivités différentes. Les valeurs des sondages ne reflètent la résistivité qu'à la verticale du point de mesure, c'est-à-dire à la verticale du milieu du profil. Pour les sondages A, B et C, les points milieux sont repérés sur la carte de résistivités par les coordonnées (1,1), (2,1) et (7,2). Les valeurs obtenues de la résistivité ont d'abord été reportées sur un diagramme en échelle bilogarithmique à l'aide du logiciel LABELLEC. Ce dernier nous a ensuite fourni un modèle fournissant pour chaque profil la succession des couches de résistivités différentes et leurs épaisseurs. Les résultats des modèles sont d'abord donnés sous forme de diagrammes bilogarithmiques, puis répertoriés dans les tableaux comme suit (Cf. fig.13 et 14) :

Il semble ressortir de ces différents modèles que les profils A et B sont très similaires. Nous voyons clairement la succession de trois couches :

- Une première couche de 1 à 1,30 m d'épaisseur environ (cette couche existe aussi pour le profil C) montrant une résistivité d'environ 230 $\Omega.m$.
- Une seconde couche de 3,70 à 5 m d'épaisseur montrant une résistivité d'environ 1200 $\Omega.m$.
- Une dernière couche d'épaisseur infinie montrant une résistivité comprise entre 400 et 600 $\Omega.m$. Cette dernière couche n'a pas d'existence réelle mais souligne tout de même la présence de terrains de moindres résistivité en profondeur.

Le profil C présente quant à lui une couche de plus forte résistivité (couche 2) qui peut s'interpréter comme une roche moins fracturée (plus homogène, plus saine) que celle trouvée pour les profils A et B.

4.2 Mesures gravimétriques et topographiques

Le profil topographique (Cf. fig. 15) effectué depuis l'arbre au milieu de la cours (Cf. fig.21) illustre bien le terrain que nous avons rencontré. La topographie est relativement plate sur le début du profil (les 28 premiers mètres) jusqu'à la sortie du pont, puis baisse plus fortement de façon régulière (nous nous trouvons alors dans un chemin en pente emprunté par les voitures et composé de terre humide). L'humidité du sol dans cette partie du profil a d'ailleurs nécessité une très grande vigilance lors des mesures gravimétriques pour garder l'appareil horizontal pendant les 100 s de mesure.

Notons que lorsque nous avons "bouclé" notre profil topographique, une différence résiduelle de 7,50 cm a été trouvée. Cet écart peut être pris en compte à hauteur de 5,50 cm par les incertitudes de mesure (i.e. écart entre la visée du milieu et la moyenne entre les visées basse et haute). Cela implique que seulement 2 cm sur un profil de 30 points sont dus à des erreurs de manipulation, ce qui est un résultat plus qu'acceptable. En effet, on considère en général que l'erreur acceptable vaut \sqrt{n} où n est le nombre de mesures, soit dans notre cas une erreur acceptable de $\sqrt{30} \simeq 5,50\text{cm}$.

Le profil gravimétrique que nous avons réalisé semble mettre en évidence une anomalie principale et trois anomalies secondaires (Cf. fig.16) :

- L'anomalie principale est une anomalie négative de gravité au milieu de notre profil (entre 23 et 26 m). Elle s'interprète facilement car c'est à cet endroit qu'est situé le fossé sous le pont (Cf. fig.17). Les grandes incertitudes correspondantes à ces mesures s'expliquent par la difficulté de maintenir l'appareil dans une position horizontale sur le pont (grande sensibilité des planches de bois aux vibrations provoquées tant par le vent que par les allers et venues incessantes de certains encadrants...).
- Trois anomalies secondaires d'amplitudes plus faibles ont aussi été détectées, et bien qu'elles restent dans les barres d'erreurs des mesures, une interprétation peut être donnée. La première de ces anomalies est située à une distance entre 2 et 4 m de l'arbre. Cette anomalie positive est certainement liée à un matériel dense en profondeur. Nous pouvons constater qu'elle est située dans le prolongement d'un mur visible plus au Sud-Ouest (Cf. fig.17 et 21). Il est donc très probable que nous détectons ainsi les fondations de ce mur.

Les deux dernières anomalies sont également des anomalies positives. Elles sont situées entre 18 et 20 m pour la première (juste avant le pont) et entre 31 et 34 m pour la deuxième (juste après le pont). Ces deux anomalies semblent être également liées à la présence d'un ancien mur. Comme nous le voyons sur la figure 17 et d'après les observations de terrain, des murs se trouvent dans l'alignement de ces anomalies perpendiculairement au profil. Une fois encore, ces deux anomalies positives sont donc interprétées comme les fondations d'anciens murs.

Il est important de noter que les objets environnants tels la maison, les murs ou l'arbre ont une influence quasiment négligeable sur notre signal.

4.3 Mesures magnétiques

Les mesures magnétiques n'ont pas permis de faire ressortir d'anomalies pouvant être interprétées de manière significative. D'une part, l'amplitude des anomalies elles-mêmes sont

faibles (10 nTelsa), d'autre part, les longueurs d'onde de ces anomalies sont importantes (de l'ordre de la dizaine de mètre) (Cf. fig. 18 et 19). En outre, il est difficile de s'imaginer directement sur le terrain où se situent les anomalies les plus importantes du fait de la variation temporelle importante (du même ordre de grandeur que les anomalies détectées) du champ magnétique (Cf. fig. 20).

Ainsi, l'inconvénient propre à cette méthode, que nous avons éprouvée sur le terrain, est qu'elle nécessite un traitement rapide des données avant de poursuivre plus en avant la prospection.

De plus, il est à noter que les résultats liés aux mesures magnétiques peuvent être faussés par la présence de la station d'épandage située au milieu du champ dans lequel nous avons travaillé.

Mais il est difficile de quantifier son éventuel effet car, dans notre cas, uniquement les pièces métalliques sont susceptibles d'introduire des variations dans le signal du champ magnétique local et leur présence ou pas dans la station d'épandage est inconnue. Par contre, l'effet de la clôture du champ en fils barbelés et la présence à proximité de lignes à haute tension sont susceptibles d'avoir influencé réellement le signal magnétique enregistré.

Conclusion et Perspectives

Les principaux résultats que nous avons obtenu au cours de notre prospection géophysique au château du Bouchet sont les suivants :

- Les mesures électriques de type Wenner ont permis de détecter la trace d'une linéation de faible résistivité à 6 m du mur d'enceinte et à une profondeur comprise entre 0,50 et 2,50 m. Cette linéation pourrait être interprétée soit comme une variation de la profondeur des couches, soit comme un éventuel fossé comblé par du remblais. Les mesures de type Schlumberger quant à elles ont permis de mettre en évidence la présence de trois couches de résistivités d'abord faibles, puis beaucoup plus importantes qui rediminuent par la suite.
- Les mesures gravimétriques et topographiques ont permis de confirmer la présence visible sur le terrain d'un trou de quelques mètres sous le pont. Les trois autres anomalies secondaires seraient liées à l'influence d'anciens murs situés à proximité. Aucune cavité souterraine n'a donc été mise en évidence le long de notre profil gravimétrique.
- Les mesures magnétiques n'ont pas donné de résultats probants quant à la présence d'objets métalliques en profondeur. Plus de mesures auraient été nécessaires.

Notre étude a permis de compléter les résultats déjà obtenus les années précédentes, mais il reste certainement beaucoup d'informations à tirer du sous-sol de ce site. Il aurait donc été intéressant de réaliser des profils électriques perpendiculairement à ceux que nous avons effectués. Cela aurait permis de détecter une éventuelle anisotropie électrique dans le sous-sol et de mieux quantifier l'effet de la topographie sur nos résultats. De même, davantage de mesures gravimétriques au niveau de la cours ainsi que des mesures magnétiques sur l'ensemble du site s'avèrent nécessaires. L'utilisation de techniques radars et sismiques permettraient aussi de renforcer notre vision de la structure du sous-sol.

Annexes

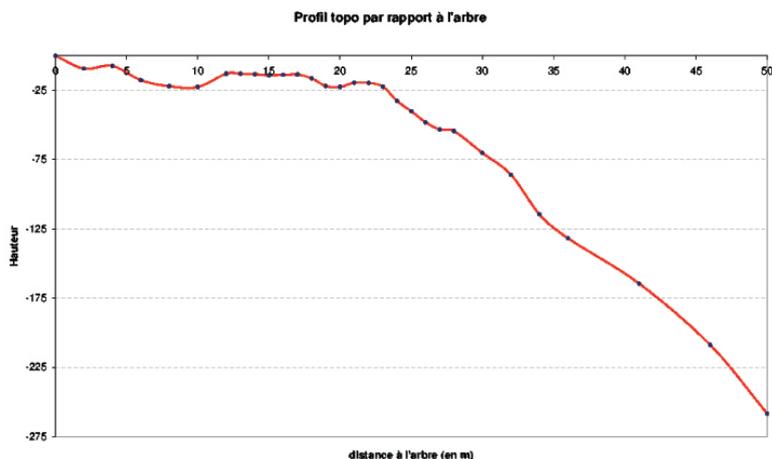


FIG. 15 – Profil topographique réalisé sur 50 m à partir de l'arbre au milieu de la cours en direction du pont. L'amplitude maximale de la variation de hauteur est de l'ordre de 2,50 m.

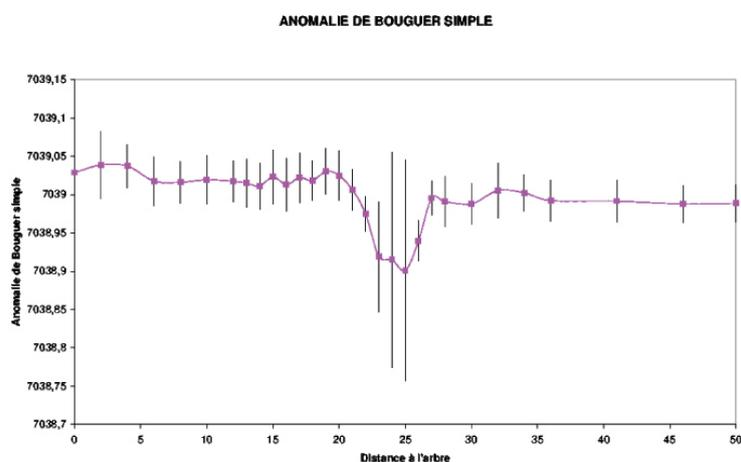


FIG. 16 – Tracé de l'anomalie de Bouguer simple déterminée le long de notre profil. Les valeurs du champ de pesanteur g ont été corrigées de la topographie, de l'anomalie à l'Air Libre, de l'anomalie de Plateau et de la dérive instrumentale. Les variations induites par les marées terrestres sont automatiquement corrigées par l'appareil. Les barres d'erreurs sont également données par le gravimètre (d'Écart standard). Toutes les valeurs sont en milligals (mGal). L'anomalie qui ressort le plus est celle liée au fossé entre 23 et 26 m. Cette variation est de l'ordre du dixième de milligal, résultat en accord avec l'anomalie gravimétrique créée par un trou de 3 m de profondeur.



FIG. 17 – Photographie illustrant notre profil gravimétrique de direction quasi Est-Ouest. Nous y voyons le mur responsable de l'anomalie positive à une distance de 4 m. Nous pouvons également voir les murs juste avant et après le pont, ce dernier étant situé entre 23 et 26 m.

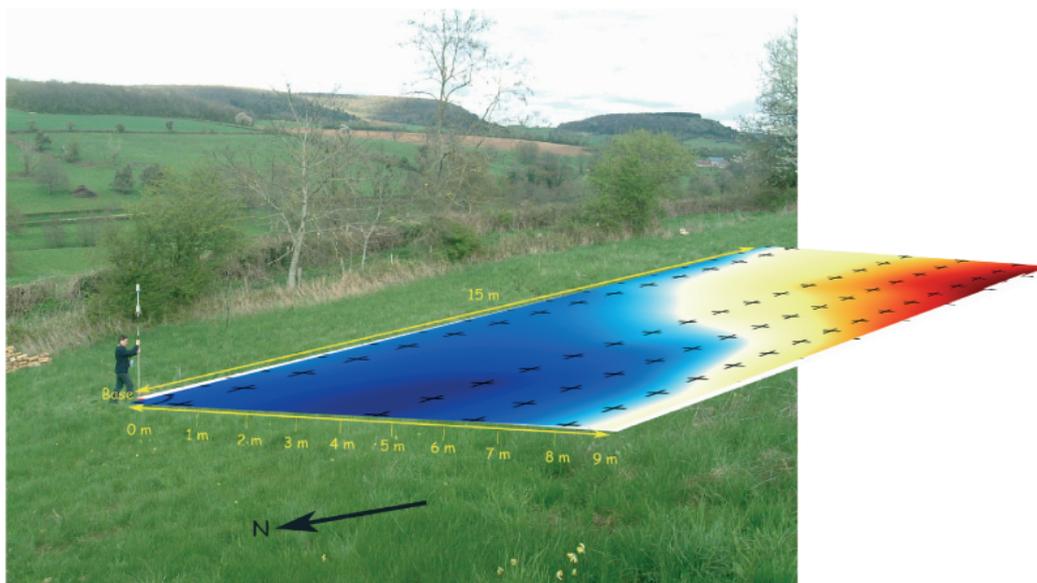


FIG. 18 – Photographie montrant un expérimentateur effectuant une mesure magnétique à la base. Sur la photographie de la zone d'étude est surimposée la carte des anomalies magnétiques obtenues, ce qui donne une bonne représentation dans l'espace de la position de ces anomalies sur le terrain.

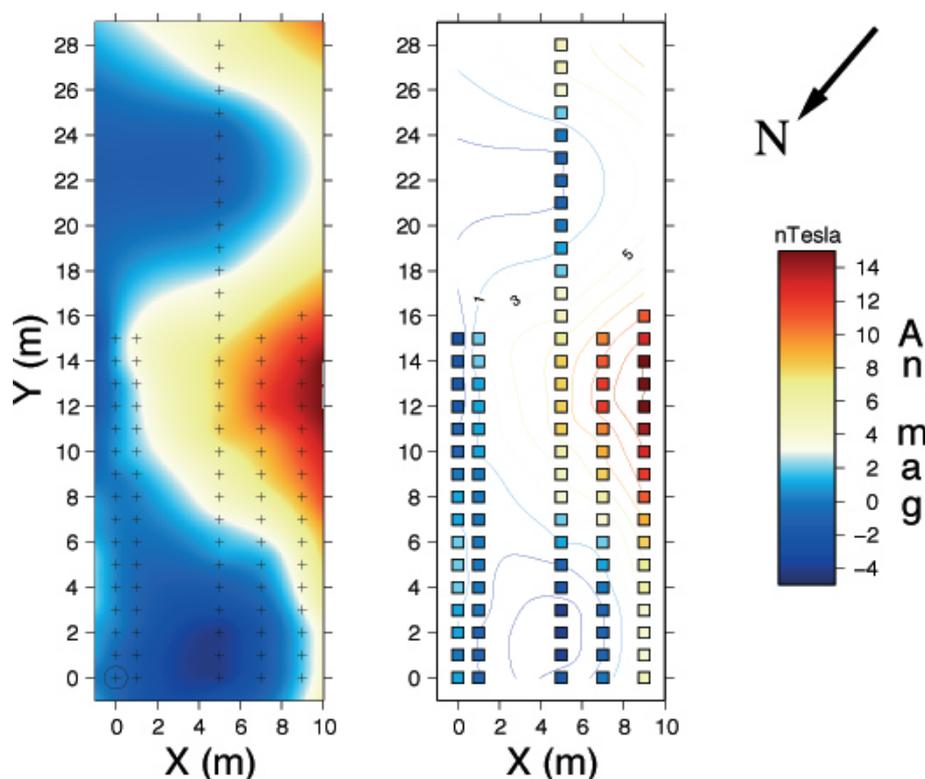


FIG. 19 – Résultats des anomalies magnétiques détectées dans la zone d'étude. La flèche indique le Nord. Sur la figure de gauche, chaque croix indique un point de mesure. Sur la figure de droite, les points de mesure sont représentés par des carrés. Nous pouvons alors identifier les zones pour lesquelles les anomalies ont été interpolées (par exemple l'anomalie positive vers $X = 10$; $Y = 28$). Le cercle au point de mesure $(0 ; 0)$ indique la base où ont été effectués les mesures pour la dérive temporelle.

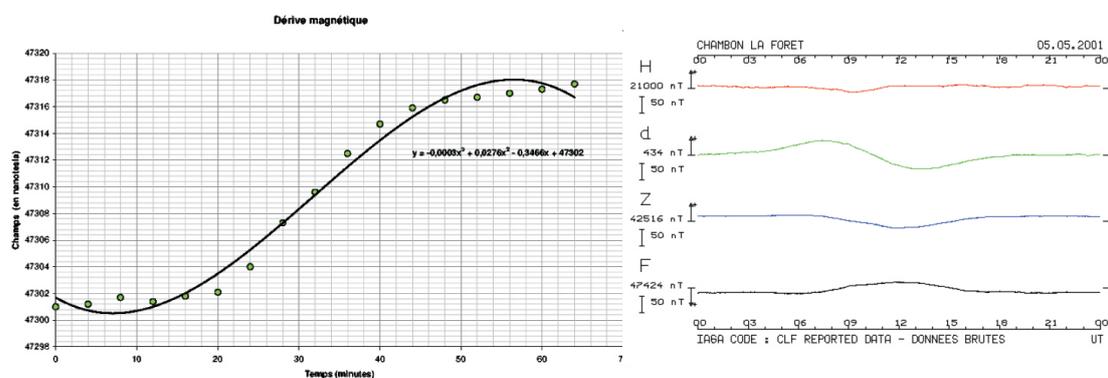


FIG. 20 – Variation temporelle du champ magnétique terrestre à notre base, figure de gauche. Pour comparaison se trouve à droite la variation du champ magnétique sur une période de deux jours à l'observatoire de Chambon la Forêt pour une journée "calme" (5 mai 2001).

