

Contribution à la caractérisation du type d'occupation des sols à partir des propriétés magnétiques

Marie Pétronille

Thèse sous la direction d'Albert Tarantola et d'Alain Tabbagh

2005-2008

Table des matières

Table des matières	4
1 Généralités	5
1.1 Magnétisme des sols (Thèse M. Dabas)	5
1.2 Principe de l'électromagnétisme - Mesure de la susceptibilité magnétique (Thèse E. Marmet)	7
1.3 Théorie sur la dépendance fréquentielle de la susceptibilité magnétique des sols (Thèse M. Dabas)	9
1.4 Caractéristiques des appareils de mesure (Thèse E. Marmet)	10
2 Mesures de la susceptibilité magnétique au laboratoire	11
2.1 Précautions pour le prélèvement des échantillons	11
2.2 Procédé de mesure de la susceptibilité magnétique	11
3 Mission du 02-03/11/05 : site de Vert St Denis (Melun/Cesson)	19
3.1 Organisation	19
3.2 Site	19
3.3 Objectif de la prospection et travail sur site effectué	19
3.4 Traitement des données	23
3.5 Résultats et interprétation	24
A Résumés d'articles	25
B Étude de la susceptibilité magnétique de roches issues d'un forage à Epenèdre (Charente)	37
B.1 Introduction	37
B.2 Contexte géologique	38
B.3 Mesures en laboratoire	39
B.4 Résultats et interprétations	43
B.5 Conclusion	44
C Magnétomètre à césium G858	47
C.1 Mode opératoire	47

D	Cartographie de la viscosité magnétique des sols (poster Julien Thies-son)	49
D.1	La viscosité magnétique	49
D.2	Possibilités de mesure	49
D.3	Modélisation	49
D.4	Applications et développements	50
	Bibliographie	53

Chapitre 1

Généralités

1.1 Magnétisme des sols (Thèse M. Dabas)

Eugène Le Borgne a montré par ses nombreux travaux pionniers en 1955 l'augmentation anormale de la susceptibilité magnétique des sols. Des études ont aussi porté sur les relations entre le sol et la roche mère dans un contexte archéologique ([18] ...). Mesures de la susceptibilité magnétique aussi à l'aide d'un pont alternatif (Scollar, 1965, 1968) régulièrement pratiquées dans un cadre archéologique.

Les propriétés magnétiques reflètent d'abord la nature des constituants. La majorité de ces constituants sont des oxydes de fer qui cristallisent dans la forme spinelle (forme cubique à face centrée permettant à un grand nombre de cations de tailles différentes d'être inclus).

Les minéraux magnétiques dominants sont composés de la série ferrimagnétique des titanomagnétites avec comme pôles la magnétite (Fe_3O_4 , ferrimagnétique) et l'ulvospinelle (Fe_2TiO_4 , antiferromagnétique) évoluant par oxydation vers la série des titanomagnhémite et la série des titanohématites avec comme pôles l'hématite (αFe_2O_3 , antiferromagnétique) et l'ilménite ($FeTiO_3$). Les minéraux de la famille des titanomagnétites sont responsables de la majeure partie du magnétisme des sols, en particulier la magnétite et la maghémite (γFe_2O_3 , ferromagnétique) (sauf cas particuliers : sables, calcaires purs, matière organique).

Ces minéraux sont souvent qualifiés de secondaires car ils ne proviennent pas de la roche mère mais d'un processus chimique :

L'augmentation de la susceptibilité des sols superficiels semble un phénomène très commun excepté sur les sols ayant des concentrations originelles en fer très faibles ou sous des climats très chauds ou très froids.

Mullins (1977) indique 4 possibilités de formation de la maghémite dans un sol :

1. Oxydation de la magnétite à BT (basse température).
2. Transformation par la chaleur de certains minéraux antiferromagnétiques. Le Borgne envisage cette transformation en 2 étapes :
 - Réduction d'oxydes et d'hydroxydes sous des conditions réductrices (par ex., remontée de la nappe phréatique)

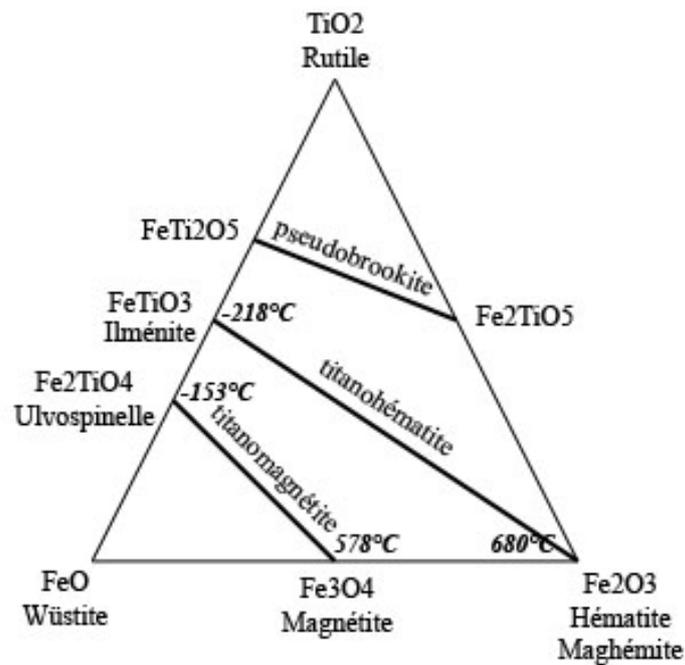


FIG. 1.1 – Diagramme ternaire $TiO_2 - FeO - Fe_2O_3$ montrant les principaux oxydes Fe-Ti, leur composition et leur température de Curie.

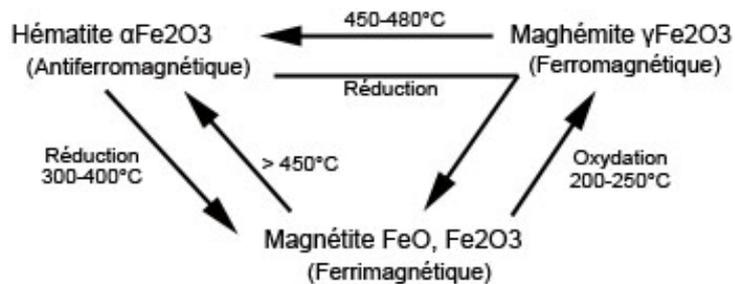


FIG. 1.2 – Processus chimiques expliquant la formation des différents oxydes de fer présents naturellement.

1.2. PRINCIPE DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME - MESURE DE LA SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE

- Oxydation de la magnétite produite en maghémite (par ex. pendant une phase de refroidissement).
- 3. Déshydratation de la lépidocrocite ($\gamma FeOOH$) (réaction qui apparaît entre 275 et 410°C sur des sols peu drainés).
- 4. Dernier mécanisme (mais encore hypothétique ?) peut-être le plus important pour expliquer la formation de la maghémite ou de la magnétite microcristalline à partir d'oxydes ou d'hydroxydes faiblement magnétiques. Il a été montré l'action de certaines bactéries présentes dans la matière organique (M.O.) qui fournit le milieu réducteur ad hoc. Ces bactéries seraient capables de créer des chaînes de cristaux monodomains de magnétite. Il a été aussi découvert à la fin des années 90 qu'un nombre considérable de bactéries est sensible au champ magnétique (déplacement suivant les méridiens magnétiques). Ces bactéries vivent dans des milieux anaérobies, atteignent des concentrations de 100 à 1000/mL, ont une taille de 3 à 5 μm et ont été trouvées dans le sol, les marécages, les lacs et les sédiments marins. Elles semblent répandues dans tous les sédiments aquatiques avec $6 < pH < 8$. Observation au MEB de chaînes de particules riches en fer aussi bien dans le cytoplasme que dans les ribosomes de ces bactéries. Les spectres Mossbauer ont montré qu'il s'agissait surtout de magnétite de diamètre 0,05 à 0,1 μm , donc de particules monodomains. Les bactéries mortes s'orientent d'elles-mêmes dans les lignes de champ. En vie, elles nagent dans les lignes de champ et l'application d'un champ antiparallèle entre 35 et 55 mT les fait nager dans le sens de ce nouveau champ. La synthèse de ces chaînes se transmet même dans les divisions cellulaires (détermination du gène porteur).

D'autres mesures montrent aussi la part des facteurs liés à la pédogenèse dans la mesure de la susceptibilité : en effet, des mesures sur des sols cultivés ont montré que les cristaux ferrimagnétiques sont principalement formés par des grains monodomains et superparamagnétiques. Mais il est difficile de faire la part dans une mesure de κ entre l'effet des facteurs liés à la pédogénèse du sol et l'effet anthropique. Augmentation aussi importante de κ dans les sites péri-urbains du fait d'une pollution du sol par des retombées atmosphériques de sphérules magnétiques venant de la combustion des charbons et des pétroles.

1.2 Principe de l'électromagnétisme - Mesure de la susceptibilité magnétique (Thèse E. Marmet)

Les méthodes électromagnétiques utilisent des champs électrique et magnétique variables dans le temps et de fait couplés entre eux. L'émetteur du dispositif génère un champ électromagnétique connu, appelé champ primaire. Tout corps magnétique ou conducteur plongé dans ce champ génère à son tour un champ électromagnétique, appelé champ secondaire. Le récepteur du dispositif reçoit un champ électromagnétique constitué de la somme vectorielle du champ secondaire et du champ primaire. Seule la mesure du champ secondaire nous intéresse car elle correspond à la réponse du sol.

La susceptibilité magnétique volumique est le rapport entre l'intensité d'aimantation in-

duite, J , et celle du champ qui la crée, H (champ inducteur). Il s'agit en fait de la facilité d'un matériau à être aimanté. L'intensité d'aimantation est le moment magnétique du matériel par unité de volume dans le champ magnétique. La susceptibilité magnétique du matériel κ (sans unité) peut être exprimée de la façon suivante :

$$\kappa = \frac{J}{H}$$

Le volume de terrain pris en compte par la mesure donné par l'appareil électromagnétique comprend de nombreuses hétérogénéités magnétiques. La susceptibilité magnétique apparente correspond alors à la susceptibilité magnétique d'un corps homogène équivalent.

Cycles d'hystérésis :

Pour des minéraux dia ou paramagnétiques, l'aimantation est proportionnelle à la valeur du champ appliqué. Au contraire, la représentation de l'aimantation J observée à la suite de l'application d'un champ externe fort H dans un matériel qui ne posséderait que des atomes ayant un moment magnétique permanent (matériaux ferromagnétiques) se traduit sous la forme d'une courbe appelée cycle d'hystérésis. Le chemin d'aimantation montre une irréversibilité : une fois revenu dans un champ nul, une aimantation subsiste dans le matériel étudié (aimantation rémanente à saturation Jrs). Il existe une aimantation maximale dite induite à saturation, J_s , au-delà de laquelle une augmentation de l'intensité du champ appliqué ne changera plus l'aimantation du matériel, tous les moments étant déjà orientés dans la direction du champ appliqué. Ce sont ces aimantations rémanente à saturation (Jrs) et induite (J_s), ainsi que le champ coercitif (Hcf , représentant la valeur de H pour laquelle J est nul : il y a compensation de l'aimantation acquise avec le champ de direction opposée) que nous avons calculés après correction pour la contribution paramagnétique. Le champ coercitif rémanent (Hcr), pour lequel le moment rémanent est nul (le moment rémanent dû au champ Hcr est égal à celui de direction opposée acquis précédemment), a quant à lui été déterminé en appliquant progressivement un champ inverse (backfield) après saturation.

Il est reconnu que l'anisotropie et la taille des domaines contrôlent les propriétés magnétiques du matériau.

Classement des grains magnétiques en fonction de leur taille :

- superparamagnétiques : Particules très petites (10^{-8} à 10^{-9} m) ; soumises à l'agitation thermique ; énergie magnétique des grains \leq énergie thermique. L'orientation de l'aimantation varie donc de façon aléatoire en l'absence de champ extérieur. Ces grains s'alignent dans la direction d'un champ appliqué et une aimantation résultante induite apparaît. Cette aimantation est plus importante que celle d'une substance paramagnétique (préfixe « super ») et plus grande que « l'équivalent » en grains mono- ou polydomaines. Leur importance dans le magnétisme des sols est

1.3. THÉORIE SUR LA DÉPENDANCE FRÉQUENTIELLE DE LA SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE

sûrement grande. Si on augmente la taille de la particule ou si on diminue $T^{\circ}\text{C}$, on passe à la zone des monodomains.

- monodomains : Rémanence plus forte de ces grains que pour les autres domaines. Cycle d'hystérésis simple et dépend de l'orientation du domaine, elle-même fonction de la forme du grain, par rapport au champ appliqué. En l'absence de champ extérieur, l'aimantation spontanée du grain (J_{SO}) se fixe selon des directions cristallographiques privilégiées (axes de facile aimantation).
- polydomains : En présence d'un champ extérieur, il y a croissance préférentielle des domaines orientés parallèlement au champ par déplacement des parois. Le champ coercitif diminue pour un tel assemblage, ainsi que κ en fonction du degré d'interaction (entre moments).

Normalement, la susceptibilité devrait donner une mesure de la concentration en fer du sol, sans référence à la taille des grains qui est pourtant très importante. Ce paradoxe s'explique si l'on admet que la répartition en taille des grains magnétiques est identique dans tous les sols, surtout dans la région où la susceptibilité intervient le plus, i.e. à la frontière entre les grains superparamagnétiques et monodomains.

Mesures de la susceptibilité magnétique dans un milieu homogène, linéaire et isotrope.

1.3 Théorie sur la dépendance fréquentielle de la susceptibilité magnétique des sols (Thèse M. Dabas)

La théorie de Néel est applicable à l'étude des sols dans le cas de particules monodomains (SD) sans interactions. Il a utilisé, pour un ensemble de particules SD dispersées, la statistique de Boltzmann pour déterminer la répartition des moments. Pour la première fois est établie clairement la décroissance de la susceptibilité en phase avec la fréquence (0,1 à 10 kHz) et la constance de la susceptibilité en quadrature. Ces deux résultats sont en accord avec la théorie de Néel dans le cas des monodomains sans interactions (dispersés). L'étude du rapport entre les deux composantes de la susceptibilité magnétique permet de caractériser les sols. Théoriquement, il est possible de relier ce rapport à une seule constante physique (temps minimum de renversement d'un domaine).

Considérons un ensemble élémentaire de grains magnétiques identiques caractérisé par un temps de relaxation τ_0 . L'évolution de l'aimantation volumique J est donnée par (cf. statistique de Boltzmann) :

$$\tau_0 \left(\frac{dJ}{dt} \right) + J = J_S \quad (1.1)$$

J_S est une constante fonction du champ inducteur h . Soit un champ h du type $h = h_0 \sin(\omega t)$. Alors dans le domaine de Rayleigh, J_S est fonction de la valeur crête h_0 et dans tous les cas varie en $e^{j\omega t}$:

$$\tau_0 \left(\frac{dJ}{dt} \right) + J = J_S h_0 \sin(\omega t) \quad (1.2)$$

et

$$J = J_S h_0 \frac{\sin(\omega t)}{1 + \omega^2 \tau_0^2} - \frac{\omega \tau_0 \cos(\omega t)}{1 + \omega^2 \tau_0^2} \quad (1.3)$$

Le premier terme est en phase avec h et le second est en quadrature. On peut donc définir la susceptibilité volumique en phase κ_p comme :

$$\kappa_p = \frac{J_S}{h_0} \left(\frac{1}{1 + \omega^2 \tau_0^2} \right) \quad (1.4)$$

et en quadrature κ_q comme :

$$\kappa_q = \frac{J_S}{h_0} \left(\frac{\omega \tau_0}{1 + \omega^2 \tau_0^2} \right) \quad (1.5)$$

Si X =

1.4 Caractéristiques des appareils de mesure (Thèse E. Marmet)

Les appareils électromagnétiques sont caractérisés par un émetteur et un récepteur. Les deux types d'appareils permettant la mesure de la susceptibilité magnétique sont : le type « Slingram », composé de deux dipôles magnétiques séparés par une distance L , ou, le type « boucle » composé d'1 (« Coincident loop » ou monospire) ou 2 spires concentriques.

Pour les appareils de type Slingram, les paramètres à définir sont la distance entre les bobines, l'orientation de celles-ci et la fréquence de l'appareil. On distingue essentiellement les orientations de type VCP (bobines verticales coplanaires) qui correspond à un dipôle horizontal, les orientations de type HCP (bobines horizontales coplanaires), qui correspond à des dipôles verticaux ou encore l'orientation de type « PARA » [25].

Chapitre 2

Mesures de la susceptibilité magnétique au laboratoire

2.1 Précautions pour le prélèvement des échantillons

Dans le cas de l'étude des sols, deux conditions doivent être remplies :

- un champ faible de l'ordre du champ terrestre.
- un important volume de matière à analyser (au moins 100 cm^3).

Afin de minimiser l'effet des volumes impliqués (différents) par les mesures électromagnétiques de terrain et de laboratoire, il est préférable aussi de :

- prélever le plus grand volume possible.
- analyser plusieurs échantillons pris au même endroit et leurs variations.

2.2 Procédé de mesure de la susceptibilité magnétique

Une des familles d'appareils existant pour la mesure de κ et la plus utilisée est régie par 2 principes physiques :

- un moment M crée dans un bobinage un flux ϕ correspondant. La constante de proportionnalité est fonction du degré de couplage entre l'échantillon et le bobinage. C'est la constante électrodynamique G : $\phi = G.M$
- toute variation de flux dans le temps crée une f.e.m. correspondante suivant la loi de Lenz :

$$e = - \frac{d\phi}{dt} = - G \frac{dM}{dt} \quad (2.1)$$

Description de l'appareil développé au C.R.G. [3] :

Tiré de l'article de C.T. Zahn : « ... Il est nécessaire que le primaire et le secondaire soient de longs solénoïdes si l'on veut que la réponse du secondaire soit indépendante à la fois de la géométrie et de l'homogénéité du spécimen. Cela a été rarement le cas à cause de la taille limitée des bobines. Si l'on veut que les mesures aient une signification précise,

le spécimen test et les échantillons doivent être par conséquent homogènes, de même taille et forme, et être placés exactement dans la même position par rapport aux bobinages... ».

Mais le système développé à Garchy est différent et double : il fonctionne sous un champ proche du champ terrestre, la ddp générée dans le secondaire est indépendante de la position de l'échantillon (dans un certain volume de l'espace) aussi bien par rapport au primaire qu'au secondaire.

Utilisation de 3 tubes concentriques, découplés mécaniquement pour éviter toute déformation dans la géométrie des bobines introduisant une modification des couplages :

- Tube le plus externe supporte le primaire, i.e. un assemblage de spires planes créant le champ inducteur ;
- Deuxième tube formé de 2 parties montées en opposition de façon à ce que lorsque le primaire émet, un courant quasi-nul circule à la sortie du secondaire ;
- Troisième tube, plus interne, supporte l'échantillon introduit horizontalement et positionné à un endroit bien précis.

Avantage : dispositif insensible à une perturbation à champ uniforme (il est donc moins sensible au bruit qu'un solénoïde classique).

Principe régissant la mesure : le moment créé dans l'échantillon par le primaire génère un flux dont le secondaire enregistre la variation dans le temps. Le flux ϕ s'écrit : $\phi = M G_S$ (avec $G_S =$ constante électrodynamique du secondaire). La f.e.m. créée dans le secondaire est : $|e_S| = -\frac{d\phi}{dt} = -G_S \frac{dM}{dt}$ si G_S est parfaitement stable dans le temps. Environnement quasi-isotherme, protégé des perturbations électromagnétiques. Si le primaire émet un champ variant dans le temps comme $e^{j\omega t}$, le moment créé varie comme $e^{j\omega t}$ et on peut alors réécrire $|e_S|$ tel que : $|e_S| = -j\omega M G_S$. Or M peut s'écrire comme $M = \kappa V H$, H étant le champ créé par le primaire à l'emplacement de l'échantillon. Or $B = G_P I_P = G_P I_0 e^{j\omega t}$ et $B = \mu_0 H$ (avec $\mu_0 =$ perméabilité magnétique $= 4\pi 10^{-7}$). On peut donc écrire que $H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{(G_P I_0 e^{j\omega t})}{\mu_0}$ et $M = \frac{(G_P \kappa V I_0 e^{j\omega t})}{\mu_0}$. On a donc : $|e_S| = -\frac{d\phi}{dt} = -G_S \frac{dM}{dt} = CH_2$, soit :

$$|e_S| = -\frac{G_S G_P \kappa V I_0}{\mu_0} \frac{d(e^{j\omega t})}{dt} \quad (2.2)$$

Au final :

$$|e_S| = -\frac{j\omega G_S G_P \kappa V I_0 e^{j\omega t}}{\mu_0} \quad (2.3)$$

et

$$|e_P| = CH_1 \quad (2.4)$$

$$= R_P I_P \quad (2.5)$$

$$= R_P I_0 e^{j\omega t} \quad (2.6)$$

Ce que l'on lit sur le transféromètre correspond donc à :

$$\frac{|e_S|}{|e_P|} = \frac{CH_2}{CH_1} \quad (2.7)$$

$$= - \frac{j\omega G_S G_P \kappa V}{\mu_0 R_P} \quad (2.8)$$

soit au final :

$$\kappa = - \frac{|e_S|}{|e_P|} \frac{\mu_0 R_P}{j\omega G_S G_P V} \quad (2.9)$$

$$\kappa = \underbrace{\left[-j \left(\frac{CH_2}{CH_1} \right)_r \frac{\mu_0 R}{G_S G_P \omega V} \right]}_{\kappa_q} + \underbrace{\left[\left(\frac{CH_2}{CH_1} \right)_i \frac{\mu_0 R}{G_S G_P \omega V} \right]}_{\kappa_p} \quad (2.10)$$

$$\kappa = \kappa_q + \kappa_p \quad (2.11)$$

Cette écriture est due aux possibilités du transféromètre : le facteur $\frac{R}{G_S G_P}$ tient lieu de facteur d'étalonnage de cet appareil. Les valeurs de $G_S G_P$ sont normalement mémorisées dans un fichier permettant le calcul des composantes de la susceptibilité en temps réel lors de l'expérience.

Caractéristiques des bobinages :

Optimisation des bobinages primaire et secondaires afin :

- que le champ créé par le primaire soit uniforme, donc aussi le moment induit dans l'échantillon ;
- qu'il y ait par réciprocité une uniformité de la constante électrodynamique du secondaire.

On veut aussi créer un maximum de champ sur l'objet à partir de la bobine et on veut des variations fréquentielles de la susceptibilité magnétique.

Etalonnage en absolu :

L'appareil fournit une valeur absolue de κ volumique à partir des grandeurs électriques mesurées. Deux méthodes possibles pour vérifier l'étalonnage :

- utilisation de sels paramagnétiques dont on connaît en théorie la susceptibilité ;
- utilisation d'échantillons déjà calibrés par d'autres méthodes.

L'étalonnage absolu est effectué par l'utilisation de courants circulant dans des bobines étalons, la valeur absolue de la susceptibilité peut être restituée à partir de mesures de grandeurs géométriques et électriques simples.

Afin de connaître G_S , on place une bobine étalon de surface S et constituée de n spires que l'on met à la place de l'échantillon. Celle-ci est parcourue par un courant $\frac{e_{bob}}{R}$. On mesure alors la ddp induite dans le secondaire (e_S). Pour nous, $n = 6$ et $S = \pi (1,05 \cdot 10^{-2})^2 = 3,2610^{-4} \text{ m}^2$. R est une résistance étalon de 100Ω . On peut écrire :

$$e_S = - \frac{d\phi}{dt} \quad \text{et} \quad \phi = G_S M = CH_2 \quad (2.12)$$

Or le moment de la bobine étalon est : $M = n S I_{bob} = n S \frac{e_{bob}}{R}$ (en cgs, $\mu_0 = 1$). Si l'on a un courant variant en $e^{j\omega t}$, le moment induit varie aussi en $e^{j\omega t}$ et :

$$e_S = CH_2 = -j\omega G_S G_P n S I_0 e^{j\omega t} \quad (2.13)$$

$$e_{bob} = CH_1 = R_{bob} I_0 e^{j\omega t} \quad (2.14)$$

d'où :

$$G_S = - \left(\frac{e_S}{e_{bob}} \right) \frac{R_{bob}}{j\omega n S} \quad (2.15)$$

Nous avons trouvé expérimentalement : $G_S = 2,101 \cdot 10^{-1} \text{ USI}$.

Protocole de mesure (pour l'acquisition de la partie réelle et imaginaire de κ) :

Déroulement d'un cycle de mesure :

1. Commande de la fréquence et de l'amplitude du générateur.
2. Réglage du 0 du secondaire en bougeant très légèrement le primaire.
3. Introduction de l'échantillon dans la bobine (calage de la position).
4. Début de la mesure (on supprime la première mesure car elle est entachée d'une erreur due à l'effet capacitif introduit par la proximité de l'opérateur. Celui-ci doit se déplacer au moins à 4 m).
5. Sommation sur le nombre de mesures max.
6. Affichage et impression de la partie réelle et imaginaire de la ddp (rapport de la f.e.m. secondaire à celle du primaire).
7. Refaire 4) à 6) le nombre de fois que l'on a décidé de faire des mesures par fréquence.
8. Enlever l'échantillon et effectuer 4) à 7).
9. Calcul de κ_P et κ_Q et estimation d'un écart type (obtenu en mesurant l'écart entre la valeur médiane et la valeur extrême, écart pondéré d'un coefficient).
10. Passage à la fréquence suivante pour un autre échantillon, ou à la même fréquence (si ce n'est pas le dernier échantillon), ou finir (si c'est le dernier échantillon à la dernière fréquence).

Une mesure à vide est obligatoire à chaque fréquence et l'établissement du 0 se fait grâce à une vis micrométrique reliée au bâti du primaire qui peut coulisser pendant que le secondaire reste fixe. Le porte-échantillon, le primaire et le secondaire sont découplés mécaniquement (le poids d'un échantillon de 200 cm^3 étant suffisant pour modifier la géométrie du secondaire de façon à faire apparaître un signal aussi fort que celui de l'échantillon). T°C constante le plus possible.

Caractéristiques principales du Solartron 1253 (notice de l'appareil) :

- Faible prix : idéal pour ATE.
- Simple d'utilisation : idéal pour les stations de test manuel.
- Mesures du gain, de la phase et de la fréquence.
- Intervalle de fréquence : 1 mHz à 20 kHz.
- $1 \mu\text{V}$ de sensibilité, 300 V max.
- Conversion A/D équivalente à 15 bits (90 dB).

Le Solartron 1253 (Schlumberger) sert à la fois de générateur de courant (pilotage de la fréquence, de l'amplitude, ainsi qu'entre autres, polarisation, modulation, forme...) et de récepteur synchrone sur la fréquence d'émission. Des options permettent de sommer ensuite les sorties soit sur un nombre de cycles donnés, soit sur un intervalle de temps (ce que l'on a choisi pour nos premières mesures en manuel). On peut aussi mesurer directement un rapport de 2 canaux de mesure et multiplier par $\frac{1}{j\omega}$ (i.e. intégrer). Pour le 1253 GPA (Gain Phase Analyser), on commence par rentrer l'amplitude du courant (en mV), puis la fréquence (en mH). Ensuite on choisit de se mettre soit en (r, θ) , soit en $(a+ib)$. C'est cette dernière écriture que l'on utilise pour la mesure des deux composantes de κ .

Avantages :

- calculs facilités.
- rapport signal/bruit amélioré.

Paramètres techniques du primaire et du secondaire du PIM* développé à Garchy [3] :

- Primaire : $R_P = 0,87 \pm 0,01 \Omega$; self = $0,1 \pm 0,0001 \text{ mH}$; Fréquence de résonance vers 530 KHz avec les câbles.
Courant de 241, 483 et 965 mA sous forme de créneaux de fréquence voisine de 83 Hz ; constante électrodynamique = $4,35 e^{-5} \text{ T/A}$; 25 galettes de 2 spires espacées de 27 mm sauf les trois du bout à 22, 20 et 5 mm.
- Secondaire : $R_S = 2 \times 1,035 \pm 0,01 \Omega$; self = $2 \times 0,360 \pm 0,001 \text{ mH}$; diamètre commun aux deux bobinages = 148 mm ; (25×2) galettes espacées de 9 mm sauf les 4 du bout à 7, 5, 3 et 2 mm ; constante électrodynamique = $1,31 e^{-4} \text{ T/A}$.

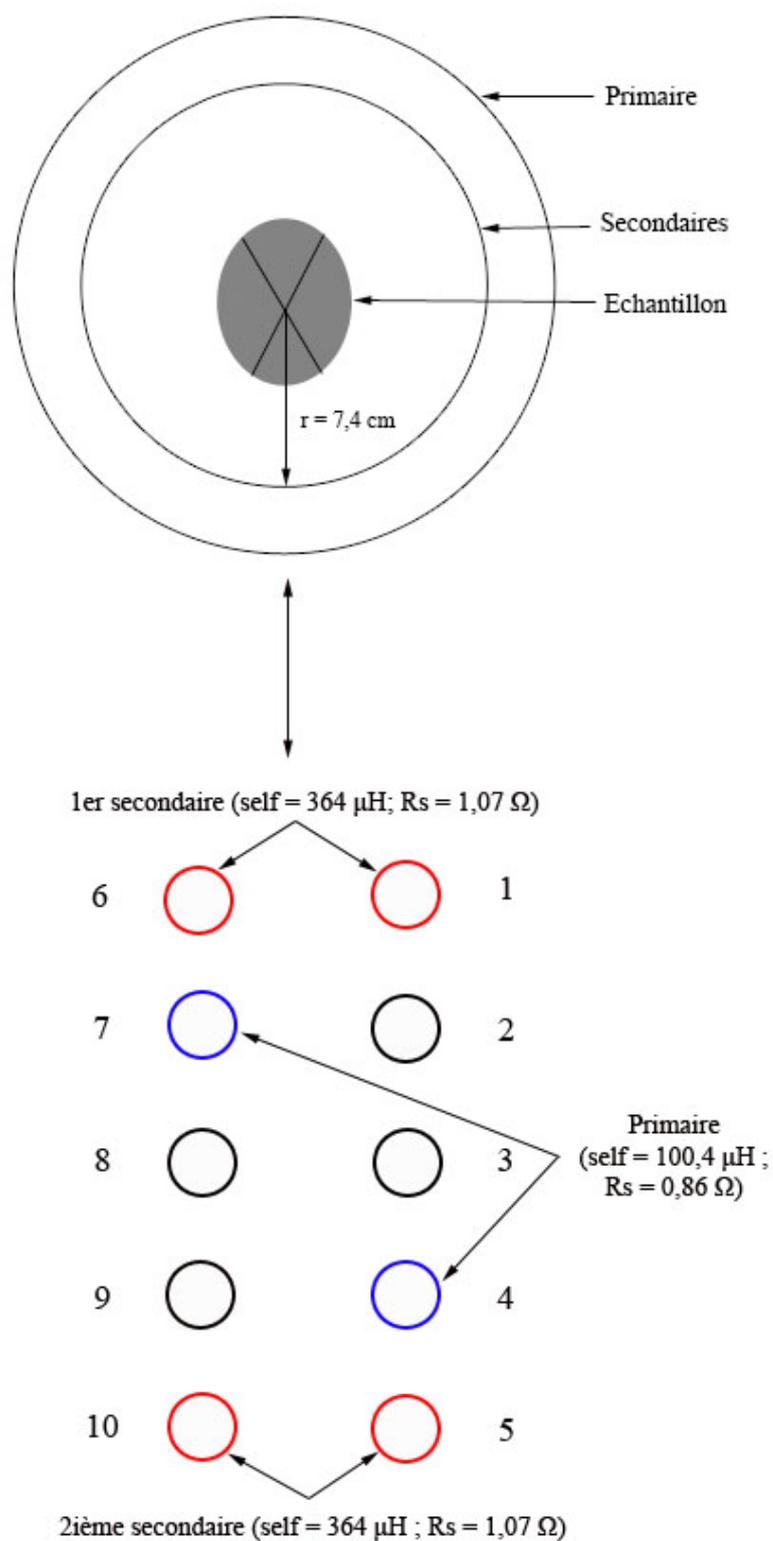


FIG. 2.1 – Schéma simplifié du dispositif des bobines utilisé pour la mesure de la susceptibilité magnétique en laboratoire.

Remarque : la self correspond à l'opposition entre le champ magnétique sur une spire d'une bobine et le courant qui circule en sens inverse. Par exemple, quand on place un aimant dans une bobine traversée par un courant, il est difficile de retirer l'aimant.

(*) *PIM* = Pulse Induction Meter.

Thèse M. Trigui [30] :

On utilise une nouvelle bobine, qui permet de faire varier la disposition du primaire par rapport au secondaire qui lui reste fixe. Cette mobilité de la bobine primaire n'était pas possible dans la bobine précédente, c'est pourquoi nous n'avons pas pu régler le petit décalage qu'il devait y avoir entre les deux bobines et qui a entraîné une dissymétrie dans le champ au sein des bobines, et donc des aberrations dans les mesures.

Les nouvelles bobines développées à Garchy (Nièvre) montrent les caractéristiques suivantes :

- Primaire : $R_P = 0,87 \pm 0,01 \Omega$; self = $0,1 \pm 0,0001$ mH ; Fréquence de résonance vers 530 KHz avec les câbles.
Courant de 241, 483 et 965 mA sous forme de créneaux de fréquence voisine de 83 Hz ; $G_P =$ constante électrodynamique = $2,0358 e^{-3}$ USI ; 25 galettes de 2 spires espacées de 27 mm sauf les trois du bout à 22, 20 et 5 mm.
- Secondaire : $R_S = 2 \times 1,035 \pm 0,01 \Omega$; self = $2 \times 0,360 \pm 0,001$ mH ; diamètre commun aux deux bobinages = 148 mm ; (25 \times 2) galettes espacées de 9 mm sauf les 4 du bout à 7, 5, 3 et 2 mm ; $G_S =$ constante électrodynamique = $2,0551 e^{-1}$ USI.

Spectres de susceptibilité « caractéristiques » :

Ex. de spectre : La susceptibilité en phase (κ_P) décroît légèrement jusqu'à une fréquence $d' \sim 800$ Hz, puis la décroissance s'accélère. C'est l'inverse pour la susceptibilité en quadrature (κ_Q) : croissance lente puis rapide à partir de $d' \sim 800$ Hz. Ce comportement peut être observé sur des scories ou des sols incorporant des particules métalliques.

Dépendance fréquentielle de la susceptibilité :

Dans le cas de grains monodomaines :

- κ_q n'est pas fonction de la fréquence, il reste constant quand f varie.
- κ_p décroît comme $\ln(f)$.
- La dérivée logarithmique de κ_p , par rapport à la fréquence, est constante et vaut $\left(-\frac{2\kappa_q}{\pi}\right)$: la pente de κ_p est donc liée à κ_q .
- Le rapport $\frac{\kappa_q}{\kappa_p}$ est élevé et atteint 3 à 8 % à 1 kHz.

Dans le cas de grains polydomaines :

- κ_p décroît plus vite que $\log(f)$.
- κ_q croît peut-être comme \sqrt{f} .
- $\frac{\kappa_q}{\kappa_p}$ est faible et atteint 1 % à 1 kHz.

Chapitre 3

Mission du 02-03/11/05 : site de Vert St Denis (Melun/Cesson)

3.1 Organisation

- Alain Tabbagh (1^{er} jour)
- Christian David (archéologue ; 06 64 46 68 86)
- Julien Thiesson (doctorant ; Julien.Thiesson@ccr.jussieu.fr)
- Archéologues INRAP

3.2 Site

Site datant de l'âge du Bronze (Final II). Découverte d'une cache contenant des haches recouvertes par des colluvions. 120-130 objets différents ; 12 kg.

Origine : rituelle ?

Alignement des 3piquets passant par la BASE : 20477 (S) ; 12266 (N).

3.3 Objectif de la prospection et travail sur site effectué

Prospection électromagnétique point par point dans les alentours de l'ancienne cache découverte. Utilisation du CS60 et du SH3 (le CS150 n'est pas encore fini) afin de mesurer d'une part la susceptibilité magnétique apparente (réponse en phase), et d'autre part la conductivité électrique apparente (réponse en quadrature). Dans les deux cas nous avons utilisé une maille de 1 m. Pour ces deux journées, Christian s'est occupé de mettre en place la topographie.

- Premier jour (02/11/05) :

Temps pluvieux et venté, assez froid. Prospection d'un carré de 33 × 50 m avec

le SH3 (zone rouge 1a sur le schéma). Le principe est de déplacer le SH3 tous les mètres le long d'un décamètre (ici profil de 50 m) en le déplaçant le long du sol et de noter la phase et la quadrature. On fait toujours des mesures de base en début et en fin de prospection. Pendant la prospection, on fait des retours à la base régulièrement. Pour l'utilisation du SH3, on finit les mesures de base en faisant une mesure en bas et une mesure en haut (valeurs ???).

Opérateurs :

- Toute la matinée jusqu'au repas : alternance moi et Alain pour le déplacement de l'appareil ou la notation des données. Julien a encodé les valeurs dans le Huski.
- Après-midi : jusqu'à 16h30, alternance Julien et Alain pour le déplacement de l'appareil ou la notation des données, et moi à l'encodage des données dans le Huski. A partir de 16h30 c'est moi qui ai déplacé le SH3 (jusqu'au profil 33 m), Alain qui notait les données et Julien qui encodait. L'après-midi on a rajouté un multimètre car la lisibilité de la phase sur la batterie couplée au SH3 n'était plus vraiment possible.

• Deuxième jour (03/11/05) :

Beau temps, un peu nuageux mais sans pluie et température relativement stable et douce toute la journée. Prospection à l'aide du CS60 que l'on tracte sur un chariot muni de 3 roues (2 à l'arrière, 1 à l'avant). On fait un certain nombre d'aller-retour le long de profils espacés les uns des autres de 1 m sur lesquels des mesures sont faites régulièrement (la traction du CS60 doit se faire le plus possible à vitesse constante, soit environ 1 min pour faire un profil de 50 m ce qui correspond à une mesure tous les 10-20 cm). On envoie un signal en continu et on couple au CS60 un ordinateur Huski qui enregistre automatiquement les valeurs de phase et de quadrature mesurées. La batterie est aussi prise en compte, elle ne doit pas descendre sous 14,5 mV.

Avant les mesures, nous avons testé la réaction du CS60 à deux boules métalliques :

- Grosse boule : signal à 500 mV.
- Petite boule : signal à 300 mV.

La réaction du CS60 se traduit par des sauts dans ???.

Les zones étudiées par cette méthode sont les suivantes (Figure 3.1) :

- Zone 1b (bleue) : rectangle de 42×50 m (fin du carré de 50×50 m, soit un rectangle de 17×50 m, et prospection dans la continuité de cette zone par un rectangle de 25×50 m); profils « horizontaux » (tractage du CS60, moi et surveillance des données, Julien);
- Zone 2 (verte) : rectangle de 25×50 m; profils « horizontaux » (tractage, Julien et données, moi);

- Zone 3 (rose) : rectangle de 25 × 50 m, mais profils « verticaux » (après manger, tractage, moi et données, Julien);
- Zone 4 (orange) : rectangle de 25 × 50 m; profils « verticaux » (Julien au tractage et moi pour les données);
- Zone 5 (noire) : rectangle de 25 × 50 m; profils « verticaux » (Julien au tractage et moi pour les données jusqu'au profil 12; à partir de là Christian m'a remplacé pour les données car je devais faire des prélèvements pour les mesures de susceptibilité en laboratoire).

Schéma du terrain prospecté :

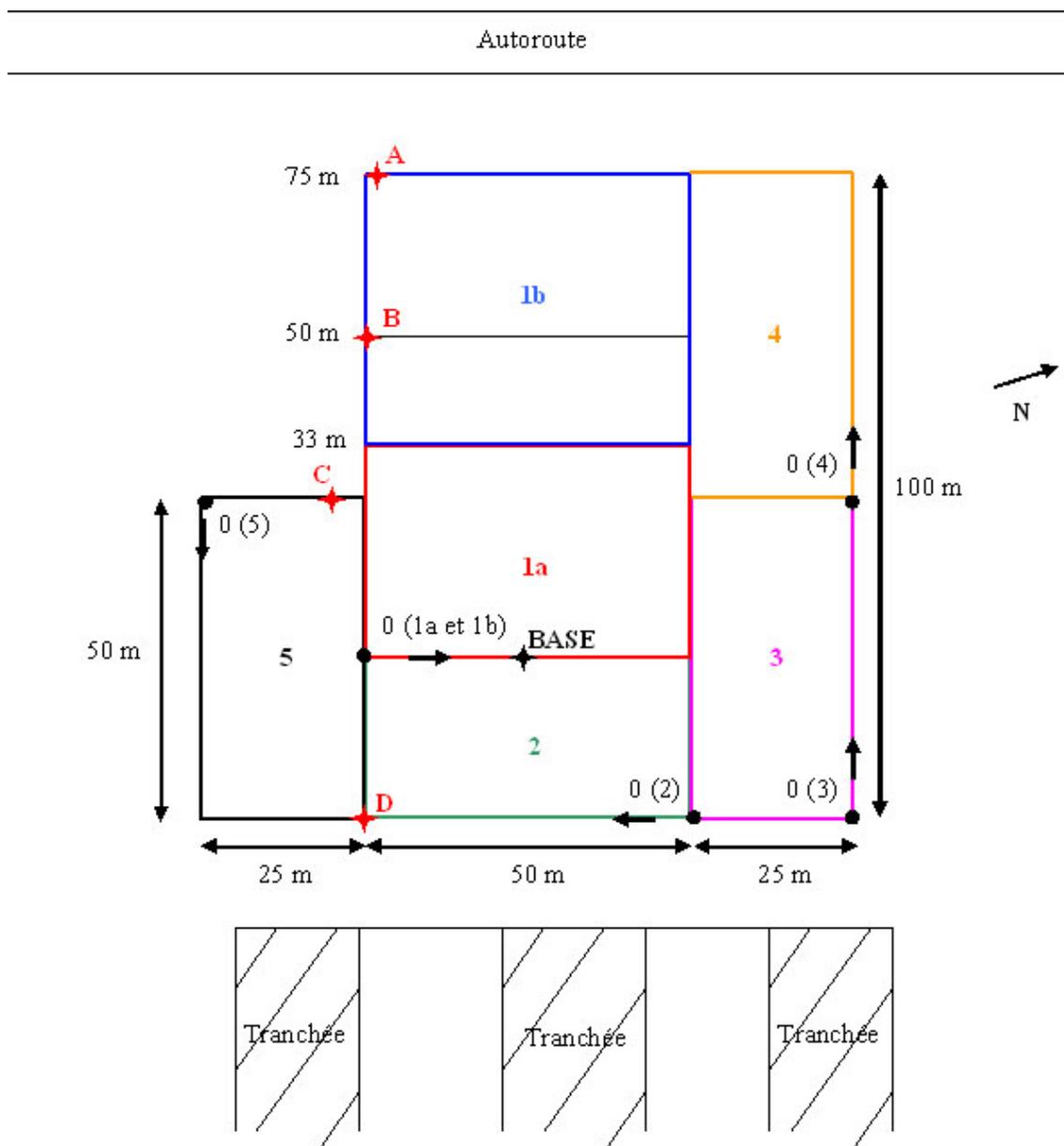


FIG. 3.1 – Schéma du terrain prospecté.

Retours à la base encore une fois réguliers, et observation de peu de changements des valeurs de phase et de quadrature enregistrées (cf tableau ci-dessous) :

Numéro surface	Profil	Phase	Quadrature
1er jour SH3	Début 1a	0,06	-0,14
2ième jour CS60	Début 1b	88	526
1b	Après profil 40 m	74	522
1b	Après profil 50 m	81	522
1b	Après profil 60 m	77	519
1b	Après profil 75 m (Fin 1b)	75	519
2	Début 2	115	520
2	Après profil 12 m	70	527
2	Après profil 19 m	57	530
2	Après profil 25 m (Fin 2)	48	533
3	Début 3	89	523
3	Après profil 5 m	51	526
3	Après profil 10 m	49	529
3	Après profil 18 m	31	530
3	Après profil 25 m (Fin 3)	33	531
4	Après profil 9 m	42	524
4	Après profil 17 m	35	528
4	Après profil 25 m (Fin 4)	36	523
5	Début 5	39	523
5	Après profil 13 m	45	521
5	Après profil 25 m	46	521

Remarque : les valeurs de quadrature sont relativement constantes (entre 520 et 530) au cours de la journée, ce qui est moins le cas pour les valeurs de phase (entre 30 et 110).

Points de carottages pour l'étude de la susceptibilité magnétique en laboratoire
(fin de journée, tombée de la nuit, vers 18h) :

- Point A (à 1 m à droite du piquet le plus en haut à gauche du profil 75 m) : 3 carottages de 25 cm au total, soit 8 cm environ ;
- Point B (sur le piquet de référence en haut à gauche du carré de 50 × 50 m) : 1 carottage à environ 10 cm ;
- Point C (à 19 m vers la droite du point 0 (5)) : 1 carottage sur 10 cm de profondeur environ ;
- Point D (à 25 m vers le bas du point 0 (1a et 1b) et à 50 m vers la gauche du point 0 (2)) : 1 carottage sur 10 cm de profondeur environ ;
- BASE (au milieu (25 m) du profil 0 m) : 1 carottage sur 10 cm de profondeur environ.

Remarques :

- Les carottages ont été réalisés sur de la terre de préférence non remobilisée (sauf le point C) ;
- Présence d’une ligne haute tension au-dessus du terrain étudié ;
- Présence d’antennes pour les bateaux entre autre qui envoient donc des signaux de très fortes fréquences (18,2 - 18,6 kHz) susceptibles de perturber nos mesures ;
- Présence de tranchées de quelques centimètres de profondeur (entre 25 et 50 cm environ) creusées par les archéologues (Figure 3.1) ;
- Fer à cheval détecté au milieu du profil 45 m (rectangle 1b).

3.4 Traitement des données

De retour au laboratoire, les données, encodées dans le Huski pour le SH3 ou directement acquises par ce dernier pour le CS60, sont traitées à l’aide du logiciel Wumap établi par Jeanne Tabbagh (cf le site : <http://www.ccr.jussieu.fr/dga/people/Jeanne%20Tabbagh/pages/wumap.htm>). On obtient d’abord une carte brute, une pour la phase, l’autre pour la quadrature et une dernière pour un autre paramètre, ici la température. Mais il existe des valeurs erronées ou aberrantes qu’il faut éliminer. On fait donc des traitements. On remarque généralement des stries le long des profils. Cela peut être dû à la dérive de l’appareil ou encore au fait que les profils soient parallèles aux traces de labours. Cela est souvent aussi dû au fait que le terrain n’est pas tout à fait plat. En descendant, le capteur magnétique est plus éloigné du sol, alors qu’en montant il est plus proche. Cette différence peut s’atténuer en augmentant tous les profils pairs d’une valeur qui sera calculée. On applique ce que l’on appelle un traitement par délignage. On peut aussi remarquer par endroit des « festons ». Ces défauts sont encore dus au mauvais positionnement des profils aller par rapport aux profils retour (manque de régularité dans l’avancement du prospecteur ?) et aux prospections en boustrophédons. Pour corriger ce défaut, on déplace un profil sur deux d’une certaine distance qui est calculée par corrélation (cross-corrélation entre un profil et la somme des deux profils voisins). Pour plus de précision, il faut d’abord ré-échantillonner le long des profils (par exemple de 10 cm). On parle dans ce cas de traitement après correction de feston.

Il est aussi possible de faire d’autres traitements :

- filtrage par la médiane (utilisé en dernier) : il s’agit de remplacer la valeur aberrante par la médiane si celle-ci est trop différente de la médiane. Filtre $n*n$ (n étant le nombre de valeurs entourant la valeur aberrante) ;
- élimination de la régionale ;
- ajustement de zones : quand prospection sur plusieurs jours avec des conditions différentes ou encore quand il y a changement d’appareil ;
- augmentation de contraste (Wallis) ;
- filtrage directif (anti-labour, dans le domaine spectral) : pour la prospection électrique dans le sens des labours par exemple ;
- filtre manuel : on choisit soi-même dans le domaine spectral la zone à éliminer.

On finit par une interpolation des profils.

3.5 Résultats et interprétation

Les cartes obtenues pour la température montrent une dérive bien nette. Celle obtenue pour la phase montre des valeurs assez dispersées, les anomalies semblent parallèles aux profils et les zones ne « collent » pas très bien. Par contre, il semble que les résultats soient plus parlants en quadrature. En effet, il semblerait qu'il y ait une certaine continuité entre les zones adjacentes et que l'on puisse peut-être détecter des anomalies en diagonale (zones 1b et 4), donc non parallèles aux profils. Mais pour les deux cartes précédentes, la zone 2 ne « colle » particulièrement pas avec les zones adjacentes. En effet, elle est caractérisée par un fort signal en diagonal et deux signaux circulaires de faible intensité de part et d'autre de cette diagonale.

Pour conclure, les cartes obtenues ne montrent apparemment aucune cache existante sur le terrain prospecté.

Annexe A

Résumés d'articles

Relations entre activité humaine et propriétés magnétiques des sols : Le cas du site médiéval de Roissy-en-France

E. Marmet, M. Bina, N. Fedoroff et A. Tabbagh

Résumé :

La prospection magnétique des sites archéologiques dépend fortement de la susceptibilité, χ_m , du niveau supérieur des sols et de leur contenu en minéraux ferrimagnétiques. Les minéraux qui interviennent peuvent être authigéniques, biogéniques ou anthropogéniques (par brûlage). Afin de caractériser et d'identifier différents minéraux magnétiques dans différents sols archéologiques, nous avons réalisé des mesures thermomagnétiques et d'hystérésis sur plusieurs échantillons. Des analyses pédologiques et micromorphologiques permettent de déterminer la relation entre des activités pédologiques et humaines (ferruginisation et objets anthropologiques) et leurs paramètres magnétiques.

La maghémite a été identifiée par des courbes thermomagnétiques comme étant le minéral ferrimagnétique dominant dans ces sédiments archéologiques. Le lien entre la ferruginisation et la haute susceptibilité est complexe. Cependant, une corrélation entre le rapport de la susceptibilité et de l'aimantation à saturation, χ_m/J_S , et l'abondance des objets anthropogéniques a été observée. En association avec la susceptibilité magnétique et le champ coercitif rémanent, nous pouvons fournir une estimation de l'altération humaine des sédiments. Les courbes thermomagnétiques et une comparaison entre un sédiment naturel chauffé et les sédiments altérés de façon anthropogénique peuvent fournir une estimation de la température du four.

Mots clefs : susceptibilité magnétique ; cycle d'hystérésis ; courbe thermomagnétique ; activité humaine ; température de chauffe.

Apparition de bactéries magnétiques dans le sol

J. W. E. Fassbinder, H. Stanjek et H. Vali

Résumé :

L'enrichissement des minéraux magnétiques magnétite et maghémite est fréquemment observé dans le niveau supérieur des horizons du sol. Bien qu'à la fois des processus inorganique et organique sont connus pour produire de la magnétite, la magnétite présente dans les sols a été décrite comme ayant une origine inorganique. Nous décrivons ici la découverte de bactéries magnétiques vivantes, semblables à celles trouvées dans sédiments d'eau salée et d'eau douce, dans l'horizon A d'un profil de sol bien développé dans un environnement typiquement ??? dans le sud de la Bavière. Les bactéries ont été détectées dans des échantillons frais en utilisant un microscope optique équipé d'un champ magnétique rotationnel et d'une dépression volumétriquement calibrée, permettant ??? le comptage de la densité volumique des organismes. Nous suggérons que les bactéries magnétiques et leurs magnétofossiles peuvent contribuer aux propriétés magnétiques des sols.

Les Diagrammes de Preisach et le Phénomène de Viscosité Magnétique pour les Sols et les Assemblées Synthétiques de Grains d'Oxyde de Fer

C. E. Mullins et M. S. Tite

Résumé :

Les diagrammes de Preisach pour les sols issus de strati ??? géologique sédimentaire et pour des échantillons synthétiques contenant des grains de magnétite dispersés sont présentés et sont utilisés comme base pour distinguer entre des grains superparamagnétique, monodomaine stable et polydomaine. En particulier il est établi qu'entre 10 et 20% des constituants magnétiques totaux dans un sol typique sont des grains monodomaines stables bien dispersés avec des diamètres d'environ 250 Å, la majorité des grains restants étant des grains superparamagnétiques avec des diamètres légèrement plus petits. La théorie de Preisach-Néel pour des grains monodomaines interagissant est étendue afin que le phénomène visqueux magnétique associé puisse être représenté sur le diagramme de Preisach en terme de champ visqueux fluctuant et les résultats expérimentaux justifiant l'introduction de ce concept sont inclus. Cette présentation fournit une indication claire de ces surfaces du diagramme de Preisach, et montre les composantes de l'ensemble de la distribution des grains magnétiques dans l'échantillon, qui sont associées à un processus visqueux particulier. Il est ainsi montré que la valeur des coefficients pour l'affaiblissement du magnétisme rémanent visqueux peut être utilisé pour comparer les distributions de la taille des grains magnétiques dans différents échantillons.

Viscosité Magnétique, Susceptibilité Quadratique, et Dépendance Fréquentielle de la Susceptibilité dans des Assemblées Monodomaines de Magnétite et Maghémite

C. E. Mullins et M. S. Tite

Résumé :

Néel a établi une expression concernant l'affaiblissement de l'aimantation rémanente visqueuse et la variation de la susceptibilité avec la fréquence dans des assemblées monodomaines d'oxydes ferrimagnétiques qui n'interagissent pas, comme la magnétite. Cette théorie est étendue pour obtenir une relation pour la susceptibilité quadratique dans un tel échantillon. Les mesures de ces trois paramètres pour des échantillons de sol et des échantillons préparés artificiellement qui contiennent des grains de magnétite monodomaine ou de maghémite sont décrits ; les résultats obtenus sont en bon accord avec la théorie.

Mössbauer et études de la susceptibilité magnétique d'oxydes de fer dans des sols provenant de sites archéologiques

G. Longworth et M. S. Tite

Introduction :

La localisation d'endroits brûlés sur des sites archéologiques en utilisant des techniques de prospection magnétique dépend du fait que la susceptibilité magnétique du sol (i.e. sol de surface, remplissages de trous et de fossés) qui dérive des roches sédimentaires est normalement significativement plus grande que celle de la roche parentale. Le Borgne [7, 8] a suggéré que cette élévation de la susceptibilité du sol était due à la transformation in situ d'oxydes de fer depuis une forme antiferromagnétique comme l'hématite (αFe_2O_3) ou la goethite ($\alpha FeOOH$) à une forme ferrimagnétique, la maghémite (γFe_2O_3). Il a aussi proposé deux mécanismes possibles mettant en jeu un processus de réduction suivi d'une ré-oxydation en maghémite. Dans le premier cas (mécanisme de fermentation), la réduction apparaît comme le résultat de la diminution de la matière organique dans le sol sous des conditions anaérobiques pendant des périodes humides, et la ré-oxydation en maghémite apparaît dans des conditions aérobiques surtout pendant les périodes suivantes sèches. Dans le second cas (mécanisme de chauffage), la partie brûlée du matériel organique produit une augmentation de la température et la réduction de l'atmosphère nécessaire pour la transformation de l'hématite en magnétite (Fe_3O_4) dans une mince couche du sol sous le feu et la ré-oxydation apparaît pendant le refroidissement des feux quand l'air entre dans le système.

Tite et Mullins [27]1972) ont montré que la susceptibilité magnétique observée (χ_0) des sols pourrait être interprétée en terme de :

- (1) le pourcentage de l'oxyde de fer dans le sol qui a été transformé in situ en forme ferrimagnétique ;
- (2) la concentration d'oxyde de fer dans le sol qui est susceptible de se transformer en forme ferrimagnétique.

Sur la base du mécanisme de chauffage, ils ont suggéré que la transformation en pourcentage (C) acquis in situ est donné par le rapport de la susceptibilité observée (χ_0) et de la susceptibilité (χ_N) après avoir chauffé le sol dans un four du laboratoire à 550°C dans une atmosphère de nitrogène suivi par de l'air. Bien que la maghémite pure se transforme en hématite à des températures inférieures à 350°C, la maghémite « dopée », par exemple, par du sodium, de l'aluminium ou du magnésium est stable à des températures beaucoup plus élevées (Stacey et Banerje, 1974). Depuis que les oxydes de fer dans les sols sont des formes divisées et en intime relation avec les minéraux argileux, il a été adopté que le chauffage du laboratoire transforme les oxydes de fer en une maghémite stable et impure et que la susceptibilité après chauffe (χ_N) fournit donc une mesure de la concentration d'oxyde de fer nécessaire à la transformation en forme ferrimagnétique.

Afin d'établir la validité des mécanismes de Le Borgne sur lesquels l'interprétation précédente est basée, il est nécessaire d'identifier les oxydes de fer présents à des concentrations typiques de 2-5 wt.% dans les différents types de sol. Le Borgne (1955) en utilisant une analyse thermique différentielle, a montré que le sol de haute susceptibilité montre un pic exothermique à 700°C qui pourrait être associé à la maghémite. Cependant, la diffraction par RX qui devrait en principe fournir plus de données définitives sur les oxydes de fer est seulement limitée en valeurs à cause de la très petite taille des grains (100-300 Å), et la pauvre nature cristalline des oxydes de fer dans les sols. En particulier, dans ces circonstances, il n'est pas possible de distinguer, avec n'importe quel degré de confiance, entre des deux oxydes ferrimagnétiques, la magnétite et la maghémite.

Du fait de ces difficultés, il a été décidé d'utiliser la spectroscopie Mössbauer ^{57}Fe afin d'identifier les oxydes de fer responsables du magnétisme des sols. Cette technique peut être utilisée même quand les composés de fer sont finement divisés depuis que l'identification est basée sur la mesure des propriétés électroniques locales aux sites atomiques. Les rayons gamma hautement monochromatiques de faible énergie (14 keV) venant d'une source ^{57}Fe sont utilisés pour mesurer les changements d'énergie petits et hyperfins dans la résonance de l'amortisseur (échantillon du sol), due à l'interaction entre les noyaux amortisseurs et leur environnement électronique. Il y a trois principales interactions : le changement isomère, l'interaction quadripôle et l'interaction hyperfine magnétique. Le changement isomère peut être utilisé pour déterminer le degré d'oxydation du fer. L'interaction quadripôle est différente de zéro quand la symétrie cristalline n'est pas cubique et partage la résonance dans un doublet. L'interaction magnétique partage la résonance en 6 composantes, dans des matériaux magnétiquement ordonnés, sauf quand les particules sont suffisamment petites pour être superparamagnétiques à la température de mesure, quand aucun partage magnétique n'est observé.

Dans le tableau 1 sont montrées les valeurs pour le champ hyperfin magnétique et l'interaction quadripôle à la température ambiante et à 4,2 K, pour ces volumes d'oxydes de fer qui sont magnétiquement ordonnés à température ambiante. Les valeurs du changement isomère montrent beaucoup moins de dispersion et ne peuvent pas être utilisées seules pour l'identification. Les valeurs pour les deux autres interactions diffèrent significativement, surtout pour la maghémite et la magnétite qui ont la même structure spinelle, avec du fer présent sur deux sites, les sites tétraédriques (A) et les sites octaédriques (B).

Cependant, bien que les volumes d'échantillons de maghémite ($Fe_{2,67}O_4$) et de magnétite (Fe_3O_4) puissent être facilement distingués, les échantillons du sol peuvent contenir une forme non stoechiométrique $Fe_{3-x}O_4$ où $0 < x < 0,33$ dont le spectre est plus difficile à caractériser. Les oxydes présents dans le sol sont fréquemment finement divisés et les valeurs de champ hyperfin peuvent être réduites depuis leurs valeurs dans le matériel grossier ??? par une quantité dépendant de la taille des particules. Dans le cas de l'hématite, le signe de l'interaction quadrupôle ne change pas le signe dans le matériel finement divisé, comme il le fait pour le matériel grossier. De plus, la présence d'atomes impurs dans les structures d'oxyde, ce qui susceptible d'arriver dans les échantillons de sol, peut donc faire varier les paramètres hyperfins suffisamment pour qu'ils ne puissent pas être plus longtemps utilisés pour distinguer les différents oxydes de façon certaine. Ces difficultés sont considérablement réduites si un champ magnétique externe ($\sim > 1$ Tesla) est appliqué à l'échantillon du sol pendant la mesure Mössbauer, quand il y aura en général un changement à la fois dans le partage total (sextuplet) et dans les intensités relatives des composantes. De tels changements sont davantage pour les oxydes ferrimagnétiques (haute susceptibilité) que pour les oxydes antiferromagnétiques (faible susceptibilité), afin que l'identification devienne plus simple.

Augmentation de la susceptibilité magnétique des sols sur des sites archéologiques

M. S. Tite et C. E. Mullins

Introduction :

Les trous et les fossés brûlés peuvent être localisés sur des sites archéologiques en utilisant des techniques de prospection magnétique (Aitken, 1961) parce que la susceptibilité magnétique de leur remplissage est plus grande que celle du sous-sol dans lequel ils sont creusés. De la même façon, des routes peuvent être localisées parce que la susceptibilité du matériel du sous-sol (i.e. gravier, fragments de roches) avec lequel elles sont construites est plus faible que celle du sol de surface autour. Bien que la susceptibilité du sol soit normalement plus grande que celle du sous-sol, l'extension de l'augmentation varie largement. Par exemple, les sous-sols ont typiquement des susceptibilités magnétiques comprises entre 2×10^{-6} et 20×10^{-6} emu/gm alors que pour les sols (i.e. sol de surface, remplissages de trou et de fossés), elles sont comprises entre 5×10^{-6} et 1000×10^{-6} emu/gm.

Cette large variation dans l'augmentation a de sérieuses complications pour l'application des techniques de prospection magnétique. Si la différence dans la susceptibilité entre un remplissage de trou, par exemple, et le sous-sol est trop petite, l'anomalie de la force du champ magnétique associé ne peut pas être détectée (1). Par conséquent, dans ces circonstances, l'absence apparente d'anomalies magnétiques serait positivement trompeuse pour un archéologue. Il est par conséquent précieux, quand on interprète les données, de

comprendre les facteurs qui déterminent l'extension de l'augmentation de la susceptibilité du sol sur n'importe quel site.

La susceptibilité élevée des sols naturels comparée aux sous-sols desquels ils dérivent a été étudiée par Le Borgne (1955, 1960). Il a établi que cette susceptibilité élevée était due à la transformation d'oxydes de fer dans le sol depuis la forme la moins ferrimagnétique, l'hématite (αFe_2O_3) à une forme fortement ferrimagnétique, la maghémite (γFe_2O_3). A l'aide d'expériences contrôlées dans le champ et le laboratoire, il a montré que cette transformation pouvait être définie par deux processus différents, qui impliquent toutes les deux la réduction de l'hématite en un oxyde ferrimagnétique fort, la magnétite (Fe_3O_4), suivi de la ré-oxydation en maghémite. Dans le premier cas, référencé postérieurement en tant que mécanisme de chauffage, le feu du matériel organique produit une augmentation de la température et la réduction de l'atmosphère nécessaire pour la transformation de l'hématite en magnétite pendant la ré-oxydation apparaît pendant le refroidissement des feux quand l'air entre dans le système. Dans le deuxième cas, référencé postérieurement comme étant le mécanisme de fermentation, la diminution de la matière organique en conditions anaérobiques montré pendant des périodes humides entraîne la réduction de l'hématite. La ré-oxydation apparaît en conditions aérobiques montrée lors de périodes postérieures sèches, l'alternance rapide et équitable des périodes humides et sèches étant nécessaire. Le Borgne suggéra plus tard que le mécanisme de chauffage, montré possiblement à travers l'usage des feux pour nettoyer le sol à des fins agricoles a été plus important dans la production de l'augmentation observée pour les sols naturels.

Des mécanismes semblables pour l'augmentation de la susceptibilité magnétique sur des sites archéologiques ont été anticipés ; les feux et les débris organiques ont été associés à l'habitation humaine fournissant des conditions appropriées pour la transformation de l'oxyde de fer en une forme fortement ferrimagnétique. Le but de la recherche présentée dans ce papier était de définir les facteurs déterminant l'efficacité du mécanisme de chauffage pour l'augmentation, pour établir si ce mécanisme était responsable de l'augmentation observée sur les sites archéologiques et pour expliquer, dans le contenu du mécanisme de chauffage, le large rang de valeurs de la susceptibilité du sol rencontrées sur des sites archéologiques.

(1) L'anomalie de la force du champ magnétique détectable la plus faible est normalement 2 gamma (2×10^{-5} oersted). Par conséquent afin de localiser un trou typiquement cylindrique (diamètre 1 m, profondeur 1 m), sur un site où le toit du trou est 0,5 m sous la surface (hauteur du détecteur au-dessus de la surface 0,3 m), la différence dans la susceptibilité entre le remplissage du trou et le sous-sol doit être plus grande que 60×10 emu/gm.

La persistance d'oxydes magnétiques produits par le feu dans les sols et les sédiments lacustres

T. A. Rummery, J. Bloemendal, J. Dearing, F. Oldfield et R. Thompson

Résumé :

Des mesures de la susceptibilité magnétique (χ) et de l'aimantation rémanente isotherme à saturation ont été effectuées sur des sols soumis récemment aux effets de feux de forêts importants, et sur des sédiments lacustres qui contiennent des matériaux provenant de l'érosion des sols brûlés. Les résultats confirment que les minéraux ferrimagnétiques secondaires formés par chauffage peuvent persister à la fois dans les sols et les sédiments qui en dérivent. Ceci est en accord avec les prédictions de Le Borgne dès ses premières études sur le magnétisme des sols.

La démonstration de la persistance des oxydes magnétiques induits par le feu dans les sédiments a des implications pour l'étude des sources de sédiments, l'histoire de l'utilisation des terrains et le taux d'érosion, pour la corrélation des carottes et pour l'interprétation de l'aimantation rémanente naturelle (ARN).

Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite

E. Le Borgne

Résumé :

Par des combustions provoquées sur des sols en place, on montre que les effets du feu sur les propriétés magnétiques du sol, limités en profondeur, peuvent être très intenses au voisinage de la surface.

En chauffant des sols variés au laboratoire, on a recherché des conditions favorables à la formation de constituants magnétiques. Aux températures utilisées, comprises entre 300 et 700°C, les produits les plus magnétiques sont obtenus par un chauffage en atmosphère réductrice, suivi d'un refroidissement en atmosphère oxydante, ce qui correspond assez bien aux conditions de la cuisson des sols par le feu.

On propose d'expliquer les effets du feu sur la susceptibilité magnétique du sol par une série de transformations du type $Fe_2O_3\alpha \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow Fe_2O_3\gamma$ stabilisé.

Des échantillons de schiste et de granite ont été chauffés dans les mêmes conditions que les sols. Le comportement du schiste se rapproche de celui des sols ; lorsqu'il n'est pas altéré, le granite a un comportement nettement différent.

Etude expérimentale du traînage magnétique dans le cas d'un ensemble de grains magnétiques très fins dispersés dans une substance non magnétique

E. Le Borgne

Résumé :

Certains sols présentent une susceptibilité magnétique relativement élevée parce qu'ils contiennent, à l'état très divisé, un produit de néo-formation du type $Fe_2O_3\gamma$ stabilisé.

Sur un de ces sols, on étudie à la température ordinaire, le traînage de l'aimantation induite et celui de l'aimantation rémanente, par la méthode magnétométrique.

Pour des champs magnétisants faibles et sous certaines conditions de temps qui sont précisées, le traînage de l'aimantation induite est égal, en valeur absolue, à celui de l'aimantation rémanente, si l'on considère des intervalles de temps égaux et correspondants. Cette égalité est prévue par la théorie de Néel relative au traînage pour les ensembles de grains magnétiques monodomains dispersés dans une substance non magnétique.

En faisant varier l'intensité du champ magnétisant, son temps d'action, la température de l'échantillon placé sous le champ, on obtient un ensemble de résultats qui sont en accord avec la théorie. Utilisant les relations établies par Néel, on évalue l'ordre de grandeur des dimensions des grains magnétiques à partir des données expérimentales.

On soumet à des expériences analogues des sols que l'on a préalablement chauffés de manière à provoquer la formation d'un produit de type Fe_3O_4 ou du type $Fe_2O_3\gamma$, suivant les conditions de la cuisson. Dans les deux cas, les grains magnétiques se comportent comme des grains monodomains ; à volume égal, les grains semblent se distinguer, d'un type à l'autre, par la valeur du champ critique.

Une méthode pour la détermination du moment magnétique total d'échantillons de sol dans un champ constant

I. Scollar et I. Graham

Résumé : Non

Propriétés magnétiques des sols

M. S. Tite et C. E. Mullins

Résumé : Non

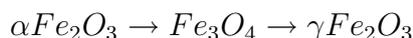
La Relation entre la Susceptibilité Magnétique et l'Histoire des Sols

E. Le Borgne

Résumé :

La susceptibilité magnétique du niveau supérieur du sol est généralement plus grande que celle de la roche parentale sous-jacente.

L'étude de fractions de sols différents, obtenues par une analyse de taille, montre que c'est la fraction argileuse qui possède la susceptibilité maximale. Cette haute susceptibilité peut être expliquée par une formation *in situ* d'un produit γFe_2O_3 stabilisé par l'intermédiaire d'un phénomène d'oxydation-réduction du type :



Il est possible que la phase réductrice résulte de processus d'affaiblissement végétatif à des températures ordinaires ou de la décomposition à hautes températures (l'effet du feu).

Puisque le composant magnétique formé par ces changements est préservé, les mesures de la susceptibilité magnétique de sols actuels ou fossiles peuvent apporter des informations sur l'histoire du sol.

Les Effets Magnétiques et les Propriétés des Sols de Surface Typiques

J. C. Cook et S. L. Carts Jr.

Résumé :

Des données basiques de certaines caractéristiques magnétiques des 25 premiers cm du sol ont été collectés sur 250 sites distribués aux USA et au Panama. Ces sites ont été choisis afin d'être représentatifs appartenant au principal groupe de sols que l'on trouve dans le monde. Quand cela a été possible, les sites ont été choisis là où le sol était dans son milieu naturel, pas touché par l'homme. Des microprofils de 10 m de long d'une composante semi-verticale du champ magnétique terrestre ont été enregistrés très près de la surface, avec une résolution de 5 cm latéralement et 1 gamma (10^{-5} oersted) pour le champ. Des échantillons de sol et les cailloux présents ??? ont été analysés séparément pour la susceptibilité, la composition, la texture, la couleur et l'aimantation rémanente. Les susceptibilités du sol varient de moins de 10^{-6} gauss/oersted pour les sables les plus colorés et les mieux triés, à environ 10^{-3} gauss/oersted pour certains silts noirs, sables, ou terreaux issus des roches ignées. La majorité des sols de forêts, de plaines et de déserts ont montré des susceptibilités entre 10^{-6} et 3×10^{-5} gauss/oersted, presque entièrement dues aux grains de magnétite avec une faible contribution de tâches d'origine limonitique ou maghémitique. Les irrégularités naturelles (« échantillons bruités ») dans le champ magnétique terrestre au-dessus du sol ont varié en amplitude plus ou moins selon

la susceptibilité du sol, de moins de 1 gamma à environ 1000 gammas. Les échantillons bruités, fixés dans le temps et dans l'espace, ont consisté surtout en bosses lisses larges de 15 à 60 cm. Les échantillons ont été corrélés jusqu'à un certain degré avec la microtopographie et avec des roches aimantées individuelles comme des cailloux basaltiques que l'on retrouve dans les sols grossiers glaciaux ou montagneux.

Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites

M. L. Néel

Résumé :

On rappelle dans l'introduction les remarquables propriétés magnétiques des briques, des poteries et des laves dans les champs faibles, de l'ordre de grandeur du champ terrestre, mises en relief par les expériences de E. Thellier : notamment l'additivité des aimantations thermorémanentes partielles, ainsi que la très grande stabilité, vis-à-vis des agents de désaimantation, de l'aimantation thermorémanente comparée à celle de l'aimantation rémanente isotherme. On propose d'attribuer ces propriétés à la subdivision des constituants ferromagnétiques en grains indépendants, suffisamment fins pour constituer chacun un domaine élémentaire unique.

Dans la première partie, on expose sommairement les propriétés magnétiques d'un grain fin isolé, selon la théorie classique, puis on envisage la possibilité et les conséquences de passages spontanés du moment magnétique d'une direction de facile aimantation à l'autre sous l'influence des fluctuations thermiques et dans des champs magnétiques bien inférieurs au champ critique.

Dans la deuxième partie, on étudie le mécanisme de ces passages et on montre qu'ils sont dus à des couples perturbateurs d'origine magnéto-élastique ou purement magnétique produits par les déformations thermiques élastiques des grains. On calcule ainsi, en fonction du volume du grain, de la température et du champ magnétique, le temps de relaxation, c'est-à-dire le temps au bout duquel s'établit l'équilibre thermodynamique. On applique ces calculs aux grains fins de fer.

On examine ensuite dans la troisième partie les propriétés magnétiques d'un ensemble de grains indépendants de volumes et de champs critiques différents, avec des temps de relaxation répartis sur une large échelle de temps. On étudie notamment l'acquisition de l'aimantation rémanente isotherme, de l'aimantation thermorémanente, ainsi que leur disparition sous l'influence du temps, de la température et du champ magnétique. On met en évidence l'existence d'un traînage magnétique proportionnel au logarithme du temps et de pertes dans les champs alternatifs selon un terme de Jordan. On interprète qualitativement tous les résultats de Thellier, notamment les différences de stabilité des aimantations rémanentes, la saturation de la thermorémanence, les lois d'additivité etc.

Enfin on vérifie expérimentalement une relation théorique entre la diminution de l'aimantation rémanente sous l'influence du temps et sous l'influence d'un recuit et on donne l'ordre de grandeur du volume et du champ critique des grains qui jouent un rôle dans les phénomènes évoqués ci-dessus.

Etude par prospection électromagnétique de trois sites à dépôts de l'Age du Bronze

A. Tabbagh et G. Verron

Introduction :

Ce travail a été effectué en collaboration par la Direction régionale des Antiquités Préhistoriques de Normandie et l'équipe de prospection archéologique du Centre de Recherches Géophysiques de Garchy (CNRS) dans le cadre de la R.C.P. 509 « Méthode de reconnaissance et d'analyse sur l'espace archéologique ».

La majeure partie des objets métalliques de l'Age du Bronze que nous possédons provient de « dépôts » ou « cachettes » constitués par un groupe d'objets métalliques, généralement en bronze, enfouis dans le sol et rassemblés dans un espace restreint, avec ou sans contenant identifiable.

Du point de vue archéologique, ces dépôts posent des problèmes complexes quant à leur nombre, à leur localisation et à leur contenu, d'une part, quant à leur contexte et leur raison d'être, d'autre part. Le fait que l'on n'ait exploré en place qu'un nombre infime de dépôts, les autres étant découverts fortuitement, explique que l'on ne dispose pas encore de réponse sur ces différentes questions.

Au *XIX^{ième}* siècle et au début du *XX^{ième}* siècle, il était normal d'attendre du seul hasard qu'apparaissent des données susceptibles d'apporter des éléments de solution. Aujourd'hui, des méthodes géophysiques permettent de déceler à partir de la surface les structures que le sol peut contenir en profondeur, aussi bien que la présence d'objets métalliques et particulièrement d'instruments en bronze. C'est assez dire que l'on est en mesure de reprendre la recherche dans ce domaine sur des bases bien meilleures que par le passé.

Afin de pouvoir mieux interpréter ces énigmatiques dépôts de l'Age du Bronze, nous avons entrepris une expérience sur plusieurs sites différents ayant déjà fourni des dépôts de l'Age du Bronze ou des éléments de dépôts. L'étude a comporté, dans tous les cas, une prospection systématique destinée à répondre à quelques questions simples : quelle est la localisation précise du dépôt, existe-t-il d'autres dépôts à proximité, des structures d'habitat, un atelier métallurgique ou une nécropole ? Elle a été menée avec la méthode électromagnétique qui permettait à la fois de détecter les amas ou objets métalliques isolés et de suivre les variations de la susceptibilité magnétique comme de résistivité électrique du proche sous-sol, capables de caractériser la présence éventuelle des structures

archéologiques. Cette prospection a mis en évidence des points sensibles qui ont fait l'objet d'une fouille intégrale, avec exploration en place des dépôts identifiés ou enlèvement en bloc de la zone concernée et fouille en laboratoire du dépôt.

Cette étude a été fortement « encouragée » aussi par l'augmentation des activités des chasseurs de trésors ces dernières années ; il était impératif que plusieurs sites soient étudiés dans leur totalité avant que toute la documentation archéologique encore en place ne soit détruite.

Sur les trois sites étudiés, deux relèvent chronologiquement du Bronze moyen (La-Chapelle-du-Bois-des-Faulx, Eure et Norville, Seine-Maritime), le troisième du Bronze final III (Marchésieux, Manche). Ils sont donc séparés par un demi-millénaire et peuvent avoir une signification tout à fait différente, mais ils ont été traités avec les mêmes méthodes. La publication des dépôts eux-mêmes sera effectuée ultérieurement.

Les propriétés magnétiques du sol. Application à la prospection des sites archéologiques

E. Le Borgne

Résumé :

La mise au point des magnétomètres à protons, appareils d'une très grande sensibilité et d'un emploi commode, a permis l'utilisation systématique de la prospection magnétique dans l'exploration des sites archéologiques.

Cette méthode de prospection repose sur l'existence d'anomalies dans la répartition du champ magnétique terrestre, anomalies provoquées ici par un contraste entre l'aimantation des matériaux enfouis et celle du milieu environnant.

On fait généralement appel dans la prospection archéologique, à deux types d'aimantation : l'aimantation thermorémanente des terres cuites qui permet de détecter, par exemple, des fours de potiers et l'aimantation induite du sol, sous l'influence du champ terrestre, qui permet de détecter, par exemple, les fosses comblées par de la terre végétale. Dans cette note on s'intéressera particulièrement à l'aimantation induite du sol.

Après avoir rappelé les propriétés magnétiques des minéraux et des roches, j'indiquerai les résultats de mes recherches sur le comportement du sol du point de vue magnétique, ainsi que sur la nature et la genèse d'un constituant magnétique spécifique de la couche superficielle. A partir de ces résultats, il est possible de prévoir quelles sont les conditions les plus favorables à l'emploi de la prospection magnétique dans les recherches archéologiques.

Annexe B

Étude de la susceptibilité magnétique de roches issues d'un forage à Epenèdre (Charente)

B.1 Introduction

Le stage de trois semaines a été effectué au laboratoire Sisyphe de l'Université Pierre et Marie Curie, sous la codirection de Marie Pétronille, de Cécilia Bobée et du Professeur Alain Tabbagh.

Le but de ce travail consistait à étudier des échantillons de roches (cuttings), et plus particulièrement leur susceptibilité magnétique. Ceux-ci ont été prélevés dans un forage au nord-ouest du bourg de Chassenon (Charente), au lieu-dit Epenèdre.

La particularité de ces roches est qu'elles proviennent d'un terrain ayant subi l'impact d'une météorite il y a environ 204 millions d'années causant la formation d'un cratère : l'astroblème de Rochechouart. Aujourd'hui, on trouve comme témoins géologiques de cet événement de nombreux lambeaux d'« impactites ». Le terme « impactite » caractérise une roche exceptionnelle de type bréchique due à l'impact d'une grande météorite développant un métamorphisme de choc.

De plus, sous l'effet de l'énergie thermique considérable dégagée, la météorite s'est sublimée, puis la vapeur s'est condensée dans l'atmosphère en fines particules métalliques de fer, nickel et chrome, qui sont retombées dans le fond du cratère.

Sur le terrain, il est possible de distinguer plusieurs types de brèches. Une brèche désigne une roche formée d'éléments grossiers anguleux cimentés dans une matrice à grains fins. Il existe des brèches d'origine sédimentaire, volcanique, tectonique, hydrothermale, ou d'impact. Notre étude porte sur des brèches d'impact polygéniques, c'est-à-dire formées de roches de nature différente : de type Rochechouart et de type Chassenon. Les brèches de type Rochechouart sont des brèches de retombées dont le ciment clastique est formé de fins débris et de poussières de roches. Elles sont de loin les plus abondantes. Les brèches de type Chassenon quant à elles se distinguent des brèches précédentes par des éléments globalement plus petits et surtout par la présence de fragments vitreux provenant de la zone d'impact.

Lors du forage réalisé, les échantillons ont été prélevés tous les 50 cm jusqu'à une pro-

fondeur de 69 m. Une particularité des brèches de Chassenon est qu'elles contiennent des particules vitreuses très riches en oxydes de fer qui présentent une susceptibilité magnétique plus grande que celles de Rochechouart (environ 3 fois plus d'après des mesures faites par Eric Marmet [14]). L'objectif du stage a donc d'abord été d'effectuer des mesures de susceptibilité magnétique à différentes profondeurs et de tenter de trouver une corrélation entre les variations lithologiques et ce paramètre géophysique. Par ailleurs, cette étude a permis de comparer les mesures faites à partir d'un appareil multifréquentiel (Solartron) avec une diaggraphie de susceptibilité magnétique qui a été réalisée sur ce même forage (société SEMM logging).

B.2 Contexte géologique

La région de Rochechouart-Chassenon, d'une superficie de près de 200 km^2 , est située à cheval entre les départements de la Haute-Vienne et de la Charente, au nord-ouest du Massif Central. Elle est limitée par les vallées de la Vienne au nord, de la Gorre à l'est, de la Tardoire au sud, de la Charente à l'ouest, et est traversée par la Graine du sud-est au nord-ouest (Figure B.1).

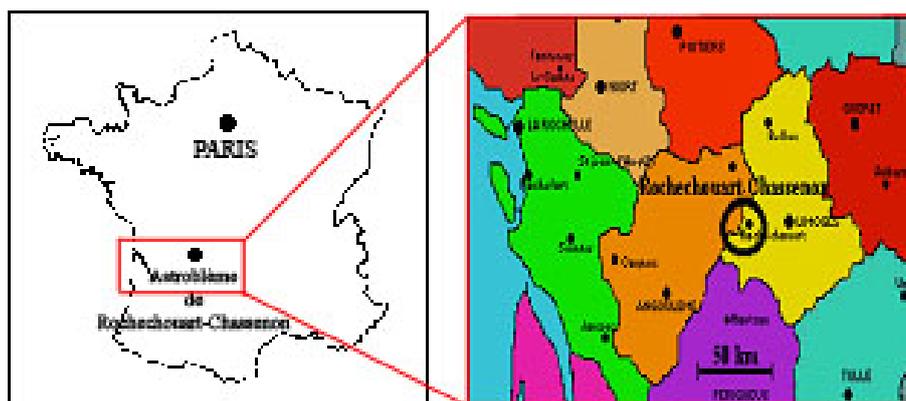


FIG. B.1 – Localisation géographique du site de Rochechouart-Chassenon.

Elle repose sur le socle cristallin du Massif Central constitué de roches métamorphiques et de diverses roches plutoniques. Ces roches se sont formées entre 450 à 280 millions d'années, acquérant leur aspect actuel lors de l'orogénèse hercynienne.

Parmi les roches métamorphiques largement prédominantes, on trouve des gneiss, des amphibolites, des serpentinites et quelques îlots de micaschistes. Les roches plutoniques sont dispersées au sein des roches métamorphiques. Il s'agit principalement de granites, de granodiorites et de tonalites (Figure B.2).

Sur ce socle, on trouve des brèches d'un type particulier, des impactites, caractéristiques de l'astrolème de Rochechouart. Les brèches que nous avons étudiées sont principalement de deux types (Figure B.2) :

- à matrice clastique, sans verre (de type Rochechouart).
- à matrice clastique, avec verres épars (de type Chassenon).

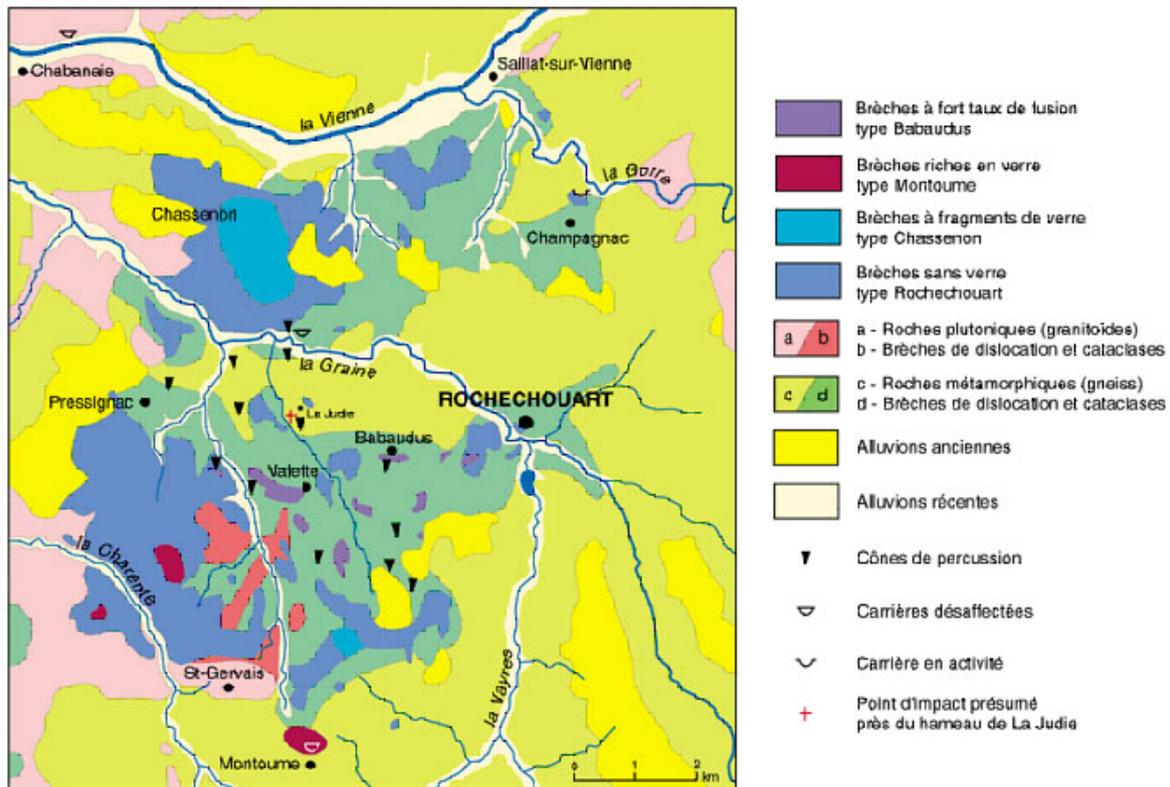


FIG. B.2 – Carte géologique simplifiée de la région de Rochechouart [14].

L'interprétation géologique des cuttings obtenus suite au forage (Figure B.3) semble traduire la présence dominante de brèches de types Rochechouart en surface ainsi qu'au-tour de 50 m de profondeur. A l'inverse, les brèches de type Chassenon, caractérisées par des inclusions vertes, semblent dominantes entre 30-40 m de profondeur, ainsi qu'entre 60-69 m. De 53 à 57 m de profondeur environ, on trouve une roche « oxydée » brun-rouge qui pourrait correspondre au toit du socle gneissique. La présence de brèches en dessous signe une discordance.

B.3 Mesures en laboratoire

Certains matériaux, en présence d'un champ magnétique, H , acquièrent une aimantation induite, J . Le facteur de proportionnalité entre cette aimantation et le champ qui l'a induite est appelé susceptibilité magnétique. Cette dernière correspond donc à la capacité d'aimantation d'une roche sous l'action d'un champ magnétique artificiel. Les appareils de prospection mesurent toujours l'aimantation par unité de volume, κ , mais pour les échantillons prélevés et maniés en laboratoire comme c'est le cas ici, on préfère utiliser la susceptibilité par unité de masse, χ . L'aimantation d'une substance par unité de masse s'appelle l'aimantation spécifique, σ , et s'exprime en $Am^2.kg^{-1}$. Sachant que ρ est la masse volumique et σ la susceptibilité massique exprimée en $m^3.kg^{-1}$, on peut donc écrire [14] que :

$$J = \sigma \rho$$

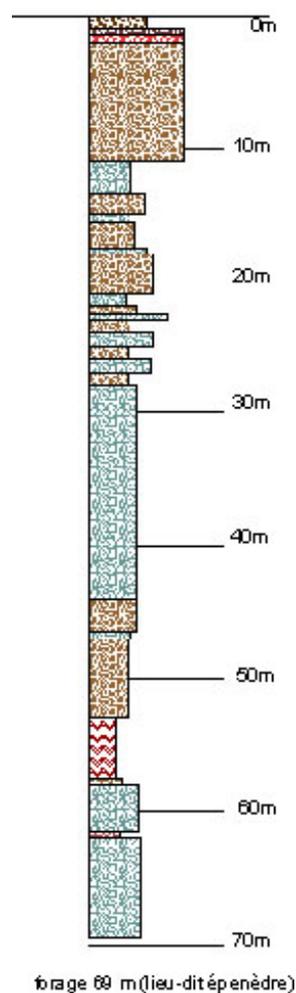


FIG. B.3 – Log lithologique du forage de 69 m au lieu-dit Epenèdre (Charente). La mesure de l'état d'avancement du forage en fonction de la profondeur a permis de dresser un log de dureté. En marron = brèches de type Rochecouart ; en bleu = brèches de type Chassenon.

$$\chi H = \sigma$$

$$H \kappa = \sigma \rho = \chi H \rho$$

C'est la susceptibilité χ qui va nous intéresser pour nos calculs puisque lorsque l'on fait des prélèvements, le volume de l'échantillon varie avec la compression. Ce paramètre dépend de la nature, de la teneur et des caractéristiques des grains (taille, nombre de domaines) des minéraux magnétiques dans l'échantillon.

χ a deux composantes que l'on va mesurer :

- χ_p (composante en phase) ;
- χ_q (composante en quadrature).

Les mesures de susceptibilité magnétique ont été réalisées à l'aide du transféromètre Solartron 1253 développé par Schlumberger. Ce dernier sert à la fois de générateur de courant (pilotage de la fréquence, de l'amplitude, ainsi qu'entre autres, polarisation, modulation, forme...) et de récepteur synchrone sur la fréquence d'émission. Associé au Solartron, nous avons réalisé un circuit électronique (Figure B.4) mettant en jeu une résistance R de 100 Ω et un système de double bobine, l'une primaire, l'autre secondaire dans laquelle se situe un support pour l'échantillon [3].

Le principe des mesures est le suivant : le générateur du transféromètre génère un courant continu ou bien alternatif si l'on désire faire des mesures en faisant varier la fréquence, la gamme pouvant aller de 1 mHz à 20 kHz pour le Solartron. Dans le cas de notre étude, il n'a finalement pas été utile de la faire varier car le système de bobines utilisées ne nous a pas permis de dépasser les 200 Hz (au risque de tomber dans les fréquences de résonance des bobines et donc d'avoir des résultats erronés). Nous avons donc travaillé à une fréquence fixée à 173 Hz, à savoir la même fréquence que celle de la sonde utilisée lors de la diagraphie. La résistance quant à elle permet de contrôler l'intensité du courant traversant la bobine primaire. Celle-ci est traversée par un courant de 5 V qui crée un champ magnétique inducteur sur l'échantillon de sol placé à l'intérieur de la bobine secondaire, environ au 1/4. L'échantillon acquiert alors une certaine aimantation qui est réceptionnée par la bobine secondaire. Cette bobine est constituée de six solénoïdes, les trois premiers dans un sens et les trois suivants dans le sens opposé, annulant ainsi tout champ perturbateur extérieur et ne récupérant que la réponse de l'échantillon introduit à l'intérieur de la bobine secondaire.

Physiquement parlant, la mesure de la susceptibilité magnétique s'explique de la façon suivante [30] : le moment créé dans l'échantillon par la bobine primaire génère un flux dont la bobine secondaire enregistre la variation dans le temps. Soit ϕ le flux d'induction magnétique, M le moment magnétique, et G_S la constante électrodynamique du circuit secondaire, on a alors :

$$\phi = M G_S \tag{B.1}$$

Si G_S est parfaitement stable dans le temps, la force électromotrice créée dans le secondaire est :

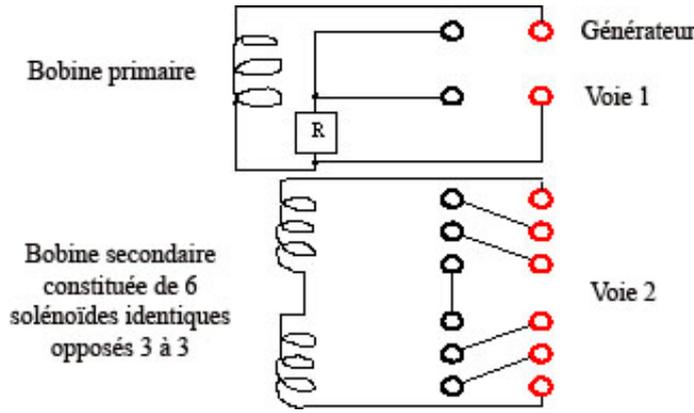


FIG. B.4 – Schéma simplifié du circuit électronique utilisé pour la mesure de la susceptibilité magnétique d'échantillons de sol. Les cercles rouges correspondent aux voies d'entrée du courant ; les noirs correspondent quant à eux aux voies de sortie du courant.

$$e_S = - \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{B.2})$$

$$= -G_S \frac{dM}{dt} \quad (\text{B.3})$$

Si le primaire émet un champ variant dans le temps comme $e^{j\omega t}$ (avec $\omega = \text{pulsation} = 2\pi F$), le moment créé varie aussi comme $e^{j\omega t}$ et on peut écrire : $M = M_o e^{j\omega t}$. On a donc :

$$e_S = -j\omega G_S M \quad (\text{B.4})$$

Or le moment M résulte du champ magnétique induit H sur un échantillon donné et s'écrit $M = \kappa H V$, κ étant la susceptibilité magnétique volumique de l'échantillon et V son volume, d'où :

$$e_S = -j\omega G_S \kappa H V \quad (\text{B.5})$$

Soit I_p le courant circulant dans le circuit primaire P de constante électrodynamique G_p , le champ H sera donc égal à : $H = \frac{G_p I_p}{\mu_o}$, où $\mu_o = 4\pi 10^{-7}$ est la perméabilité magnétique et $I_p = I_o e^{j\omega t}$. La formule générale de la f.e.m du secondaire est donc :

$$e_S = - \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{B.6})$$

$$= -G_S \frac{dM}{dt} \quad (\text{B.7})$$

$$= CH_2 \quad (\text{B.8})$$

$$= - \frac{G_S G_P \kappa V I_o}{\mu_o} \frac{d(e^{j\omega t})}{dt} \quad (\text{B.9})$$

$$= - \frac{j\omega G_S G_P \kappa V I_o e^{j\omega t}}{\mu_o} \quad (\text{B.10})$$

et pour le primaire :

$$e_P = CH_1 \quad (\text{B.11})$$

$$= RI_P \quad (\text{B.12})$$

$$= RI_0 e^{j\omega t} \quad (\text{B.13})$$

Or ce que l'on lit sur le transféromètre correspond au rapport de la *f.e.m* de la voie 2 sur la voie 1, soit :

$$\frac{e_S}{e_P} = \frac{CH_2}{CH_1} \quad (\text{B.14})$$

$$= -\frac{j\omega G_S G_P \kappa V}{\mu_0 R} \quad (\text{B.15})$$

soit au final :

$$\kappa = -\left(\frac{e_S}{e_P}\right) \frac{\mu_0 R}{j\omega G_S G_P V} \quad (\text{B.16})$$

$$\kappa = \underbrace{\left[-j \left(\frac{CH_2}{CH_1}\right)_r \frac{\mu_0 R}{G_S G_P \omega V}\right]}_{\kappa_q} + \underbrace{\left[\left(\frac{CH_2}{CH_1}\right)_i \frac{\mu_0 R}{G_S G_P \omega V}\right]}_{\kappa_p} \quad (\text{B.17})$$

$$\kappa = \kappa_q + \kappa_p \quad (\text{B.18})$$

$\left(\frac{CH_2}{CH_1}\right)_r$ et $\left(\frac{CH_2}{CH_1}\right)_i$ sont les rapports des f.e.m de la voie 2 sur la voie 1 mesurés directement par le transféromètre, respectivement pour la partie réelle, puis la partie imaginaire.

Ces calculs nous permettent de retrouver les susceptibilités magnétiques en phase et en quadrature « volumiques » des échantillons. Pour avoir les susceptibilités massiques, il suffit de remplacer V le volume que l'on ne peut pas déterminer en laboratoire par M la masse des échantillons à sec et de multiplier par la masse volumique supposée des échantillons (sachant que la densité d'un sol en moyenne est comprise entre 1,5 et 2). Avant les mesures de susceptibilité, il nous a donc fallu procéder à un étuvage des échantillons pour avoir les masses de sol sec (43 échantillons au total placés chacun dans une petite coupelle et chauffés dans une étuve à 100°C pendant une nuit). Le lendemain nous avons pesé les échantillons de sol sec.

B.4 Résultats et interprétations

Les mesures qu'affichait le transféromètre étaient assez instables, il a donc fallu effectuer plusieurs mesures à vide, les résultats finaux étant des résultats moyennés.

A l'aide du logiciel Excel, et à partir des résultats obtenus, nous avons pu tracer les courbes représentant les susceptibilités magnétiques en phase et en quadrature en fonction de la profondeur (Figure B.5 A). On remarque que la courbe des χ_q varie peu

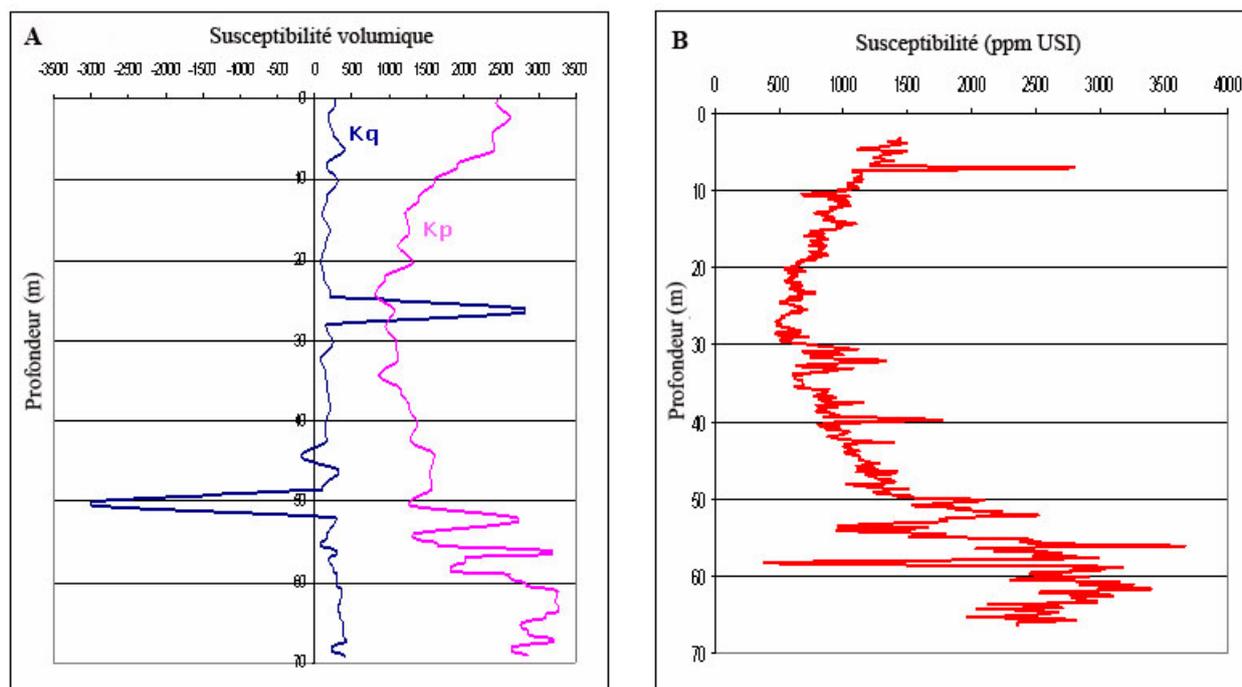


FIG. B.5 – Courbes des variations de la susceptibilité magnétique en fonction de la profondeur.

et que celle des χ_p suit sensiblement les variations de la courbe obtenue (Figure B.5 B) lors de premières mesures de susceptibilité à l'aide d'une sonde à une fréquence de 173 Hz (courbe de référence, fiable).

On rappelle aussi que sur le log géologique (Figure B.3), on trouvait des brèches de Chassenon, qui présentent une forte susceptibilité magnétique, en profondeur et pas du tout en surface, résultats qu'on retrouve également sur les courbes. Cependant, les faibles susceptibilités obtenues de 28 à 45 m de profondeur ne coïncident pas avec la diagraphie qui présente des brèches de type Chassenon à ces niveaux. La comparaison entre la diagraphie et les courbes présente d'autres divergences. Celles-ci peuvent être occasionnées par la « pollution » des cuttings lors des prélèvements.

B.5 Conclusion

Notre étude portait sur un forage de 69 m de profondeur dans le lieu-dit d'Epenède, et nous renseigne donc bien sur la nature des roches présentes à l'endroit du forage et dans la zone adjacente. En effet, les résultats que nous avons obtenus au laboratoire sont en accord avec les courbes de susceptibilité (mesures diagraphiques). Par contre, la comparaison avec le log stratigraphique semble poser problème. Il est possible que des pollutions des cuttings engendre ces divergences.

Il serait peut-être intéressant d'étendre l'étude sur une surface plus grande de terrain. Pour cela, on pourrait forer à différents endroits. De plus, pour obtenir plus de précisions dans la diagraphie, on pourrait prélever les échantillons non plus tous les 50 cm, mais à des intervalles plus petits encore.

Il aurait aussi été intéressant à partir de ces mesures de réaliser un profil de densité apparente du sol sondé en fonction de la profondeur, en prenant comme base de référence en susceptibilité les valeurs obtenues lors de la diagraphie. Si le sol avait été saturé en eau, il aurait aussi été intéressant de trouver le profil de porosité apparente en fonction de la profondeur. Mais ceci n'aurait pas pu être réalisé ici puisque le sol n'était pas saturé à l'endroit du forage.

Finalement, ce stage m'a permis de comprendre qu'un scientifique doit savoir faire preuve de patience devant les divers problèmes qu'il rencontre lors de ses travaux, et qu'il doit savoir agir avec les moyens qu'il a à sa disposition.

Annexe C

Magnétomètre à césium G858

C.1 Mode opératoire

Le magnétomètre G 858 est composé de 1 ou 2 capteurs chimiques à césium. On fait nos mesures soit avec 1 seul capteur (mesure du champ total exprimé en nT) ou avec 2 capteurs dirigés tous deux vers le bas (mesure du champ entre les deux capteurs ; elle dépend donc de la distance entre les 2 capteurs et s'exprime en nT/m). Nos mesures (notamment en France du fait de l'angle d'inclinaison du vecteur champ magnétique qui est de 64°) se feront à la verticale de la surface à étudier.

Il est important :

- De prendre soin des capteurs qui contiennent du verre et qui coûtent cher, donc pas de chocs ;
- De les orienter tous deux dans le même sens ;
- De mesurer la distance qui les sépare ;
- De brancher le fil du capteur en bas le plus en bas du moniteur . . .
- Les sangles accrochées à la perche ne doivent pas être tendues ;
- Ne jamais oublier de brancher l'appareil après chaque fin de journée sinon le sel attaque dans le désert . . .
- Accrocher les câbles qui pendent avec du scotch, ainsi que là où ils sont branchés.

Début des mesures :

- D'abord vérifier l'état de la batterie et l'état des 2 capteurs (on doit se trouver au moins à 25% pour commencer les mesures). Cette dernière valeur signifie que les 2 capteurs sont suffisamment chauds ($T^\circ\text{C} > 24^\circ\text{C} = T^\circ\text{C}$ de fusion du césium) pour que le césium devienne liquide et que la précession des électrons puisse avoir lieu ;
- Choisir un fichier pour rentrer nos données ;
- Rentrer les coordonnées du point de base, puis la longueur du profil (si c'est plat, 100 m c'est bien), si c'est aller-retour (« bidimensionnal ») ou pas . . .
- Puis lancer la manip : « mark » pour lancer les mesures et « end line » pour finir. Si pb pdt la mesure, on revient à la page précédente et on change tout en bas de la page la position en X et Y ainsi que « up » ou « down » que l'on veut refaire ;
- Toujours vérifier si le point sur lequel on finit est le bon.

Transfert des données sur PC :

- Il faut pour cela que les batteries restent branchées au moniteur ;
- Aller dans « data transfert », puis dans MagMap 2000...
- Effacer les mesures du moniteur (« erase data ») ;
- Exporter les données (en .stn) dans surfer (en .dat). On peut alors lire les valeurs dans un tableau (pas nécessaire de conserver la date, l'heure,...) et on peut tracer des graphs...

Annexe D

Cartographie de la viscosité magnétique des sols (poster Julien Thiesson)

D.1 La viscosité magnétique

Certains matériaux, en présence d'un champ magnétique, acquièrent une aimantation induite. Le facteur de proportionnalité entre cette aimantation et le champ qui l'a induite est appelé susceptibilité magnétique. Parfois, l'acquisition ou la perte de cette aimantation induite est retardée. On parle alors de viscosité magnétique.

D.2 Possibilités de mesure

On utilise des méthodes électromagnétiques fréquentielles. L'appareil est de type Slingram. Il se compose de deux bobines, une émettrice et une réceptrice. Le signal émis est de type sinusoïdal. La géométrie de l'appareil est telle que la mesure en phase correspond à un signal proportionnel à la susceptibilité magnétique. La mesure en quadrature de phase est proportionnelle à la conductivité électrique en première approximation.

La viscosité magnétique induisant un retard, elle se traduit aussi par une composante en quadrature dans le signal. Le problème est alors de différencier la partie résultant de la conductivité du sol de celle correspondant à la viscosité.

Il apparaît que la composante en quadrature du signal induite par la viscosité magnétique est indépendante de la fréquence contrairement à celle due à la conductivité électrique. Un appareil fonctionnant donc à deux fréquences a été développé, le CS150.

D.3 Modélisation

Pour appréhender le traitement des futures données, un programme simulant une manipulation du CS150 a été implémenté.

Le modèle suivant est un exemple de ce qui peut être utilisé pour voir si la détection d'une anomalie visqueuse est possible.

D.4 Applications et développements

La susceptibilité est utilisée dans un contexte archéologique comme un marqueur de l'anthropisation d'un sol. La mesure de la viscosité magnétique qui semble liée à la taille des grains (un grain de grande taille a plus de mal à s'orienter qu'un petit), donc à la cinétique de formation de ces grains, pourrait permettre de différencier les zones d'activités sur un site.

Bibliographie

- [1] Benech, C. and E. Marmet, *Optimum Depth of Investigation and Conductivity Response Rejection of the Different Electromagnetic Devices Measuring Apparent Magnetic Susceptibility*, *Archaeological Prospection*, Vol. 6, 31-45, 1999.
- [2] Cook, J. C. and S. L. Carts Jr., *Magnetic Effects and Properties of Typical Topsoils*, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 67, No. 2, 815-828, 1962.
- [3] Dabas, M., *Comportement magnétique des sols dans les domaines fréquentiel et temporel (ARV). Application à la prospection de sites archéologiques*, Thèse de doctorat de l'université de Paris 6, Paris, 1989.
- [4] Fassbinder, J. W. E., H. Stanjek and H. Vali, *Occurrence of magnetic bacteria in soil*, *Nature*, Vol. 343, No. 6254, 161-163, 1990.
- [5] Hesse, A., *Prospections géophysiques à faible profondeur. Application à l'archéologie*, Thèse d'état du Centre de Recherche Géophysiques de Garchy, 1966.
- [6] Le Borgne, E., *Sur la susceptibilité magnétique du sol*, Thèse d'état, Paris, 1955a.
- [7] Le Borgne, E., *Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel*, *Annales de Géophysique*, Vol. 11, 399-419, 1955b.
- [8] Le Borgne, E., *Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite*, *Annales de Géophysique*, Vol. 16, No. 2, 159-195, 1960a.
- [9] Le Borgne, E., *Etude expérimentale du traînage magnétique dans le cas d'un ensemble de grains magnétiques très fins dispersés dans une substance non magnétique*, *Annales de Géophysique*, Vol. 16, No. 4, 445-494, 1960b.
- [10] Le Borgne, E., *The Relationship between the Magnetic Susceptibility and the History of Soils*, in *Problems in Palaeoclimatology*, Interscience Publishers, 666-673, 1963.

- [11] Le Borgne, E., *Les propriétés magnétiques du sol. Application à la prospection des sites archéologiques*, *Archaeo-Physika*, 1-20, 1965.
- [12] Longworth, G. and M. S. Tite, *Mössbauer and magnetic susceptibility studies of iron oxides in soils from archaeological sites*, *Archaeometry*, Vol. 19, 3-14, 1977.
- [13] Marmet, E., M. Bina, N. Federoff and A. Tabbagh, *Relationships between Human Activity and the Magnetic Properties of Soils : A Case Study in the Medieval Site of Roissy-en-France*, *Archaeological Prospection*, Vol. 6, 161-170, 1999.
- [14] Marmet, E., *Cartographie à large maille de la susceptibilité magnétique du sol pour une évaluation archéologique sur les grands tracés*, Thèse de doctorat de l'université de Paris 6, Paris, 2000.
- [15] Meyer de Stadelhofen, C., *Applications de la géophysique aux recherches d'eau*, *Technique et Documentation - Lavoisier*, 1991.
- [16] Mullins, C. E. and M. S. Tite, *Magnetic Viscosity, Quadrature Susceptibility, and Frequency Dependence of Susceptibility in Single-Domain Assemblies of Magnetite and Maghemite*, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 78, No. 5, 804-809, 1973a.
- [17] Mullins, C. E. and M. S. Tite, *Preisach Diagrams and Magnetic Viscosity Phenomena for Soils and Synthetic Assemblies of Iron Oxide Grains*, *J. Geomag. Geoelectr.* , Vol. 25, 213-229, 1973b.
- [18] Mullins, C. E., *The magnetic properties of the soil and their application to archaeological prospecting*, PhD Thesis, Essex University, *Archaeo-Physika*, Vol. 5, 145-347, 1974.
- [19] Neel, L., *Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites*, *Annales de Géophysique*, Vol. 5, No. 2, 99-136, 1949.
- [20] Ottow, J. L. G., J. Weber et J. C. Hunch, *Effet de la taille des particules sur la réduction bactérienne des oxydes de fer*, *Science du sol*, Vol. 4, 305-314, 1981.
- [21] Rummary, T. A., J. Bloemendal, J. Dearing, F. Oldfield and R. Thompson, *The persistence of fire-induced magnetic oxides in soils and lake sediments*, *Annales de Géophysique*, Vol. 35, No. 2, 103-107, 1979.
- [22] Scollar, I. and I. Graham, *A method for the determination of the total magnetic moment of soil samples in a constant field*, *Propezioni Archeologiche*, Vol. 7-8, 85-92, 1972. ??????

- [23] Scollar, I., A. Tabbagh, A. Hesse and I. Herzog, *Archaeological Prospecting and Remote Sensing*, Cambridge Presse (Ed.), tome 2, Cambridge, 1990.
- [24] Tabbagh, A. et G. Verron, *Etude par prospection électromagnétique de trois sites à dépôts de l'Age du Bronze*, Bulletin de la Société Préhistorique Française, Vol. 80, No. 10-12, 375-389, 1983. ??????
- [25] Tabbagh, A., *What is the best coil orientation in the slingram electromagnetic prospecting method ?*, Archaeometry, Vol. 28, No. 2, 185-196, 1986.
- [26] Tite, M. S. and C. E. Mullins, *Magnetic properties of soils*, Propezioni Archeologiche, Vol. 5, 111-112, 1970.
- [27] Tite, M. S. and C. E. Mullins, *Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites*, Archaeometry, Vol.13, No. 2, 209-219, 1971.
- [28] Tite, M. S. and R. Linington, *Effects of climate on the magnetic susceptibility of soils*, Nature, Vol. 256, 565-566, 1975.
- [29] Thompson, R. and F. Oldfield, *Environmental Magnetism*, Allen and Unwin (Publishers) Ltd, Londres, 1986.
- [30] Trigui, M., *Etude des susceptibilités magnétiques en champ alternatif et continu de carottes de la croûte océanique en vue de l'interprétation des diagraphies électromagnétiques et magnétiques*, Thèse de doctorat de l'université de Paris 6, Paris, 1987.