



**Contribution à la caractérisation du type
d'occupation des sols à partir des propriétés
magnétiques : cas des sites de Montfarville et de
Cerisy-la-Forêt (Basse Normandie)**

Thomas Blanc-Dumont

Sous la direction de Marie Pétronille et Alain Tabbagh

Juin 2006

Master 1 Environnements Continentaux et Hydrosiences

Université Pierre et Marie Curie

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier toute l'équipe du laboratoire Sisyphe de l'Université Pierre et Marie Curie pour leur disponibilité et la bonne ambiance qui y règne toujours.

Je remercie également Maxime Le Goff pour nous avoir accordé un peu de son temps et nous avoir permis d'utiliser les appareils de St Maur, qui n'ont aucun secret pour lui.

Un grand merci à Julien Thiesson pour ses conseils avisés, qu'ils soient de l'ordre technique ou pratique, et bien sûr pour son humour et sa décontraction.

Je remercie vivement Alain Tabbagh pour m'avoir permis d'effectuer ce stage au sein de son laboratoire, pour son éternel calme et ses suggestions malgré le planning chargé qui est toujours le sien.

Enfin merci à Marie Pétronille qui m'a encadrée durant ce mois et demi malgré le sort qui semblait s'acharner sur nous, pour sa gentillesse et son écoute.

Je n'oublie pas ma famille, et surtout ma mère, qui m'a soutenue tout le long de ce stage et durant les partiels qui l'accompagnaient.

Table des matières

Table de matières	5
Introduction	7
1 Présentation des sites de Montfarville et Cerisy-la-Forêt	8
1.1 Cadre géographique	8
1.2 Cadre géologique	8
1.3 Contexte archéologique	10
1.3.1 Le site de Montfarville	10
1.3.2 Le site de Cerisy-la-Forêt	10
2 Le magnétisme des sols	11
2.1 Quelques grandeurs caractéristiques, cycle d'hystérésis	11
2.2 Propriétés magnétiques d'un solide	12
2.3 Les minéraux magnétiques du sol	12
2.4 Processus de formation	13
3 Mesures en laboratoire : principes et dispositifs	15
3.1 Mesures thermomagnétiques et d'hystérésis	15
3.1.1 Analyse thermomagnétique	15
3.1.2 Cycle d'hystérésis	16
3.2 Mesures de susceptibilité magnétique en domaine fréquentiel	17
3.2.1 Principe	17
3.2.2 Appareillage et dispositif expérimental	18
4 Mesures en laboratoire : résultats et interprétations	21
4.1 Mesures thermomagnétiques	21
4.2 Cycles d'hystérésis	22
4.3 Mesures de la susceptibilité magnétique en domaine fréquentiel	24
4.4 Discussion	25
Conclusion	29
Bibliographie	30
Annexe 1	31
Annexe 2	35
Annexe 3	42
Annexe 4	46

Introduction

L'étude des propriétés magnétiques des sols est une activité relativement récente et en fort développement de nos jours : elle a commencé dans les années 50 avec Le Borgne [1] et s'est poursuivie avec d'autres auteurs. Le Borgne a montré que les très fortes susceptibilités magnétiques rencontrées dans les horizons superficiels d'un sol sont essentiellement dues à la formation de magnétite et de maghémite par les processus naturels de pédogenèse ou par des expositions à de très hautes températures (cas du feu typiquement).

De façon générale, les mesures de la susceptibilité magnétique des sols visent à lire les signaux climatiques enregistrés par les paléosols et à identifier des pollutions de sites (et plus rarement à délimiter des zones de sols hydriques), mais le domaine d'application qui va ici nous intéresser est l'archéologie : en effet, outre les influences que peuvent avoir sur le magnétisme d'un sol le climat, le régime hydrique, la flore, la faune et l'érosion naturelle, l'anthropisation est un facteur qui se révèle primordial. Ainsi Le Borgne et Aitken avaient-ils déjà étendu leur travail à la prospection des sites archéologiques [2], tout comme Tite et Mullins par la suite [3].

L'étude des anomalies magnétiques permet de mettre à jour des structures archéologiques sous-jacentes, des sites le plus souvent liés à des traces de métallurgie, et permet aux géophysiciens d'identifier, voire de quantifier, l'influence de l'homme sur les sols superficiels.

Dans cette étude, nous avons cherché à souligner cette influence par une série d'expériences effectuées en laboratoire sur un matériau issu d'une structure archéologique, le rempart dit de « la butte aux Romains » à Cerisy-la-Forêt dans la Manche. Toutefois il est important de pouvoir s'appuyer sur un signal de référence : le grand nombre de processus intervenant dans la caractérisation magnétique d'un sol rend difficile l'attribution de valeurs spécifiques et c'est pourquoi nous avons également besoin d'analyser un sol ordinaire. Pour notre étude, ce dernier est issu du site de Montfarville dans la Manche et ne porte à priori pas ou peu de traces d'anthropisation.

Après avoir introduit les contextes géographiques, géologiques et archéologiques des sites étudiés, et avoir rappelé les quelques bases du magnétisme des sols, nous présenterons dans ce mémoire les différentes mesures effectuées, à savoir d'une part des analyses thermomagnétiques, nous permettant de définir les principaux minéraux magnétiques porteurs de l'aimantation, d'autre part des cycles d'hystérésis nous renseignant sur la taille des grains magnétiques constituant nos échantillons, et enfin des mesures de la susceptibilité magnétique dans le domaine fréquentiel.

Nous tenterons alors de comparer les résultats obtenus pour chacun des deux sites et de caractériser si possible les effets du chauffage par l'homme sur les propriétés magnétiques d'un sol.

CHAPITRE 1

Présentation des sites de Montfarville et de Cerisy-la-Forêt

1.1 Cadre géographique

Les communes de Montfarville et de Cerisy-la-Forêt se situent dans le département de la Manche (50) (limitrophe du Calvados, de l'Orne, de la Mayenne et de l'Ille-et-Vilaine), dans la région Basse-Normandie, en France (cf. figure 1.1).



Fig. 1.1 : Localisation géographique de Montfarville et de Cerisy-la-Forêt.

1.2 Cadre géologique

Les sites étudiés se situent plus précisément dans le Cotentin dont la géologie est marquée par une dichotomie structurelle, à savoir une architecture plissée appartenant au massif armoricain à l'ouest qui s'oppose à une architecture tabulaire, à l'est, appartenant au bassin parisien (cf. figure 1.2). Sur le site de Montfarville, le sol superficiel dans lequel nous avons prélevé nos échantillons est issu d'un loess surmontant une arène granitique, tandis que les échantillons prélevés sur le site de Cerisy-la-Forêt proviennent d'un schiste. Cependant, les sites n'étant distants que d'une soixantaine de kilomètres, et afin de pouvoir effectuer une comparaison pertinente entre eux, nous pouvons considérer que les échantillons prélevés sur le site de Montfarville constituent un sol « type » représentatif de la région et faiblement anthropisé (cf. 1.3.1), tandis que les échantillons prélevés à Cerisy-la-Forêt (probablement associés à la métallurgie du fer) représentent un sol intensivement transformé par l'homme.

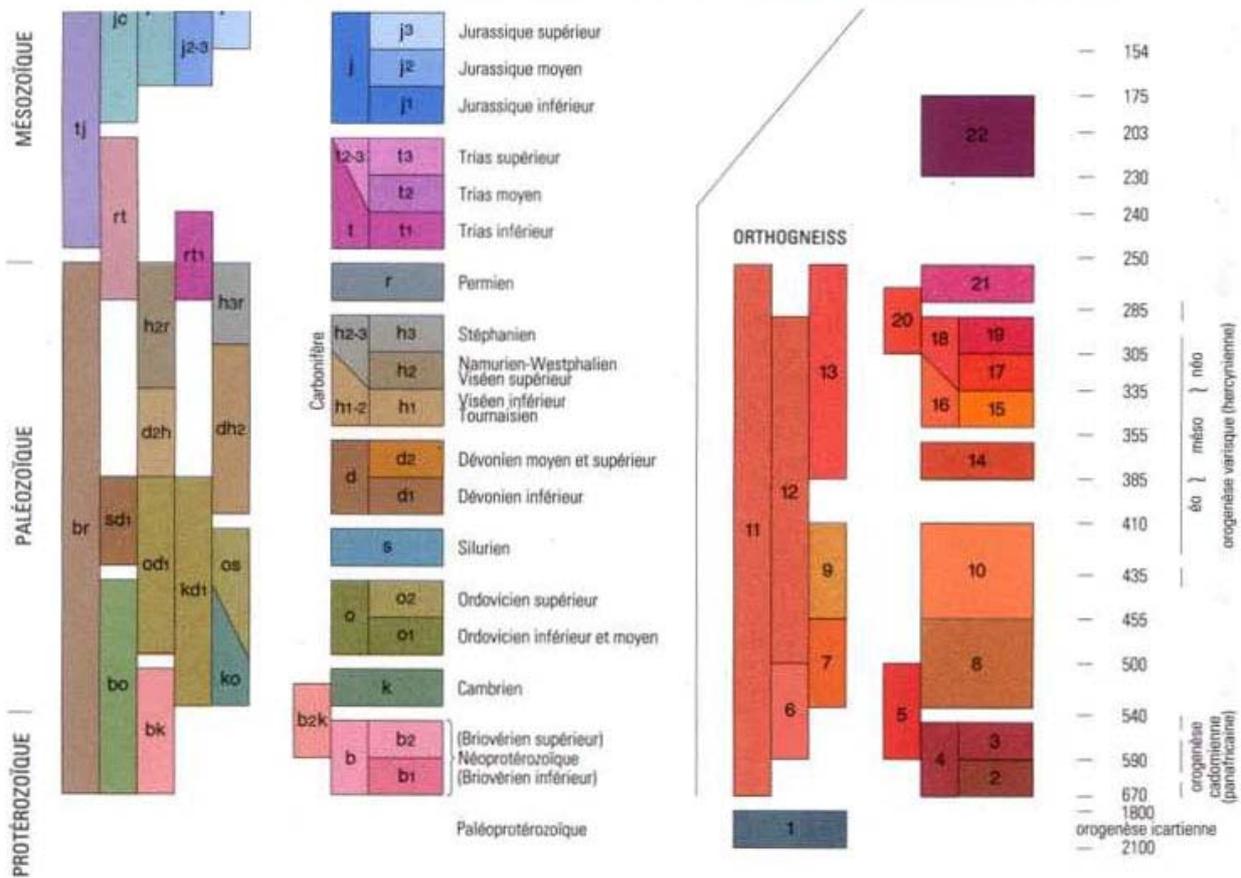
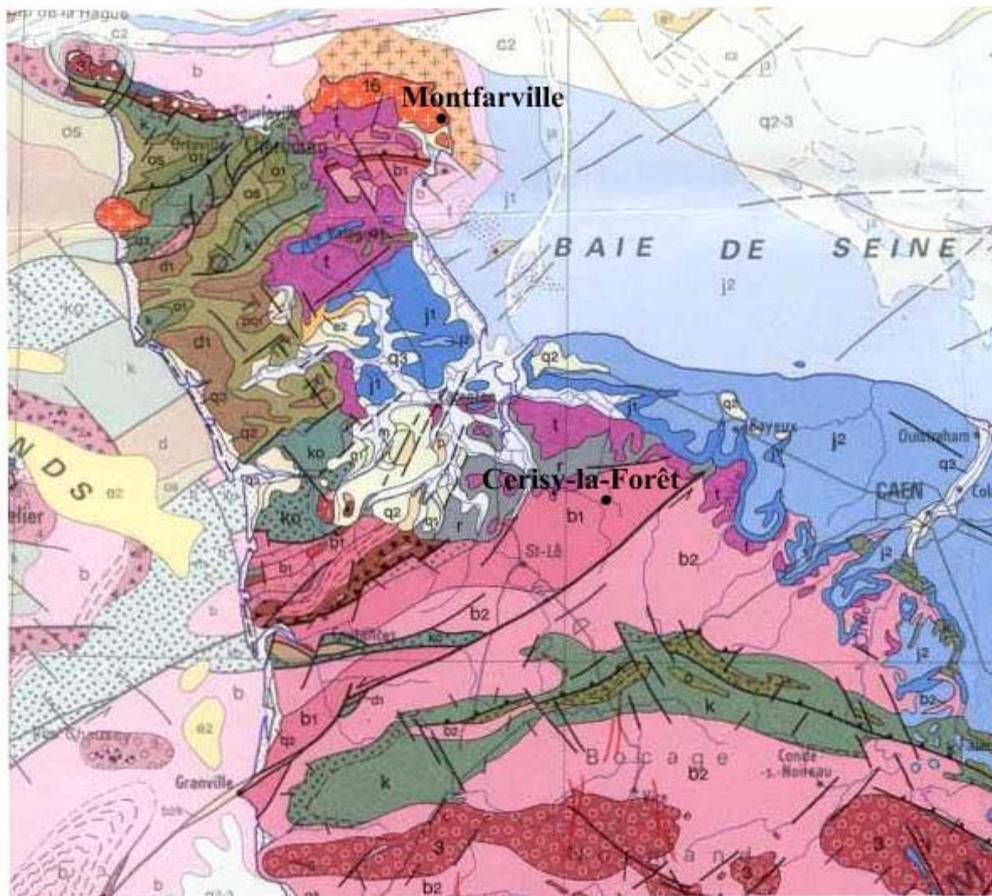


Fig. 1.2 : Géologie du Cotentin (Extrait de la carte géologique de la France, à l'échelle du millionième, BRGM).

1.3 Contexte archéologique

1.3.1 Le site de Montfarville

La commune de Montfarville et ses alentours constituent un site connu pour avoir livré de nombreux objets datant de l'Âge du Bronze final, notamment des haches à douilles et divers déchets métallurgiques de fonderie (cf. annexe 1) : en effet, les rassemblements d'objets métalliques abandonnés sous la forme de dépôts enterrés dans une fosse, sans aucun contexte archéologique apparent (pas de traces de feux, ni d'habitations), sont l'une des particularités de cette période et constituent un phénomène dont la signification reste incertaine (cela pouvait être vu comme des offrandes ou des stocks de matières échangeables selon le contexte de l'époque).

En avril 2006, une nouvelle prospection géophysique a eu lieu sur le site archéologique de Montfarville. Celle-ci a été réalisée par une équipe de l'UMR Sisyphe (Université Paris VI) dont le but était de trouver des dépôts et des structures en place par diverses méthodes électromagnétiques. Ces dernières n'ont révélé la présence d'aucun de ces objets dans le proche sous-sol (le nettoyage du site par les chasseurs de trésors en est sûrement responsable), ni aucune structure archéologique associée à la métallurgie du bronze [4].

Etant donné le contexte archéologique du site de Montfarville, nous pouvons donc a priori supposer que le sol actuel de ce site n'a pas ou peu subi de modifications de ses propriétés magnétiques naturelles (les échantillons de ce sol sont numérotés de 1 à 3 respectivement).

1.3.2 Le site de Cerisy-la-Forêt

Le site de Cerisy-la-Forêt, quant à lui, est caractérisé par la présence d'une ancienne muraille vitrifiée dont l'âge exact est encore indéterminé. Ce type de rempart, encore peu connu, fait actuellement l'objet d'une thèse par Jean-Dominique Vernioles de l'Université Paris I (cf. annexe 2). Les deux échantillons prélevés sur ce site (numérotés 4 et 5 respectivement) proviennent de cette muraille. Ils se présentent comme des fragments compacts et de couleur violette, contenant du fer à l'état métallique (A. Jambon, communication personnelle), et correspondent probablement à des résidus d'activité métallurgique. L'un des objectifs de ce travail sera notamment d'étudier les conséquences de la chauffe de ces échantillons sur leurs propriétés magnétiques.

CHAPITRE 2

Le magnétisme des sols

2.1 Quelques grandeurs caractéristiques, cycle d'hystérésis

Tout corps subissant un champ magnétique H acquiert une aimantation induite J . Le rapport des deux est appelé susceptibilité magnétique (capacité d'un corps à s'aimanter) :

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

Pour certains matériaux dits ferromagnétiques et ferrimagnétiques (cf. 2.2), il est possible de tracer un cycle d'hystérésis qui donne J en fonction du champ H appliqué (cf. figure 2.1) :

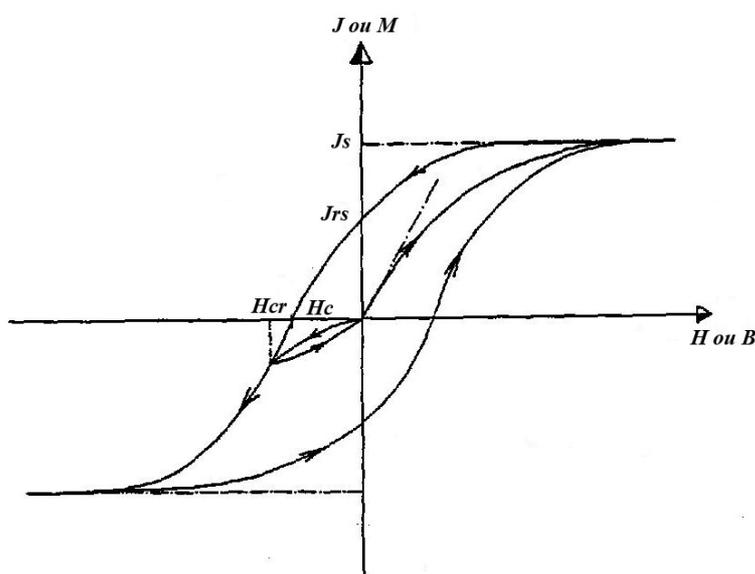


Fig. 2.1 : Cycle d'hystérésis donnant l'aimantation J en fonction du champ appliqué H [6].

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 non nul (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 J_{rs}). 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 (J_{rs}) et induite (J_s), ainsi que le champ coercitif (H_c , 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 (H_{cr}), pour lequel le moment rémanent est nul (le moment rémanent dû au champ H_{cr} est égal à celui de direction opposée acquis précédemment), a quant à lui été déterminé en appliquant progressivement un champ inverse (backfield) après saturation.

Ces paramètres sont directement liés aux caractéristiques des grains magnétiques constituant le solide : en effet, un grain peut être de taille différente et est divisé en un ou plusieurs domaines dits de Weiss (on distingue les grains superparamagnétiques, monodomaines, pseudo-monodomaines et

polydomaines, par ordre de taille croissante).

2.2 Propriétés magnétiques d'un solide

Le champ magnétique créé par un solide est dû aux mouvements des électrons qui le composent : on distingue la rotation orbitale de ces derniers autour du noyau des atomes et leur rotation sur leur propre axe ou spin ; dans le cas des oxydes de fer naturels, qui nous intéressent plus particulièrement, le spin est l'acteur principal du magnétisme. Différentes propriétés en découlent [5]:

Diamagnétisme

Bien que présent dans la majorité des corps, le diamagnétisme correspond à une susceptibilité magnétique faible par rapport à celles décrites ci-après : elle se caractérise par une valeur très faible et négative lors de l'interaction entre un champ magnétique et le mouvement orbital des électrons. Cette aimantation est perdue dès que le champ ne s'applique plus. De nombreux minéraux comme le quartz ou la calcite possèdent un comportement diamagnétique.

Paramagnétisme

Certains atomes, ions ou molécules possèdent un moment magnétique dipolaire élémentaire permanent (normalement sans orientation cohérente du fait de l'agitation thermique) : ces dipôles tendent à s'aligner parallèlement à la direction d'un champ magnétique appliqué, entraînant une faible aimantation positive qui est également perdue dès que le champ disparaît. On retrouve le comportement paramagnétique chez de nombreux minéraux comme l'olivine, le pyroxène ou la biotite.

Ferromagnétisme

Il se caractérise par une importante modification des propriétés magnétiques à une température critique, dite de Curie (notée T_c). En dessous cette température, un matériau ferromagnétique peut porter une forte aimantation rémanente (existant en l'absence de tout champ appliqué) due à l'alignement parallèle des moments magnétiques élémentaires des électrons ; au-dessus de cette température, il se comporte comme un matériau paramagnétique, l'ordre ferromagnétique étant anéanti par l'agitation thermique devenue trop importante.

Le moment magnétique d'un solide ferromagnétique est élevé, bien plus que pour des solides dia ou paramagnétiques.

Ferrimagnétisme

Il ne diffère du ferromagnétisme que par le rôle joué par la structure cristalline : les solides ferrimagnétiques sont généralement des oxydes de fer de maille cubique à face centrée contenant deux types de sites magnétiques dont les moments sont antiparallèles et d'amplitudes différentes. Il existe donc tout de même une aimantation nette mais celle-ci est plus faible que dans le cas du ferromagnétisme.

Antiferromagnétisme

Il présente la même particularité que le ferrimagnétisme, à ceci près que les moments magnétiques antiparallèles sont de même amplitude : il n'y a donc pas d'aimantation. Un antiferromagnétisme dit imparfait peut aussi être observé du fait de la présence d'impuretés ou une modification de l'antiparallélisme (phénomène de « spin canting »), comme pour l'hématite, ce qui se traduit donc par un faible ferromagnétisme.

2.3 Les minéraux magnétiques du sol

Les propriétés magnétiques d'un sol sont caractérisées par les comportements magnétiques des minéraux qui le composent [5] :

- Les composants diamagnétiques du sol sont le quartz, l'orthoclase, le carbonate de calcium, la matière organique et l'eau mais ils ont peu d'influence.
- Beaucoup des minéraux d'un sol sont paramagnétiques (olivine, pyroxène, grenat, biotite, carbonates de fer et de manganèse entre autres), mais ceux-ci n'apportent une importante contribution que dans le cas de sols pauvres en minéraux ferrimagnétiques.
- La goethite et l'hématite sont les deux minéraux antiferromagnétiques les plus courants dans un sol, le premier étant le plus abondant dans les sols bien drainés et le second dans des conditions plus oxydantes.
- Enfin les minéraux ferrimagnétiques sont surtout des oxydes de fer de très grande susceptibilité, principalement représentés par la magnétite et la maghémite, et ils sont les principaux responsables du magnétisme d'un sol.

Voici une liste des principaux minéraux magnétiques d'un sol et leurs caractéristiques :

Oxydes de fer : - **hématite** αFe_2O_3 (système rhomboédrique) : antiferromagnétisme imparfait

$$T_c = 678^\circ C$$

- **magnétite** Fe_3O_4 (système cubique face centrée) : ferrimagnétique

$$T_c = 580^\circ C$$

- **maghémite** γFe_2O_3 (système cubique face centrée) : ferrimagnétique

$$T_c = 648^\circ C$$

Sulfures de fer : - **pyrrhotite** Fe_xS_{1-x} (système monoclinique) : ferrimagnétique

$$T_c = 300^\circ C$$

Elle est caractéristique de l'hydrothermalisme et disparaît par oxydation.

- **greigite** Fe_3S_4 (système cubique face centrée) : ferrimagnétique

$$T_c = 300^\circ C$$

Elle est biogénique (présence de bactéries magnétotactiques).

2.4 Processus de formation

Le magnétisme des sols est donc essentiellement dû à la présence des minéraux magnétiques que sont les oxydes de fer, et plus particulièrement l'hématite, la maghémite et la magnétite. La figure 2.2 nous montre les relations entre ces trois minéraux :

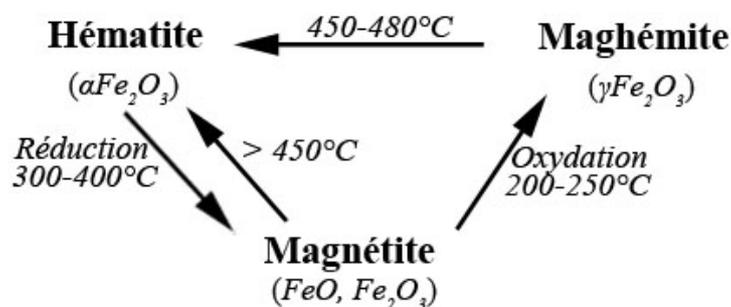


Fig. 2.2 : Cycle de formation hématite-maghémite-magnétite [6].

Trois grands processus sont responsables de la formation de ces oxydes de fer dans les sols :

- Formation de maghémite (voire de magnétite) à partir d'oxydes ou d'oxyhydroxydes par des cycles répétés d'oxydation-réduction pendant la formation du sol ;
- Réduction de l'hématite en magnétite par le chauffage du sol dans des conditions réductrices (présence de matière organique), pouvant être suivie d'une oxydation en maghémite dans des conditions aérobies ;
- Déshydratation d'un oxyhydroxyde de fer, la lépidocrocite ($FeOOH$).

De manière générale, un sol est plus magnétique que la roche-mère correspondante. Ce phénomène est lié à la mise en place de différents processus pendant la formation d'un sol (dissolution différentielle et enrichissement, authigénie,...), mais aussi à la biogénie et surtout aux élévations de température, causées par le feu [1] et l'activité anthropique, présence de sites métallurgiques notamment [7], qui engendrent de très fortes valeurs de susceptibilité dans les couches superficielles du sol.

CHAPITRE 3

Mesures en laboratoire : principes et dispositifs

3.1 Mesures thermomagnétiques et d'hystérésis

Ces mesures ont été effectuées au laboratoire de paléomagnétisme de l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) situé à Saint-Maur (94).

3.1.1 Analyse thermomagnétique

Nous avons effectué des mesures thermomagnétiques en champ faible et sous air en fonction de la température (courbes $K-T$) à l'aide d'un susceptibilimètre de type Kappabridge Agico *KLY-3S* couplé à un four *CS-3* et relié à un ordinateur (cf. figure 3.1). On réduit préalablement l'échantillon en fine poudre en le concassant et on l'introduit dans un tube à essai en quartz. Celui-ci est ensuite placé dans une bobine parcourue par un courant alternatif et l'on mesure la variation de l'auto-induction de cette bobine à l'aide d'un pont de mesure. Pendant la mesure, un tuyau relié à une bonbonne permet l'injection d'argon afin de réduire l'oxydation des minéraux de la roche concassée. Un système d'arrivée d'eau est aussi mis en place pour que les bobines ne soient pas elles-mêmes chauffées.



Fig. 3.1 : Dispositif expérimental d'analyse thermomagnétique, avec le boîtier contenant la bobine (1), le susceptibilimètre *KLY-3S* (2) et l'unité de commande du four *CS-3* (3).

Nous avons réalisé nos expériences de mesure de susceptibilité à haute température: les cinq échantillons ont été chauffés de la température ambiante à 700°C avec un incrément de $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$, puis ont été refroidis à la même vitesse.

Nous avons enfin estimé la température de Curie des minéraux magnétiques présents révélés par une chute réversible dans chacune des courbes $K-T$. En effet, comme nous l'avons vu

précédemment, chaque minéral ferrimagnétique ou ferromagnétique possède une température de Curie au-dessus de laquelle son comportement devient paramagnétique (cf. figure 3.2) ; les mesures effectuées vont donc nous permettre d'identifier les minéraux porteurs de l'aimantation de manière simple et directe.

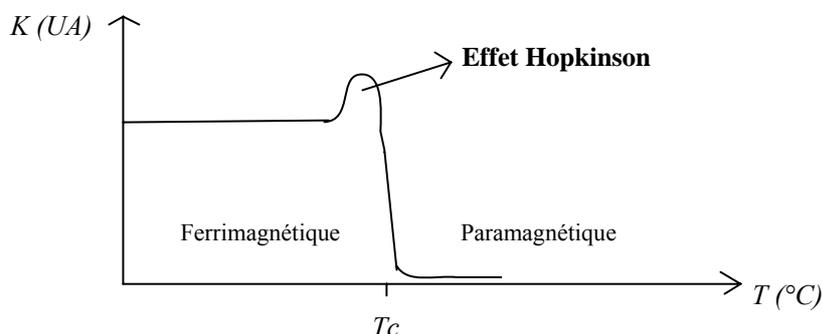


Fig. 3.2 : Exemple d'analyse thermomagnétique pour un sol.

3.1.2 Cycle d'hystérésis

Les mesures d'hystérésis ont été réalisées à température ambiante grâce à l'utilisation d'un inductomètre à translation en champs forts fabriqué par Maxime Le Goff au laboratoire de paléomagnétisme de Saint-Maur.

L'échantillon, d'environ 1 cm^3 de volume et d'une masse de 2 à 3 g, est placé dans un porte-échantillon en plastique puis dans un inductomètre à translation couplé à un électroaimant (cf. figure 3.3) : il effectue des mouvements rapides de gauche à droite dans l'entrefer, produisant alors une variation de flux dans les bobines et une force électromotrice (*f.e.m*) proportionnelle à l'aimantation axiale à leurs bornes.

Un ordinateur interfacé au système permet de recueillir les valeurs de champ et d'aimantation (J_s , J_{rs} , H_c , H_{cr}), afin de tracer le cycle d'hystérésis qui nous permettra de déterminer la taille des grains magnétiques contenus dans chaque échantillon.

L'électro-aimant possède un entrefer de 5 cm de long et un diamètre de 12 cm. Il peut émettre un champ magnétique jusqu'à 1,7 Tesla (T), mais nos mesures ont été effectuées jusqu'à 0,71 T.



Fig. 3.3 : Inductomètre à translation en champs forts couplé à un électroaimant.

3.2 Mesures de la susceptibilité magnétique en domaine fréquentiel

3.2.1 Principe

L'aimantation induite, et donc la susceptibilité magnétique, d'un corps peut être séparée en deux composantes dès lors qu'on la considère dans le domaine complexe : une composante en phase et une composante en quadrature telles que $J = J_{phase} - i J_{quadrature}$ (cf. figure 3.4).

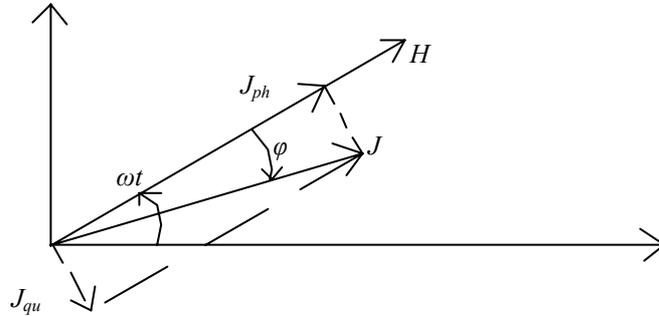


Fig. 3.4 : Représentation des composantes de l'aimantation induite.

Notre objectif ici est de mesurer les composantes en phase et en quadrature de la susceptibilité magnétique des échantillons en fonction de la fréquence. Pour cela, nous disposons d'un système de double bobine (une primaire et une secondaire, dans laquelle nous plaçons l'échantillon, elle-même placée à l'intérieur de la première) : un courant I (dont l'intensité est contrôlée par une résistance R) est injecté dans la bobine primaire, ce qui crée un champ électromagnétique inducteur, appelé champ primaire ; l'échantillon (corps magnétique ou conducteur) plongé dans ce champ génère à son tour un champ, appelé champ secondaire, qui induit un signal dans la bobine secondaire. L'utilisation d'un transféromètre, servant à la fois de générateur et de récepteur synchrone sur la fréquence d'émission, permet de mesurer en même temps la *f.e.m* créée aux bornes du secondaire et l'intensité circulant dans le primaire, et donc d'en déduire les susceptibilités correspondantes.

Voici les détails du calcul de la susceptibilité magnétique [6] :

Soit Φ le flux d'induction magnétique généré par l'échantillon et G_S la constante électrodynamique de la bobine secondaire, on a :

$$\Phi = M G_S$$

Si G_S est stable dans le temps, la *f.e.m* créée dans la bobine secondaire est :

$$e_S = - \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_S = - G_S \frac{dM}{dt}$$

Si la bobine primaire émet un champ variant comme $e^{j\omega t}$, où ω est la pulsation du signal injecté, le moment M créé dans l'échantillon varie également en $e^{j\omega t}$ tel que $M = M_0 e^{j\omega t}$. On obtient :

$$e_S = - j \omega G_S M$$

Rappelons que si on note K la susceptibilité magnétique volumique et V le volume de

l'échantillon, on a : $M = K V H$, d'où :

$$e_s = - j \omega G_s K V H$$

Soit I_p le courant circulant dans la bobine primaire de constante électrodynamique G_p , H s'écrit donc : $H = \frac{(G_p I_p)}{\mu_0}$, où $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ est la perméabilité magnétique et où $I_p = I_0 e^{j\omega t}$. La formule de la *f.e.m* du secondaire est donc finalement :

$$e_s = - \frac{j \omega G_s G_p \kappa V I_0 e^{j\omega t}}{\mu_0}$$

Les valeurs lues sur le transféromètre correspondent au rapport de la *f.e.m* du secondaire ($CH1$) à la tension aux bornes de la résistance du circuit du primaire ($CH2$). Ainsi :

$$\frac{e_s}{e_p} = \frac{CH2}{CH1} = - \frac{j \omega G_s G_p \kappa V}{\mu_0 R} \quad (\text{avec } CH1 = RI)$$

On lira en réalité sur le transféromètre $(CH2 / CH1)_r$ et $(CH2 / CH1)_i$, c'est-à-dire respectivement les parties réelle et imaginaire du rapport des tensions. Finalement, on a donc :

$$K = - \frac{\left(\frac{e_s}{e_p}\right) \mu_0 R}{j \omega G_s G_p V}$$

$$K = \left[\frac{-j \left(\frac{CH2}{CH1}\right)_r \mu_0 R}{\omega G_s G_p V} \right] + \left[\frac{\left(\frac{CH2}{CH1}\right)_i \mu_0 R}{\omega G_s G_p V} \right]$$

$$K = \quad - j Kq \quad + \quad Kp$$

3.2.2 Appareillage et dispositif expérimental

Le transféromètre utilisé pour ces mesures est un Solartron 1253 développé par Schlumberger (cf. figure 3.6). Il peut être décomposé en trois unités (cf. figure 3.5) :

- un générateur produisant un signal sinusoïdal pour stimuler le système étudié :
 - amplitude de 0 à 10,23 V avec une résolution de 10 mV ;
 - fréquence de 1 mHz à 20 kHz.
- deux canaux mesurant la réponse au stimulus en différents points du système :
 - temps d'intégration de 0,1 à 10⁵ s (avec les signaux bruités, plus le temps d'intégration est grand, plus la mesure est proche de la vraie valeur) ;
- une interface utilisateur avec affichage (réglages, menus, résultats...).

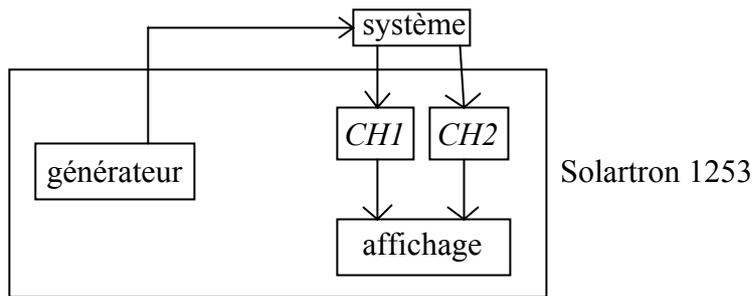


Fig. 3.5 : Schéma simplifié du fonctionnement du Solartron.

Les bobines utilisées possèdent leurs propres caractéristiques (cf. annexe 3), dont la fréquence de résonance. Nous sommes donc limités en fréquence par la plus faible des deux : les mesures restent fiables tant que l'on ne dépasse pas typiquement le tiers de cette fréquence pour la bobine primaire et le dixième de cette fréquence pour la bobine secondaire. Nous avons donc dû avoir recours à deux systèmes de doubles bobines, l'un pour les basses fréquences et l'autre pour les plus hautes fréquences (cf. figure 3.6). Nous avons également recalculé les constantes électrodynamiques de chaque bobine à l'aide d'une petite bobine étalon afin de s'assurer de leur bon étalonnage et de la validité des valeurs déjà en notre possession (cf. annexe 3).

Chaque bobine secondaire est en fait composée de six solénoïdes, placés en opposition trois à trois : le but est d'annuler de cette façon tout champ perturbateur extérieur et de ne récupérer que la réponse de l'échantillon.

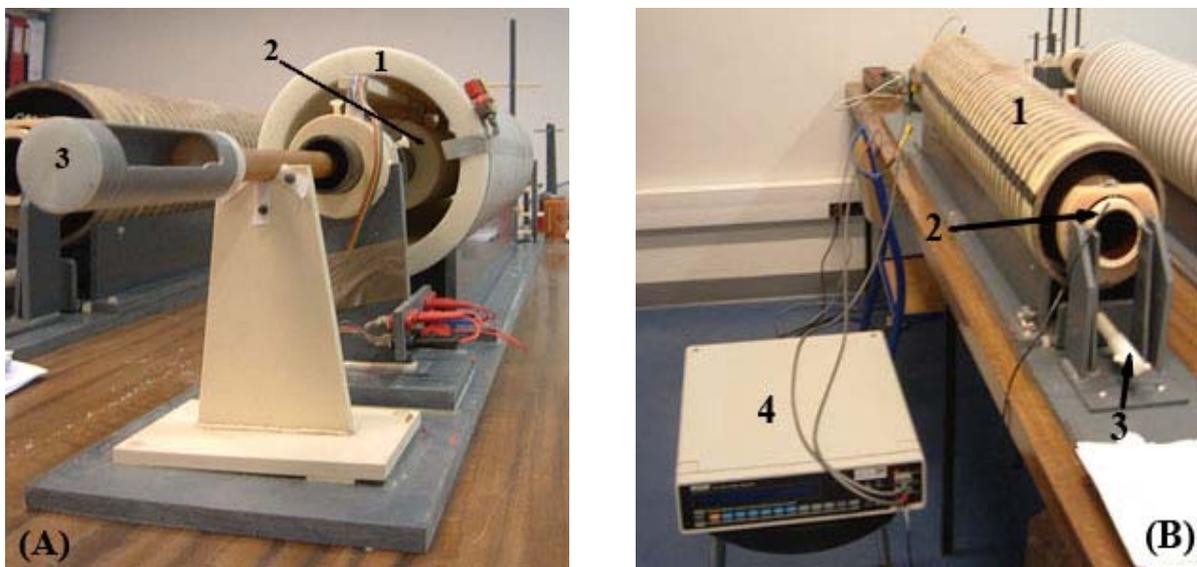


Fig. 3.6 : (A) Dispositif expérimental « basse fréquence » avec la bobine primaire (1), la bobine secondaire à l'intérieur de celle-ci (2) et la perche servant à introduire les échantillons (3) ; (B) Dispositif expérimental « haute fréquence » avec la bobine primaire (1), dans laquelle est placée la bobine secondaire (2). Notons aussi la molette (3) qui permet de faire translater (1) par rapport à (2). Les deux bobines sont reliées au Solartron 1253 (4).

La figure 3.7 ci-dessous représente le schéma du circuit électronique utilisé :

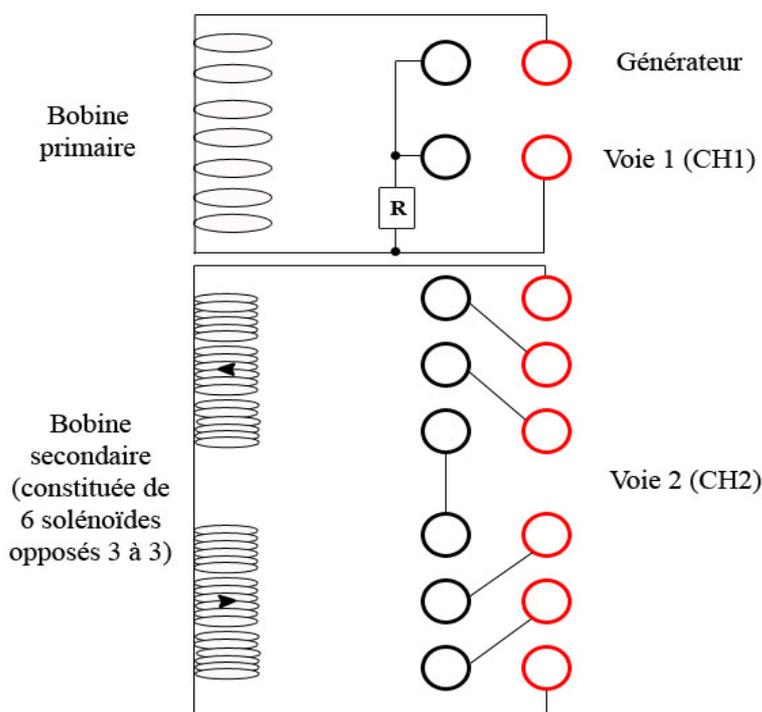


Fig. 3.7 : Schéma simplifié du circuit électronique utilisé.

La majeure difficulté de l'expérience réside dans la minimisation du signal extérieur car même si les solénoïdes du secondaire sont en opposition, on ne peut jamais réellement mesurer un résultat nul à vide (sans échantillon) ; ainsi, afin d'être dans les meilleures conditions possibles, la bobine primaire est montée sur un mécanisme à translation, nous permettant par l'intermédiaire d'une molette de la déplacer par rapport à la bobine secondaire qui elle reste fixe. Nous cherchons donc la position optimale pour laquelle l'amplitude et la phase du signal sont les plus faibles possibles mais en veillant à ce qu'il reste du même signe tout au long de l'expérience.

Après avoir fait ce réglage, qui est requis à chaque changement de fréquence, et avoir noté les valeurs à vide, l'échantillon contenu dans un sachet plastique hermétique est introduit dans la bobine secondaire à l'aide d'une perche graduée tous les cinq centimètres, et placé au premier ou au dernier quart de la bobine (soit entre 50 et 65 cm, soit entre 90 et 105 cm mesurés sur la perche) : ce résultat a été obtenu en faisant des mesures à l'aide d'un tore tout le long de la bobine et pour différentes fréquences. C'est pour ces deux positions que l'on obtient le plus fort signal (cf. figure 3.7 et annexe 4).

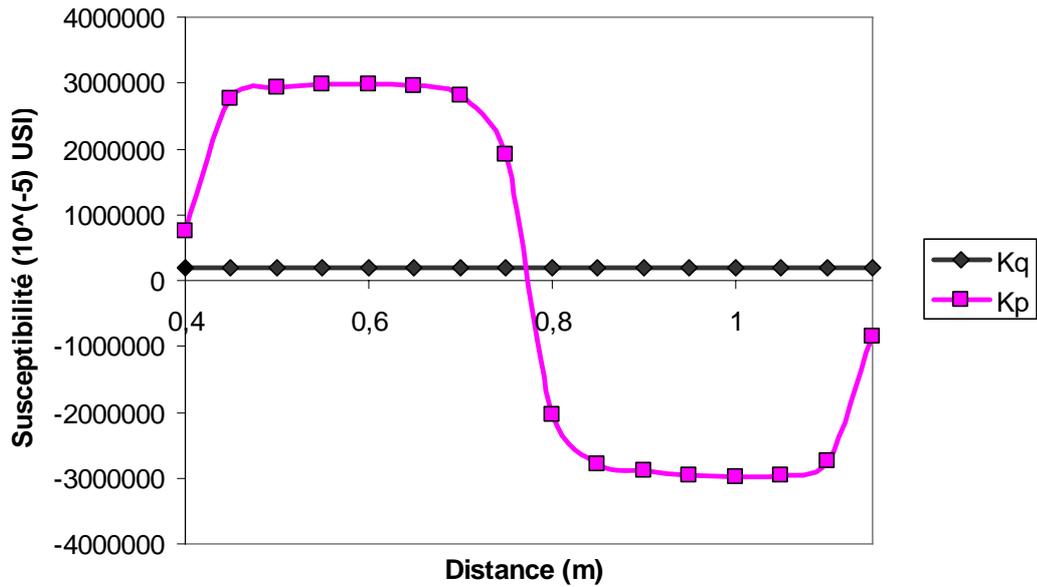


Fig. 3.8 : Composantes en phase et en quadrature de la susceptibilité obtenues pour un tore que l'on a déplacé le long du système de bobines à haute fréquence (les mesures ont été effectuées à une fréquence de 924 Hz). On constate que le maximum de signal a lieu pour des positions du tore comprises entre 50 et 65 cm ou bien entre 90 et 105 cm).

Chaque échantillon est ainsi placé dans le dispositif, à une fréquence donnée, en veillant à ce que chaque mesure soit précédée et suivie d'une mesure à vide (chaque mesure correspond à la moyenne de trois mesures sur un temps d'intégration de dix secondes) : en effet, il nous faudra soustraire ces valeurs à vide afin d'obtenir la véritable réponse d'un échantillon.

Pour finir, notre environnement étant sous l'influence de nombreux appareils électroniques, signalons que le choix des fréquences a été effectué de manière à se situer le plus loin possible des harmoniques de la fréquence 50 Hz.

CHAPITRE 4

Mesures en laboratoire : résultats et interprétations

4.1 Mesures thermomagnétiques

Les courbes de susceptibilité magnétique en fonction de la température sont présentées sur la figure 4.1.a pour les échantillons de Montfarville et sur la figure 4.1.b pour les échantillons de Cerisy-la-Forêt.

Les courbes $K-T$ des trois échantillons de Montfarville sont presque identiques, montrant la présence probable d'un effet Hopkinson et une chute brutale de la susceptibilité au cours de la chauffe entre 500 et 600°C. Le point de Curie estimé pour cette phase est d'environ 550°C : le principal minéral porteur de l'aimantation est donc la magnétite. Au cours du refroidissement, on observe toujours le même point de Curie qu'à la chauffe, malgré une nette augmentation des valeurs de susceptibilité. Cette augmentation pourrait être due à un excès de matière organique ou bien à la reformation de magnétite liée à un excès d'oxydes de fer qui n'avaient pas encore cristallisés.

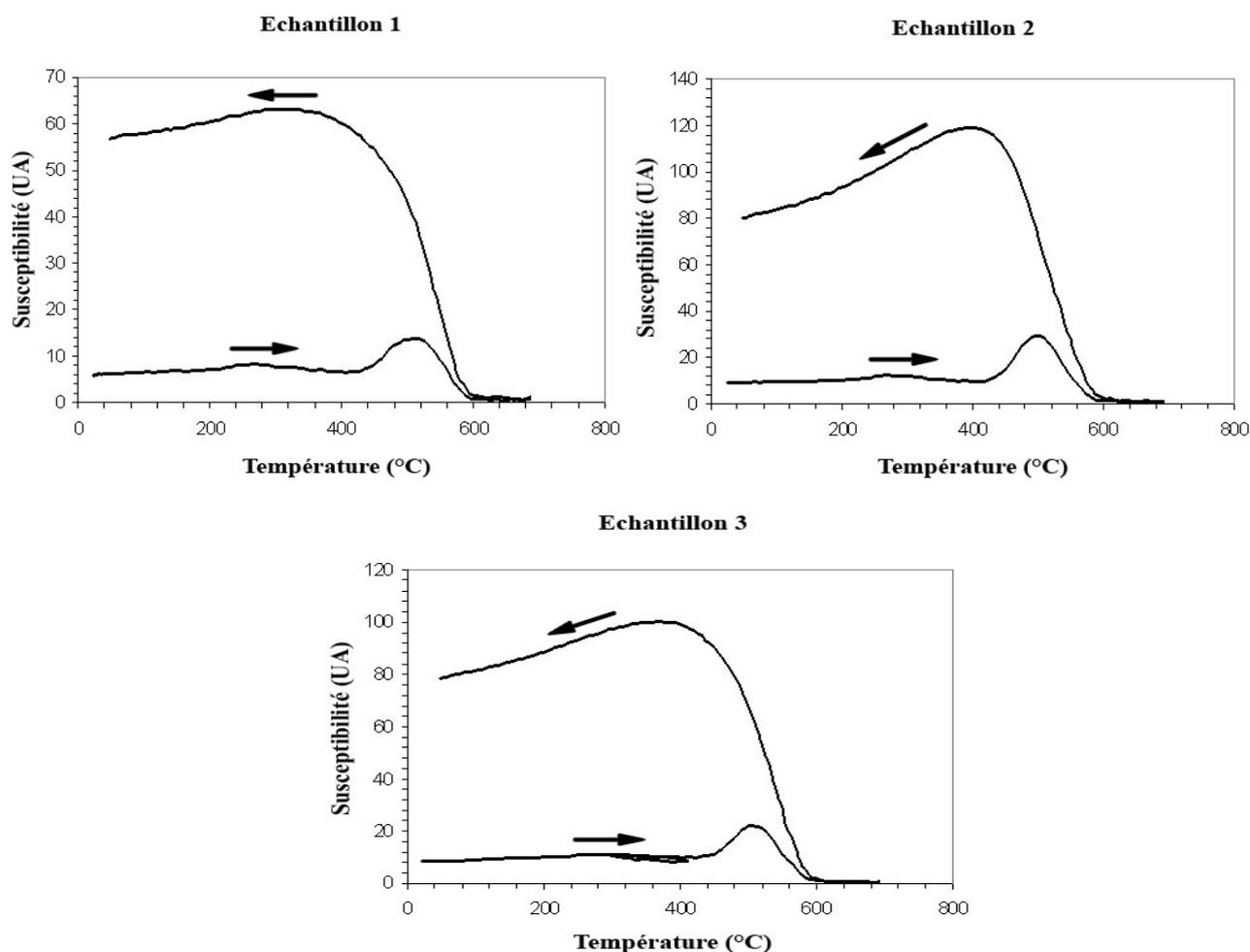


Fig. 4.1.a : Courbes de la susceptibilité magnétique en fonction de la température (courbes $K-T$) pour les échantillons de sol de Montfarville (les flèches indiquent s'il s'agit de la chauffe ou du refroidissement).

Concernant les deux échantillons de Cerisy-la-Forêt, les courbes $K-T$ obtenues au cours de la

chauffé et du refroidissement sont proches. Elles montrent toujours une chute brutale de la susceptibilité pour des températures comprises entre 500 et 600°C, comme pour les échantillons de Montfarville. Cela signifie donc que la magnétite est encore une fois le porteur magnétique dominant de ces échantillons. Par opposition aux échantillons de Montfarville, on n'observe apparemment aucun (ou un très faible) effet Hopkinson et pas d'augmentation des valeurs de susceptibilité au refroidissement. Cette nette différence entre les deux sites est certainement liée au fait que les échantillons de Cerisy-la-Forêt ont déjà été chauffés lors de la construction du rempart (ce qui a dû introduire des transformations minéralogiques) par opposition aux échantillons de Montfarville pour lesquels il s'agit ici de la première chauffe.

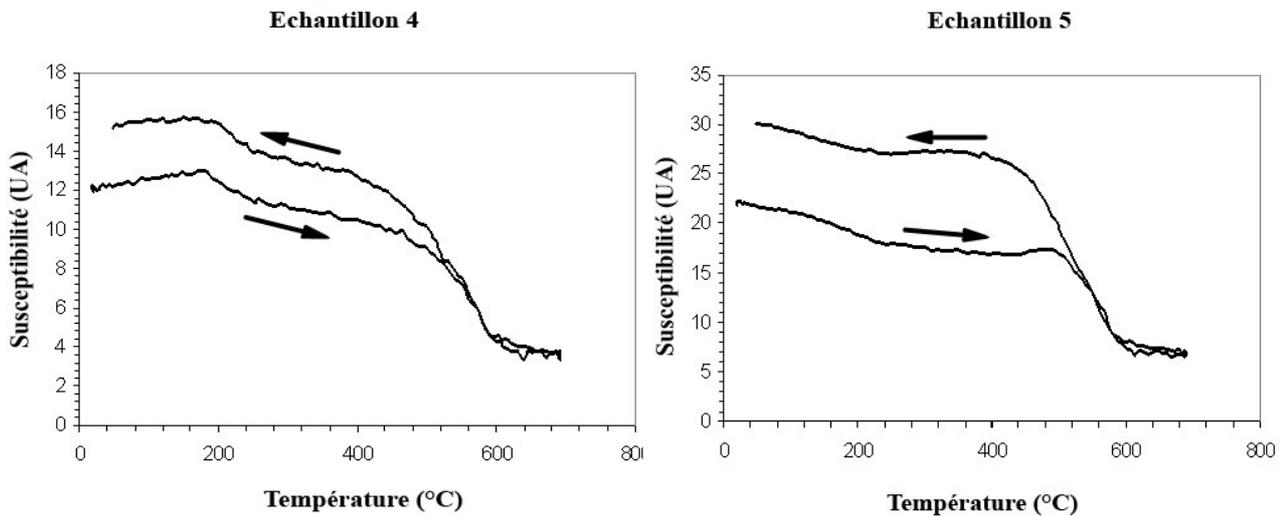


Fig. 4.1.b : Courbes de la susceptibilité magnétique en fonction de la température (courbes $K-T$) pour les échantillons de Cerisy-la-Forêt (les flèches indiquent s'il s'agit de la chauffe ou du refroidissement).

4.2 Cycles d'hystérésis

Les cycles d'hystérésis, donnant l'aimantation induite en fonction du champ magnétique appliqué, sont présentés sur la figure 4.2.a pour les échantillons de Montfarville et sur la figure 4.2.b pour les échantillons de Cerisy-la-Forêt.

Les cycles d'hystérésis des échantillons de Montfarville sont très semblables et présentent une saturation incomplète avec un comportement dit « taille de guêpe » (cycle étroit).

Les cycles des échantillons de Cerisy-la-Forêt possèdent les mêmes caractéristiques, même s'ils apparaissent légèrement plus larges.

Les données extraites des cycles d'hystérésis, à savoir les rapports J_{rs} / J_s et H_{cr} / H_{cf} , nous amènent à tracer le diagramme de Day (cf. figure 4.3), qui permet de déterminer la taille des grains magnétiques porteurs de l'aimantation : tous les échantillons semblent posséder des grains pseudo-monodomaines (PMD).

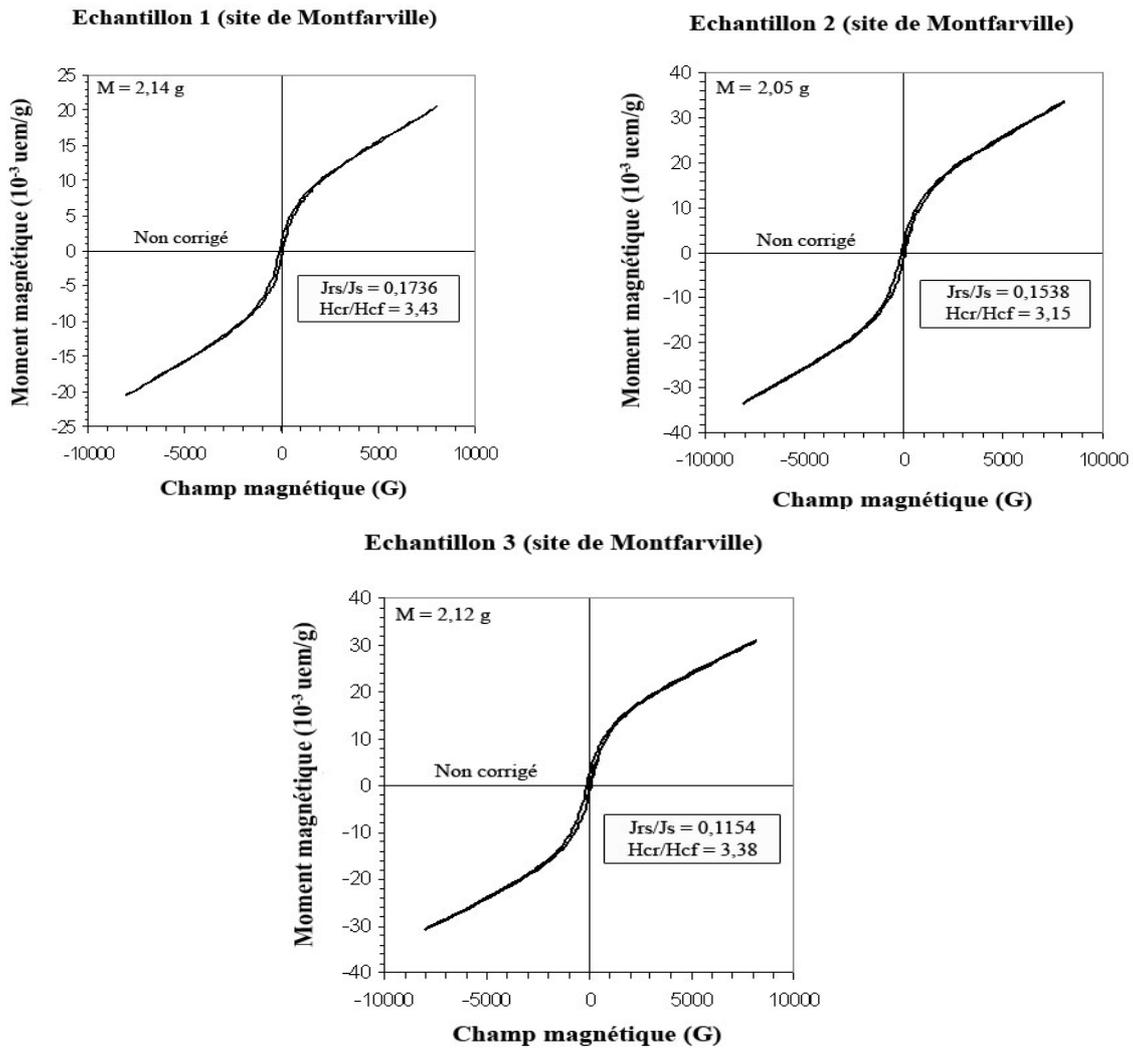


Fig. 4.2.a : Cycles d'hystérésis obtenus pour les échantillons de Montfarville.

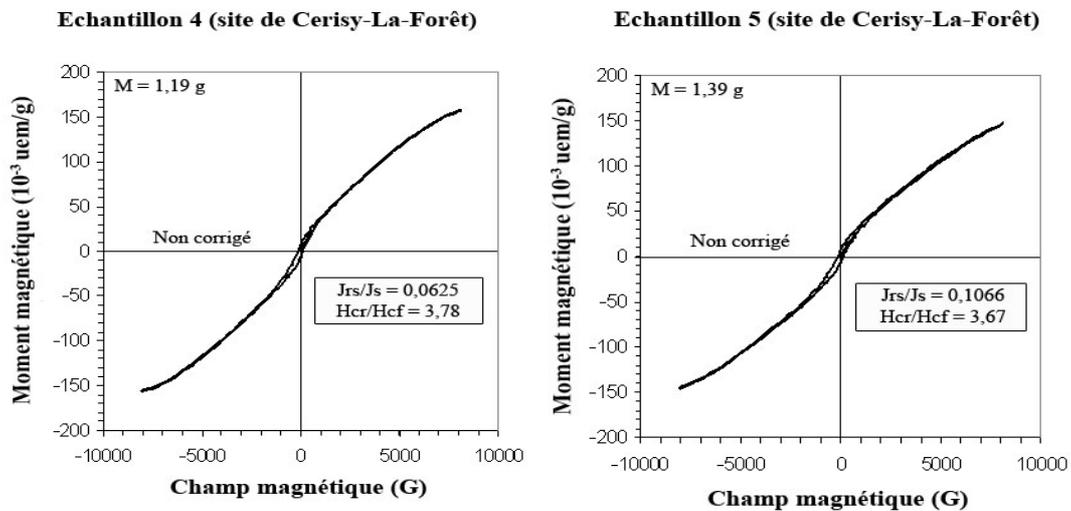


Fig. 4.2.b : Cycles d'hystérésis obtenus pour les échantillons de Cerisy-la-Forêt.

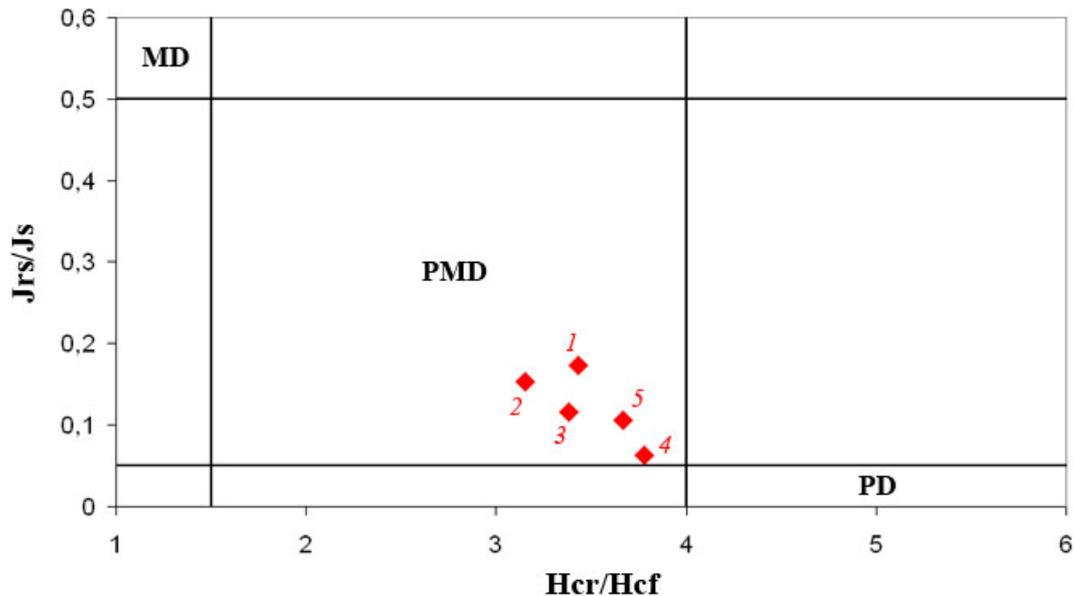


Fig. 4.3 : Diagramme de Day, montrant à quelle taille de grains (monodomaine (MD), pseudo-monodomaine (PMD) ou polydomaine (PD)) appartiennent les échantillons étudiés. Les points 1, 2 et 3 correspondent aux échantillons de Montfarville et les points 4 et 5 à ceux de Cerisy-la-Forêt.

4.3 Mesures de la susceptibilité magnétique en domaine fréquentiel

Nous avons rencontré de nombreux problèmes lors de ces mesures : en effet, il s'est souvent avéré difficile d'obtenir des valeurs complètement stables. Plusieurs facteurs peuvent en être responsables :

- les perturbations mécaniques : le simple fait de marcher ou de se trouver à côté des bobines ainsi que de toucher involontairement la table sur laquelle elles reposaient provoquait souvent un décalage du « zéro » (minimisation du signal à vide) qui avait été effectué préalablement ;
- les perturbations thermiques : lorsque la température du laboratoire est élevée (en été et à cause des néons), on peut observer une dérive systématique et a priori non linéaire du « zéro » ;
- les perturbations électromagnétiques : l'opposition des solénoïdes des bobines secondaires nous protège normalement de ce type de perturbations mais nous avons été amenés à penser que même une bobine de ce type pouvait y être très sensible pour des raisons qui restent à déterminer (en effet la bobine secondaire utilisée à l'origine pour les mesures hautes fréquences fournissait des données extrêmement instables et nous avons dû en changer).

Les données relevées au cours de ces expériences ont permis par le calcul présenté en 3.2.1 et le logiciel Excel d'obtenir les susceptibilités magnétiques en phase et en quadrature correspondantes pour chaque échantillon. Toutefois, le volume V d'un échantillon n'étant pas mesurable, il est plus facile de calculer les susceptibilités massiques χ_p et χ_q (on remplace V par M la masse sèche de l'échantillon) ; les susceptibilités volumiques peuvent être obtenues en remplaçant V par M/ρ , où ρ est la masse volumique du sol. Notons que ρ n'étant pas réellement connue nous avons pris une valeur moyenne de 1800 kg.m^{-3} .

Avant les mesures, nous avons donc étuvé les échantillons à 100°C pendant une nuit (excepté les échantillons de Cerisy-la-Forêt qui étaient suffisamment indurés pour ne pas contenir d'eau), puis nous les avons pesés.

Nous n'avons pas pu effectuer un recouvrement des valeurs de susceptibilité basses fréquences et hautes fréquences en raison de l'absence de données entre 173 et 924 Hz. Deux raisons à cela :

- la limite imposée par les fréquences de résonance des bobines ;
- des données extrêmement instables en dessous de 900 Hz pour le système hautes fréquences.

Les figures 4.4.a et 4.4.b présentent les comportements observés à basses et hautes fréquences pour les cinq échantillons étudiés.

D'après M. Dabas [6], pour un sol ordinaire, la susceptibilité magnétique en phase Kp décroît comme le logarithme de la fréquence et la susceptibilité magnétique en quadrature Kq est indépendante de la fréquence, tandis que pour un sol métallurgique, la première décroît également alors que la seconde croît.

Les échantillons de Montfarville, justement considérés comme des échantillons de sol ordinaire, présentent effectivement une décroissance de Kp au vu de la courbe de régression, et comme on l'attendait, des valeurs relativement faibles de la susceptibilité magnétique. Les échantillons de Cerisy-la-Forêt quant à eux présentent une décroissance de Kp plus modérée, tendant vers une asymptote horizontale, mais montrent des valeurs de susceptibilité beaucoup plus importantes (d'au moins un ordre de grandeur plus grandes).

Une analyse du comportement de Kq est quant à elle beaucoup plus problématique, et ce pour tous les échantillons : même si comme nous l'attendions ses valeurs sont systématiquement inférieures à celles de Kp , elles présentent une forte dispersion et aucune corrélation ne semble observable entre basses et hautes fréquences.

Notons également que de nombreuses valeurs négatives de Kq (non représentées sur les figures ci-dessous en raison des échelles logarithmiques) ont été calculées or il s'agit d'une grandeur qui doit toujours être positive car les minéraux porteurs de l'aimantation sont ferrimagnétiques (cf. 2.2).

4.4 Discussion

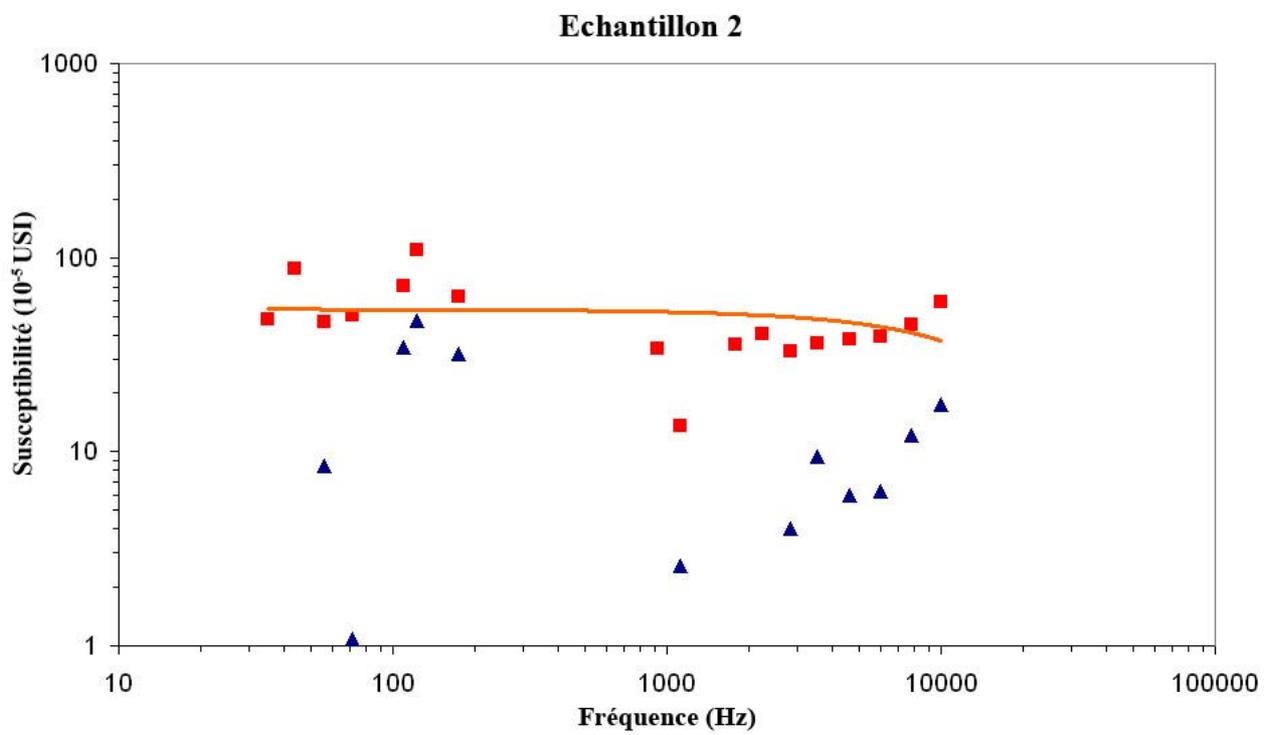
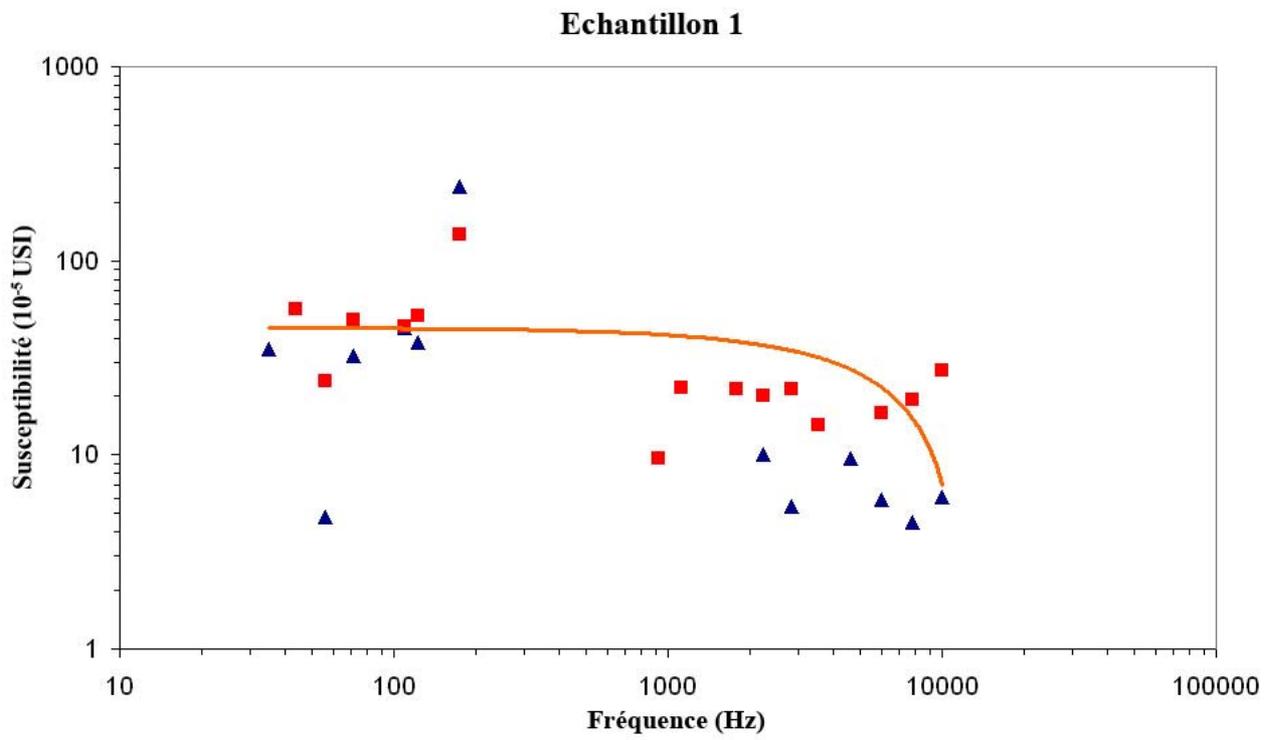
Les analyses thermomagnétiques et les cycles d'hystérésis ne nous ont pas permis de mettre en évidence des différences majeures d'un point de vue minéralogique entre les échantillons de Montfarville et de Cerisy-la-Forêt : le principal porteur de l'aimantation de nos échantillons semble être de la magnétite caractérisée par des grains pseudo-monodomaines. Il est cependant probable que les quelques différences dans les courbes des échantillons appartenant respectivement à l'un ou l'autre des deux sites soient liées à des transformations minéralogiques apparues lors de la chauffe du rempart de Cerisy-la-Forêt, par rapport à ceux de Montfarville non préalablement chauffés (cf. 2.4).

Les mesures de susceptibilités magnétiques en domaine fréquentiel mettent en valeur l'augmentation de la susceptibilité pour les échantillons chauffés (Cerisy-la-Forêt) par rapport au sol « naturel » (Montfarville), lorsque l'on considère la composante en phase (qui est rappelons-le la composante principale). Ce résultat rejoint les études antérieures [1] et nous observons à nouveau l'influence du chauffage par l'homme, avec un coefficient multiplicateur moyen égal à 6.

Cependant, cette expérience montre très vite ses limites lorsque l'on considère la composante en quadrature, de part la forte dispersion observée et les nombreuses valeurs négatives calculées : étant donné qu'elle est la composante la plus faible puisqu'elle correspond au retard de l'aimantation (cf. figure 3.4), elle nécessite des appareils sensibles et les moins perturbés possible afin d'être mesurable sans être noyée par un quelconque bruit extérieur. Malheureusement et malgré nos efforts, il apparaît ici clairement que notre espace de travail était bien trop perturbé. Étant donné la différence de nos résultats avec ceux obtenus par M. Dabas [6] concernant des sols métallurgiques, il est difficile d'établir une corrélation entre les échantillons que nous avons prélevés à Cerisy-la-Forêt et un sol métallurgique, et de considérer les mêmes processus d'augmentation de la susceptibilité.

L'hypothèse qui avait été faite, à savoir de dire que le sol de Montfarville constituait un sol « naturel » type de la région et aussi le matériau utilisé pour bâtir le rempart de Cerisy-la-Forêt, s'avère tout compte fait peu viable de part tous ces résultats ; une quantification sérieuse de l'impact de la chauffe du rempart à Cerisy-la-Forêt ne pourra réellement s'effectuer que lorsque la

provenance des matériaux qui constituent ce rempart aura été déterminée avec exactitude.



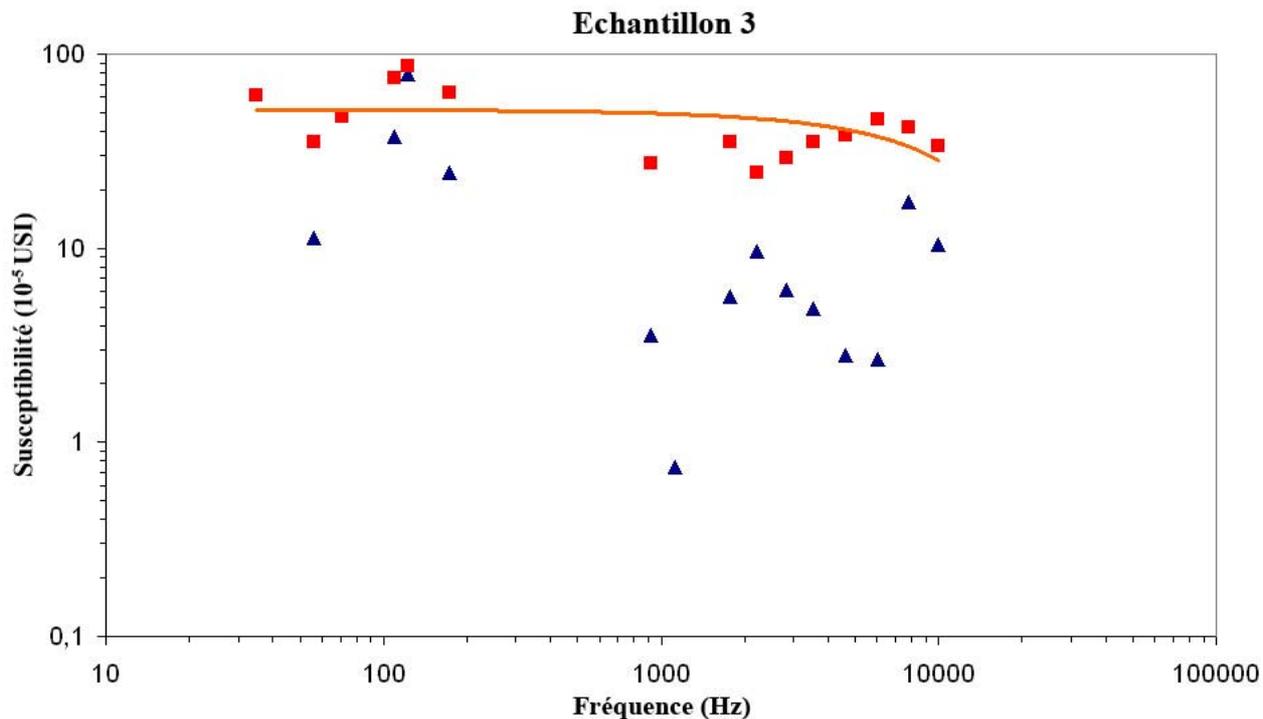
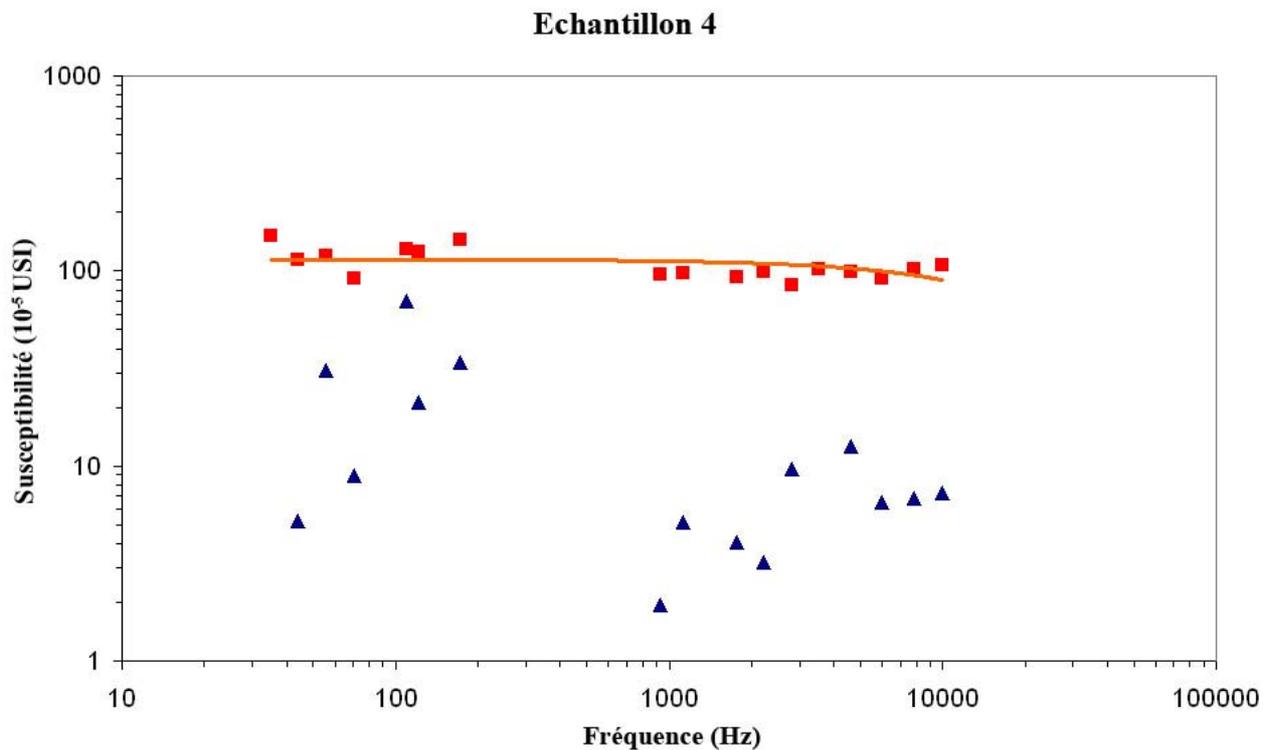


Fig. 4.4.a : Composantes en phase (en rouge) et en quadrature (en bleu) de la susceptibilité magnétique en fonction de la fréquence pour les échantillons de Montfarville. Les axes sont en échelle logarithmique et la courbe orange est la régression linéaire de K_p .



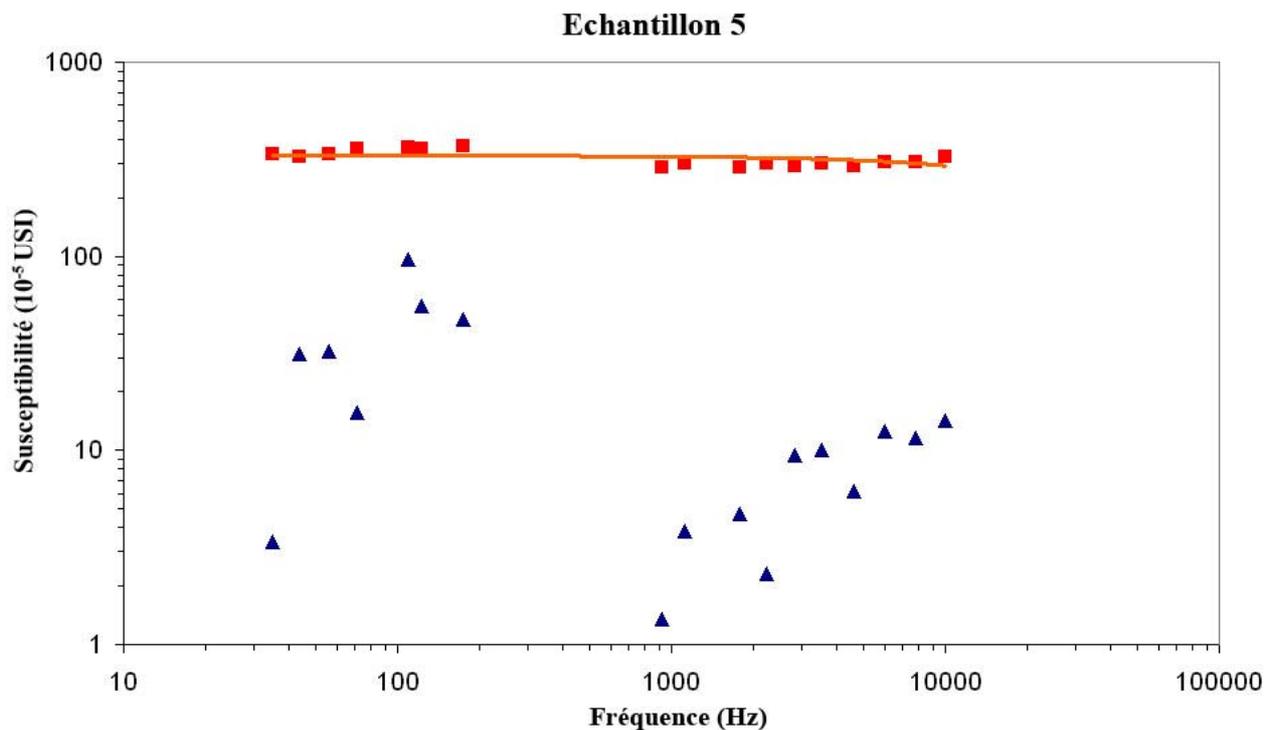


Fig. 4.4.b : Composantes en phase (en rouge) et en quadrature (en bleu) de la susceptibilité magnétique en fonction de la fréquence pour les échantillons de Cerisy-la-Forêt. Les axes sont en échelle logarithmique et la courbe orange est la régression linéaire de K_p .

Conclusion

Notre but était de mettre en évidence les éventuels effets de l'anthropisation sur les propriétés magnétiques d'un sol. Pour cela nous disposions d'échantillons de sols provenant de deux sites archéologiques situés en Basse-Normandie : le site de Cerisy-la-Forêt pour lequel nous avons échantillonné sur un rempart d'âge indéterminé et préalablement chauffé par l'homme, ainsi que le site de Montfarville pour lequel nous avons prélevé des échantillons considérés comme du sol « naturel », donc non anthropisé, de la région étudiée.

Leur comparaison, après des mesures thermomagnétiques, de cycle d'hystérésis et de susceptibilité, en laboratoire, n'a mis en valeur qu'une forte augmentation de la susceptibilité magnétique du sol anthropisé par rapport au sol ordinaire. Ce résultat rejoint de nombreuses études faites par le passé mais ne nous permet malheureusement pas de pousser plus avant l'explication du phénomène.

Les sites étudiés n'en demeurent pas moins intéressants pour les géophysiciens car de nombreuses hypothèses avaient été posées et se sont révélées peu judicieuses, et le rempart de Cerisy-la-Forêt reste encore peu connu. En effet, il est à l'heure actuelle difficile de définir concrètement la nature et l'origine des échantillons issus de cette structure : doit-on y voir des témoins d'un rempart vitrifié, de résidus de métallurgie, ou bien encore des deux en même temps ? S'il s'avère que nous nous trouvons dans le dernier cas, laquelle de ces deux possibilités influence-t-elle majoritairement les propriétés magnétiques du sol ?

La comparaison de ce site avec des sites métallurgiques reconnus pourrait donc être également utile tout comme la reconduction de la présente étude mais en considérant les points suivants : un échantillonnage plus important et sur une plus grande surface du site de Cerisy-la-Forêt, une étude préliminaire permettant de connaître la nature exacte et la provenance géographique du matériau composant le rempart, et enfin des mesures de la susceptibilité dans un environnement amagnétique et exempt de toute perturbation extérieure.

Bibliographie

- [1] E. Le Borgne, *Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite*, Annales de Géophysique, Tome 16, No 2, 159-195, 1960.
- [2] E. Le Borgne, *Les propriétés magnétiques du sol. Application à la prospection de sites archéologiques*, Archaeophysika, 1, 25-36, 1965.
- [3] M. S. Tite and C. Mullins, *Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites*, Archaeometry, 13, 2, 209-219, 1971.
- [4] A. Jrad, *Application des méthodes géophysiques à l'exploration de sites archéologiques ayant livré des dépôts de l'Age du Bronze. Site de Montfarville (Basse-Normandie)*, Mémoire de Master en Archéologie et Environnement, Universités Paris I et Paris VI, 2006.
- [5] R. Thompson and F. Oldfield, *Environmental Magnetism*, Allen & Unwin, 1986.
- [6] M. Dabas, *Comportement magnétique des sols dans les domaines fréquentiel et temporel (ARV). Application à la prospection de sites archéologiques*, Thèse de doctorat, Université Paris VI, 1989.
- [7] E. Marmet, M. Bina, N. Fedoroff 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.

Annexe 1

**Caractéristiques du site de Montfarville
avec des exemples des haches à douille
qui y ont été découvertes au cours des années 90
(extrait des fiches d'inventaire de
Laurence Jeanne et Caroline Duclos)**

Nature de l'opération : Prospection inventaire - enquête orale

Commune : Montfarville

Lieu dit : La Houe

Coordonnées : Abscisse : 341 120 Ordonnée : 1 222 860

Cadastre : AH 158 à 175 (fragments en bronze non idéterminés)
AH 105 à 111 (27 fragments de haches à douille)

Type de découverte : Prospection (détecteur de métaux)

Année de découverte : Années 1990

Inventeur : Jean Claude Chatel

Chronologie : Age du Bronze/1er Age du Fer

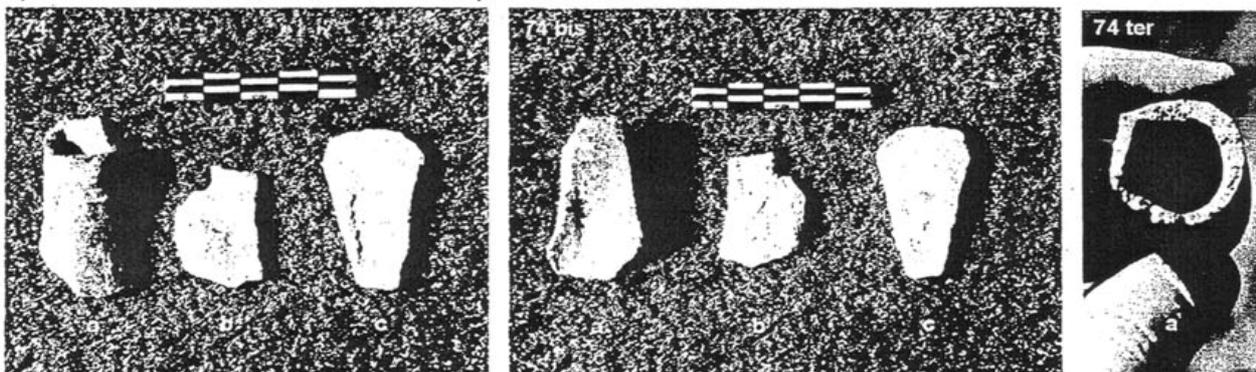
Description : Fragments d'objets indéterminés en Bronze (**fig. 74-74 ter**) et dépôt incomplet constitué actuellement de 27 fragments de haches à douille armoricaines (**fig. 97a-105e**), dont une de type Tréhou (**fig. 79a-79f**).

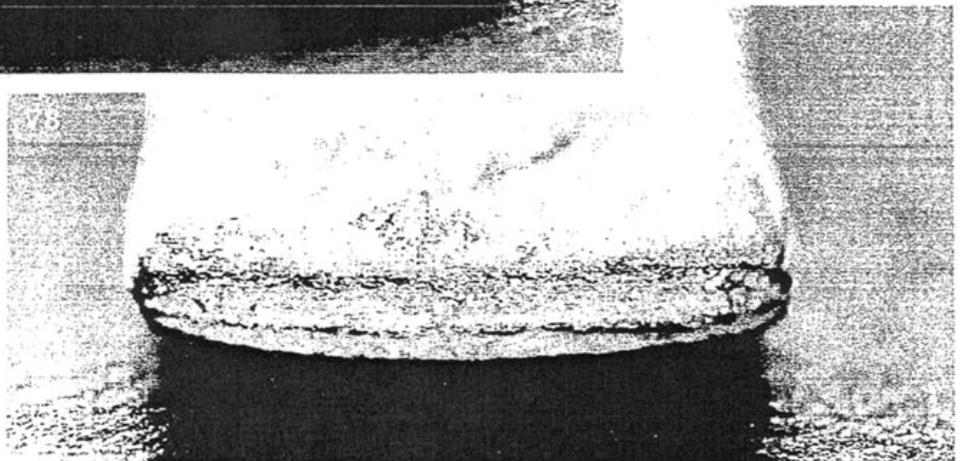
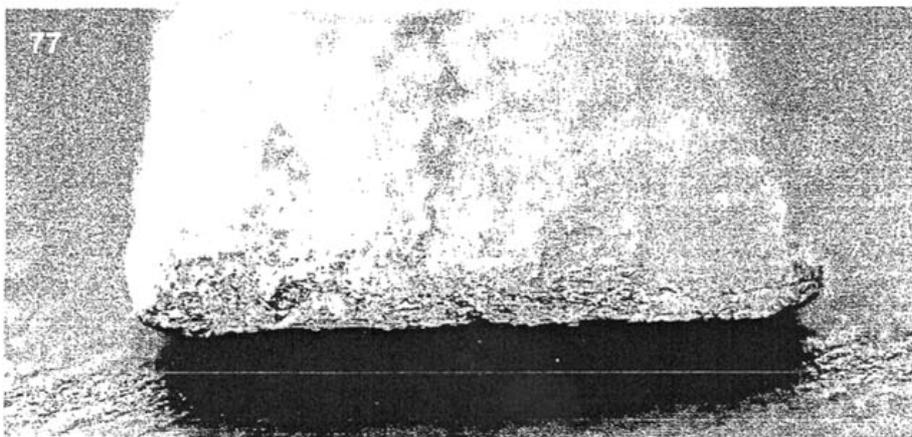
Les éléments en bronze découverts en AH 158 à 175, très fragmentés, n'ont pas été déterminés, ni datés. Ils pourraient d'ailleurs n'avoir aucun lien avec le dépôt de l'Age du Bronze. De fait, l'élément 74a pourrait faire penser à un pied de marmite en bronze (?).

Les fragments de haches à douille ont été collectés sur une superficie estimée à 250 m². Le mobilier se trouvait, d'après l'inventeur, dans la couche de terre végétale, plus précisément entre 20 et 30 cm de la surface actuelle. Une indication qui semble confirmée par le mauvais état de l'ensemble notamment révélé par des traces d'accrochages. Il semble probable que le dépôt ait été démembré par les activités liées aux labours et dispersé progressivement. Aucune concentration particulière de mobilier n'a été identifiée, ne laissant de ce fait aucun indice susceptible de mieux circonscrire le lieu d'enfouissement originel.

La série se compose de 27 éléments, dont 8 haches à douille complètes (1 à 7 et 9), 9 fragments de parties distales (11, 13, 17, 19, 20, 22 à 25), 6 fragments de parties proximales (12, 14, 16, 21, 26 et 27) et 4 haches presque privées de leurs parties proximales (8, 10, 15 et 18). A noter également la découverte de nombreux culots de bronze (déchets de fonderie). Si le tranchant de certaines haches n'a subi aucune modification postérieure à la coulée (**fig. 78**), d'autres présentent des marques d'utilisation (**fig. 77**).

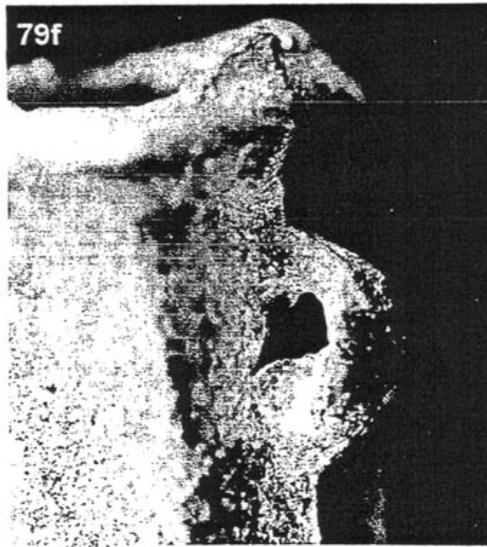
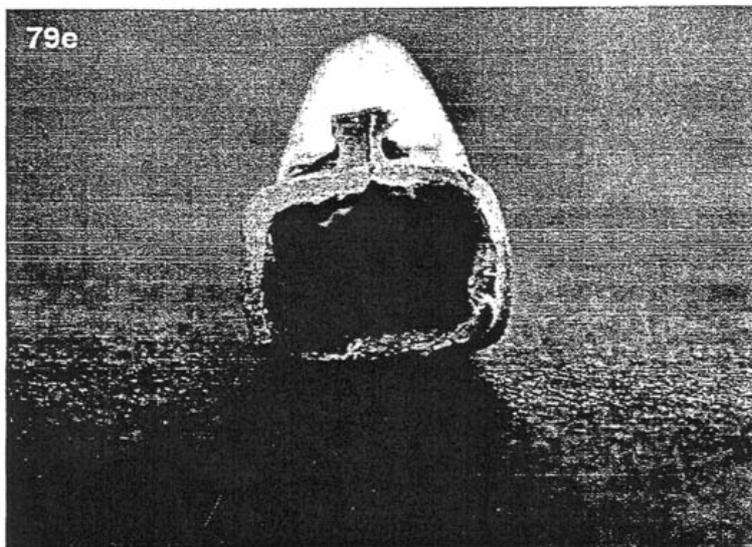
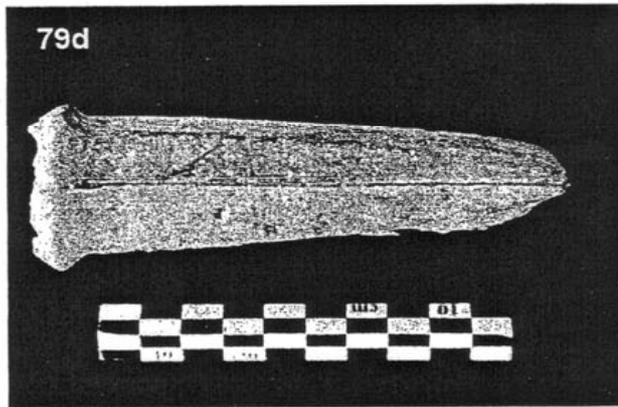
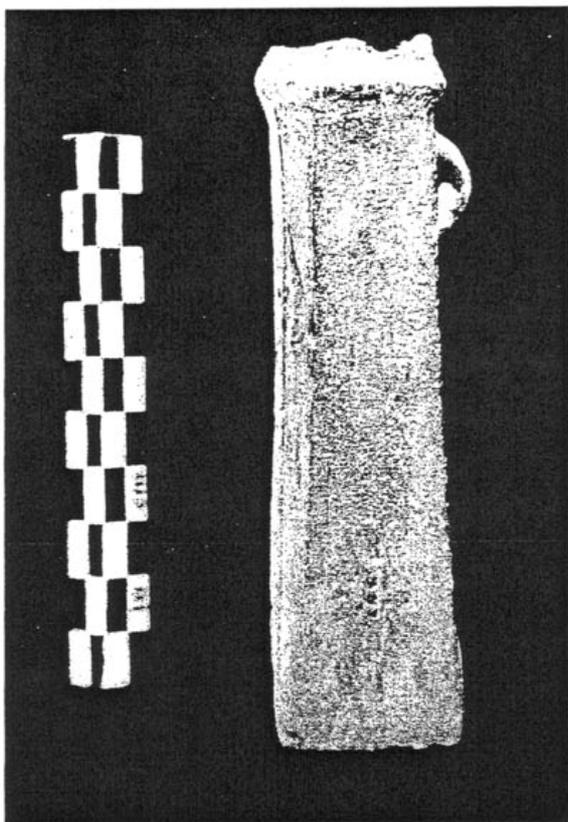
Ce lot incomplet est très représentatif des dépôts de haches à douille armoricaines du Cotentin. Il mériterait en ce sens une étude morphologique complète, accompagnée de recherches complémentaires sur le terrain (prospection électro-magnétique,...). Cette opération devrait être coordonnée par G. Verron courant 2005.





Figures 77-78 : Différents stades de mise en forme des tranchants, commune de Montfarville

— *Atlas Préhistorique de la Région de Montfarville (50 - Manche)*



Figures 79a-79f : Hache à douille (h2) de type Tréhou, commune de Montfarville.

Annexe 2

Caractéristiques du site de Cerisy-la-Forêt (extrait du compte rendu de fouilles de Jean-Dominique Vernioles)

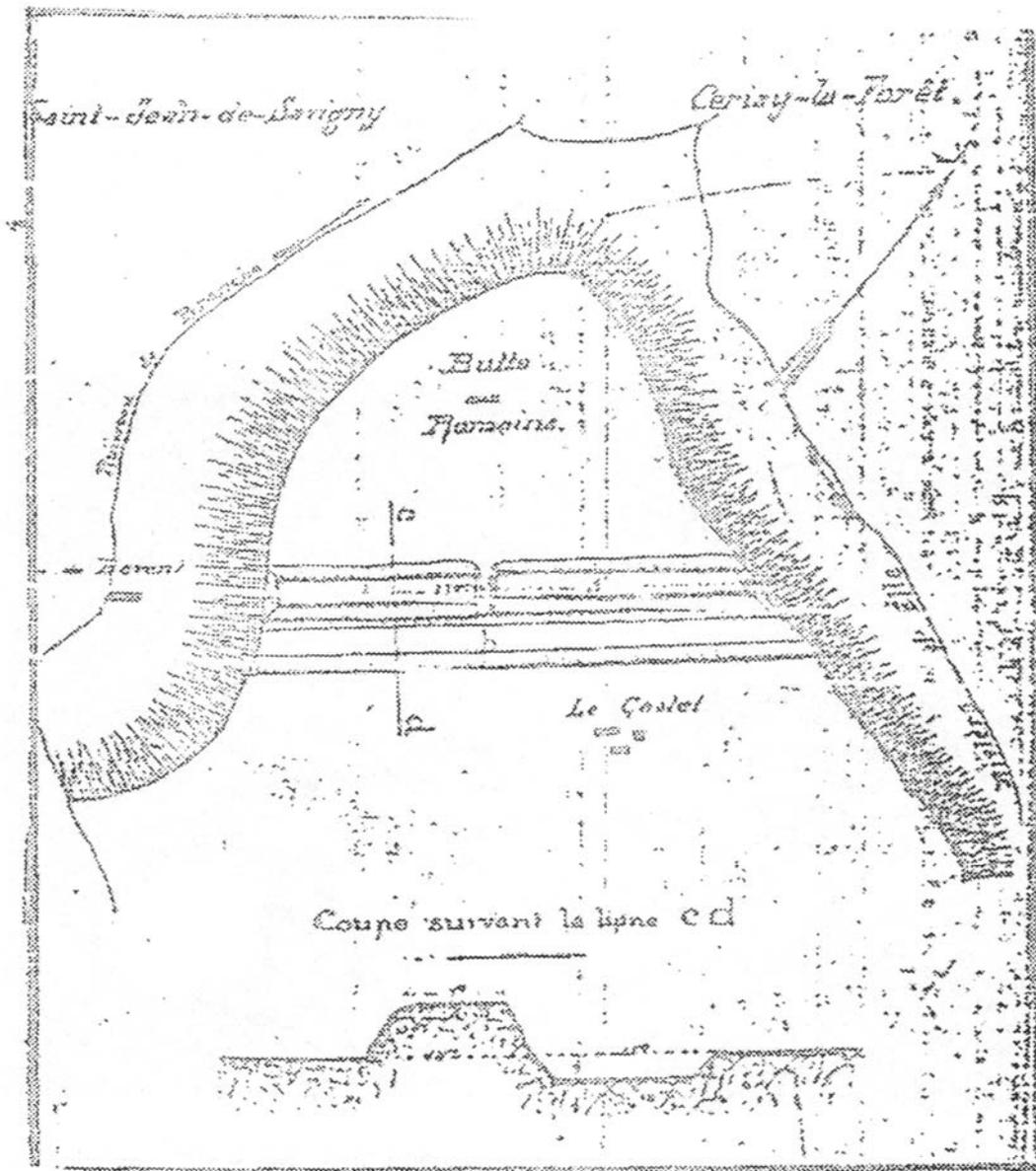
LE PROBLEME POSE

Depuis plus de deux siècles que les archéologues ont reconnu l'existence des murailles vitrifiées, et malgré plusieurs études et expériences, le processus de réalisation de ces sites reste encore ignoré. Dans le cadre d'une thèse sous l'autorité de O. Buchenschutz je cherche à faire avancer la solution de ce problème. Une des questions qui se posent est de savoir si la source de chaleur qui a entraîné la fusion de la roche était extérieure ou intérieure à la muraille.



Le rempart du site dit du « Grand Câtel » se trouve exactement sur la limite entre la commune de Saint Jean de Savigny où se développe la surface enclose de 5,5 ha et la commune de Cerisy la Forêt où il porte le nom de « Butte des Romains ».

Ce site semble n'avoir fait, à ce jour l'objet d'aucune étude si l'on excepte deux courtes mentions dans la « notice, mémoires et documents » de la Société d'Archéologie de la Manche Tome 13, 1895. Aucune fouille n'y a été effectuée, cependant sa nature vitrifiée est bien signalée dans les diverses publications qui traitent du sujet.



Ce document de la fin du XIX^e siècle est manifestement inexact! Tant en ce qui concerne l'orientation que le plan et la coupe.

Un autre problème en suspens est celui de la datation des vitrifications françaises en particulier, et, de façon plus générale, continentales si on les compare à celles d'Ecosse. Le site du Grand Câtel peut aider à trancher la question.

Au delà de cette limite, non seulement on rencontre de nombreux blocs rocheux qui font penser à un changement de structure de la muraille, mais on recueille à la partie supérieure du talus un nombre important d'échantillons vitrifiés (photo page précédente). Cette zone sommitale, qui n'est pas le point le plus élevé de la fortification, concentre des échantillons vitrifiés de taille relativement réduite (celle d'un poing). Un décapage de ces 2 à 3 mètres carrés devrait permettre de déterminer si ces échantillons se trouvent sur place, ou si ils se sont éboulés de la partie supérieure située plus au sud.

Enfin, la zone la plus interne montre des blocs décimétriques qui semblent s'ordonner en parement.



Il semblerait, si ce changement de structure se confirmait, que la construction du rempart actuel se soit donc faite en trois phases:

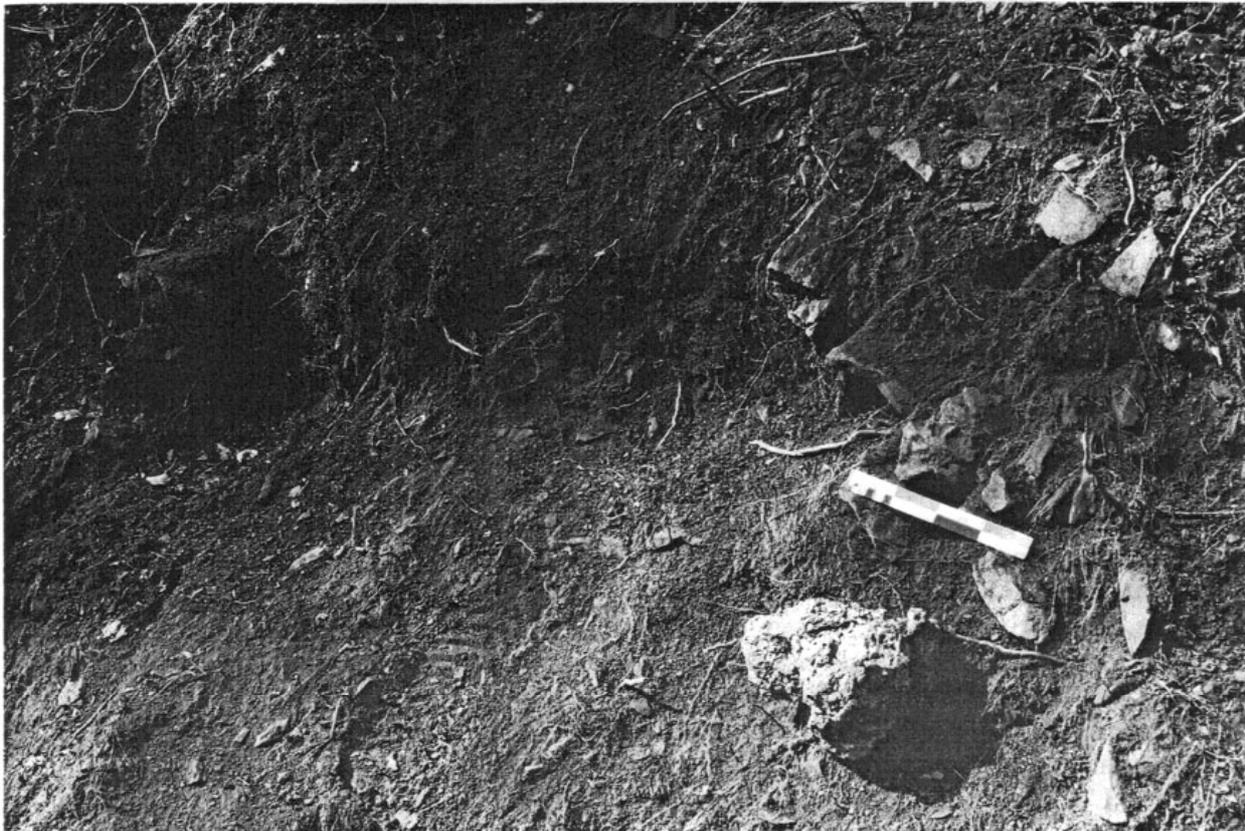
1°) L'élaboration d'un rempart en pierre muni d'une entrée principale centrale dont le voisinage aurait été vitrifié.

2°) Le doublement de ce premier rempart par un second extérieur en terre. La question est de savoir si ce doublement s'est effectué en épaisseur ou en hauteur. Dans cette seconde hypothèse, la terre qui se trouverait à l'extérieur proviendrait de l'éboulement du sommet de la muraille. Ceci expliquerait la présence à proximité du chablis d'importants restes de fils de fer barbelés qui se seraient éboulés avec la terre sommitale lors de l'élargissement de l'accès initial voici plus d'une vingtaine d'année par le propriétaire des lieux. Seul un décapage plus ou moins partiel de la partie haute du rempart permettra de trancher.

3°) Un renforcement important de la défense avec creusement d'un important fossé sec et rehaussement de la fortification en terre soigneusement compactée. On aurait dû aboutir à une fortification de type Fécamp. Le travail n'a pas été achevé pour une raison actuellement en suspens.

La vitrification semble contemporaine du premier stade, mais la situation de la source de chaleur n'est toujours pas précisée.

En décapant, superficiellement dans un premier temps, de la pierraille n'a été rencontrée qu'en progressant vers l'intérieur du site, vers l'est. La limite entre la zone terreuse et la zone constituée de blocs rocheux se situe approximativement après un chablis dont l'enlèvement n'a permis de dégager que de la terre.



A gauche, on voit le chablis avant enlèvement. A noter, sous l'échelle, un bloc vitrifié. C'est sous cette échelle que fut mis à jour un paquet de fils de fer barbelés »





Vue du fond du grand fossé: on devine à droite le grand talus (la. photo date de 1994)

Il est donc évident qu'à une période restant à déterminer, le site a connu une dernière réoccupation, ou tout du moins une tentative, qui a avorté. Il reste à savoir si un début de creusement de fossé a été amorcé le long du reste du rempart. Ce sera l'objet d'une prospection électrique lors de la campagne de l'été 2006.

Le décapage de la bordure sud du passage entre les deux champs a été commencé par la partie externe. On pouvait penser, au vu de quelques blocs apparaissant dans le talus nord, rencontrer un parement. Si la fouille n'a pas débuté en ce point, c'est que s'y élève un gros arbre qu'il n'était pas question d'abattre dans le cadre de ce petit sondage.

D'emblée, on s'est trouvé dans un amas de terre, dépourvu de tout cailloux, si l'on excepte ceux, de petite taille qui avaient roulé depuis un point plus élevé du rempart. De rares échantillons étaient vitrifiés. L'origine et le volume exact de cette terre restent à déterminer.



Extrémité externe: les rares cailloux visibles ont glissé depuis le haut du rempart.

LES RAISONS DU CHOIX DU SITE

Outre cette virginité archéologique le site du Grand Câtel présentait l'avantage d'avoir son rempart ouvert par deux tranchées de circulation déjà anciennes. Le « rafraîchissements » de ces coupes devait faciliter mon travail de sondage.

Il est remarquable de constater que les vitrifications ne se retrouvent qu'à hauteur du passage le plus central. Il existe 43 sites vitrifiés recensés dont 42 reconnus en France. Sur **tous**, la zone vitrifiée se situe à l'emplacement le plus vulnérable de la muraille, généralement autour de la porte d'accès. Cette constatation doit amener à postuler que la porte initiale se trouvait à cet endroit. Cependant, cet accès a été élargi, voici plus d'une vingtaine d'années par le propriétaire des lieux, ainsi qu'il l'a confirmé personnellement.



L'accès vu de l'intérieur, vers le sud, avant le sondage

Une prospection de surface rapide n'a pas permis de recueillir de mobilier, malgré une étendue relativement importante pour un site vitrifié. Le Grand Câtel ne ferait pas exception. De nombreuses petites enceintes vitrifiées n'ont pas ou peu livré de mobilier. Il faudra donc envisager de procéder à des datations par thermoluminescence. Le site, peu perturbé par l'agriculture du fait de sa situation de limite communale, s'y prête remarquablement bien.

OBSERVATIONS

Le travail sur le site n'a pu être effectué que pendant quatre jours du 19 au 23 mai 2005. Pendant ce court laps de temps, et malgré l'aide de F. Delrieux, même le rafraîchissement de la coupe a été incomplet. Toutefois, un certain nombre d'observations ont pu être faites:

On constate au nord de l'actuel chemin d'accès que le rempart est beaucoup plus élevé que sur le reste de la fortification. De plus, cette portion renforcée de la défense est bordée par un fossé sec. Ce fossé se poursuit sur une demi douzaine de mètres au sud du chemin d'accès qui le barre en le franchissant. La zone sud ainsi isolée constitue une petite mare.

Annexe 3

Caractéristiques des bobines utilisées dans les deux systèmes

1. Valeurs obtenues par Mounir Trigui (1987)

Systeme « basses fréquences »

Bobine primaire

	Résistance (Ω)	Inductance totale (mH)	Capacité répartie (nF)	Fréquence de résonance (KHz)	Constante électro- dynamique U.S.I. 10^{-3}
Calculé	46,16	≈ 153.8	≈ 19.2	2.9	2.0655
Mesuré	45,66	164.9	21.1	2.7	2.0358
$\frac{\text{Mes} - \text{Cal}}{\text{Cal}}$	1.1 %	7.2 %	9.0 %	6.9 %	1.4 %

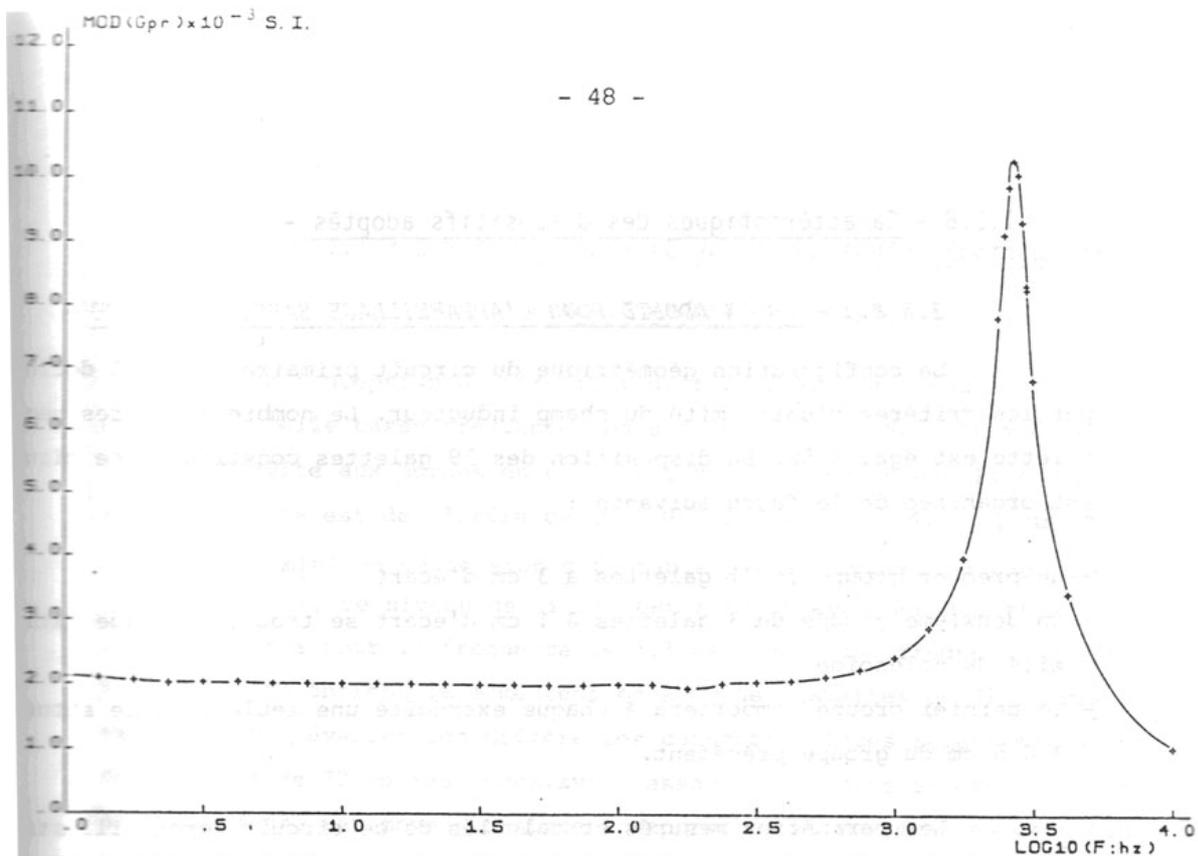
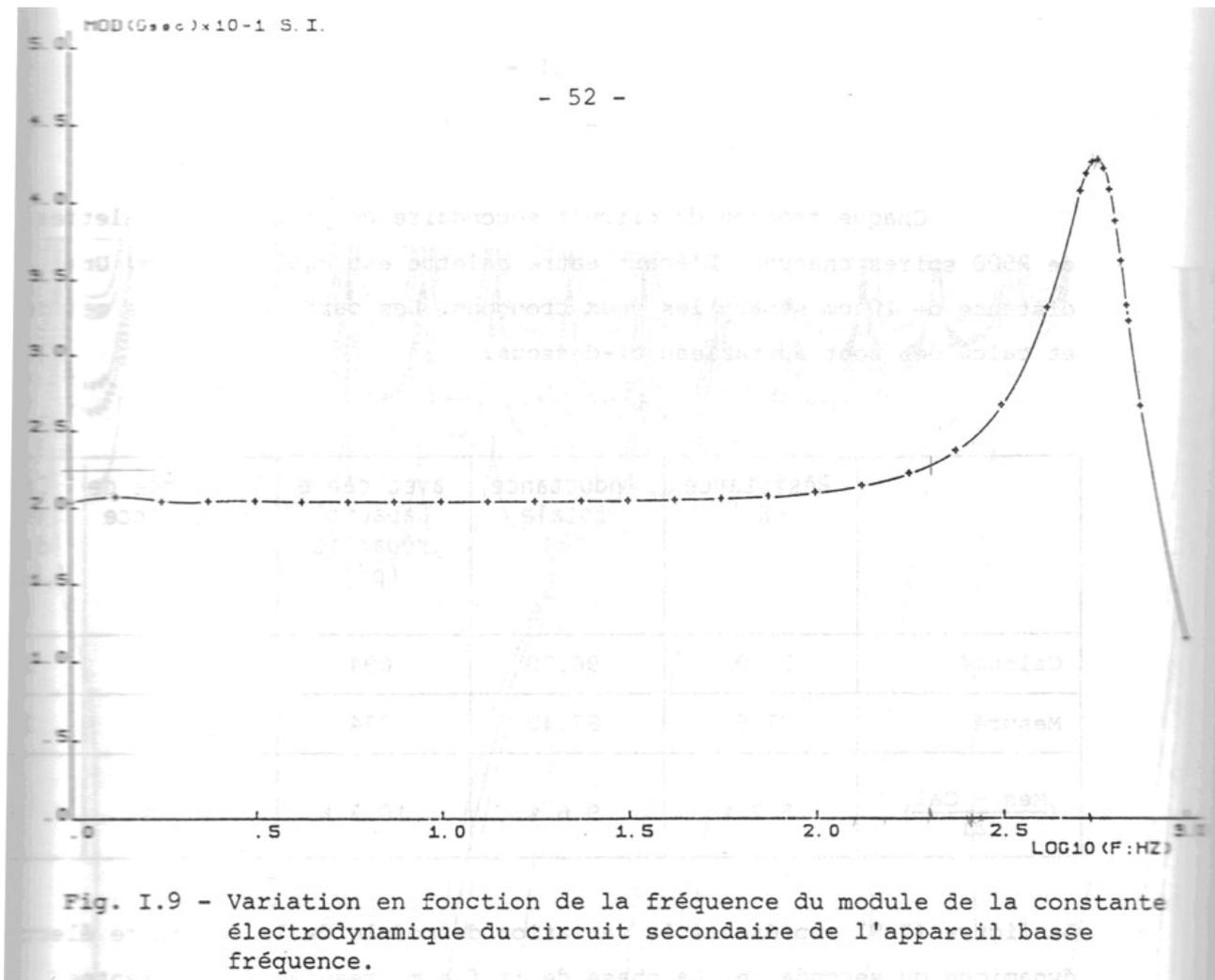


Fig. I.5 - Variation en fonction de la fréquence du module de la constante électrodynamique du circuit primaire de l'appareil basse fréquence

Bobine secondaire

	Résistance (K Ω)	Inductance totale (H)	avec câble Capacité répartie (pF)	Fréquence de résonance (Hz)	Constante électro- dynamique U.S.I. 10^{-1} (19 cm)
Calculé	24.9	96.70	694	582	2.1464
Mesuré	23.6	87.40	774	612	2.0551
$\frac{\text{Mes} - \text{Cal}}{\text{Cal}}$	5.2 %	9.6 %	10.3 %	5.0 %	4.0 %



Systeme « hautes fréquences »

Bobine primaire

	Résistance (Ω)	Inductance totale (mH)	Capacité répartie (pF)	Fréquence de résonance (KHz)	Constante électrodynamique U.S.I. 10^{-4}
Calculé	72,0	24.89	854.	34	8.2610
Mesuré	74,3	29,6	890.	31	8.1109
$(\frac{\text{Mes} - \text{Cal}}{\text{Cal}})$	3.2 %	18.9 %	4.0 %	9.7 %	1.8 %

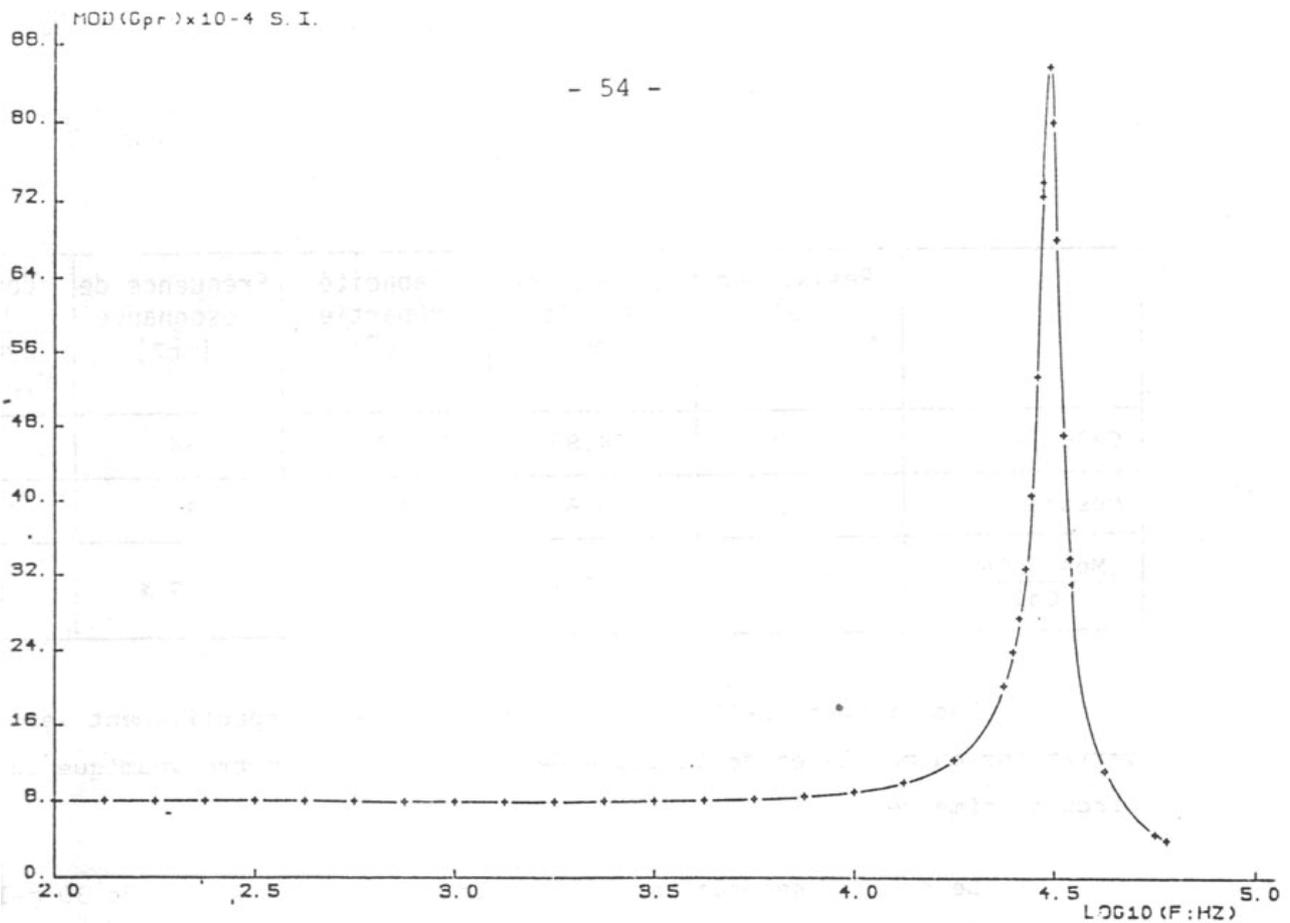


Fig. I.11 - Variation en fonction de la fréquence du module de la constante électrodynamique du circuit primaire de l'appareil haute fréquence.

Bobine secondaire

	Résistance (Ω)	Inductance totale (mH)	Capacité répartie (pF)	Fréquence de résonance (KHz)	Constante électro- dynamique U.S.I. 10^{-3}
Calculé	580,6	49.95	761	25.65	5.1282
Mesuré	575,5	48,5	772	26.00	5.0802
$(\frac{\text{Mes} - \text{Cal}}{\text{Cal}})$	0.9 %	3 %	1.4 %	1.3 %	0.9 %

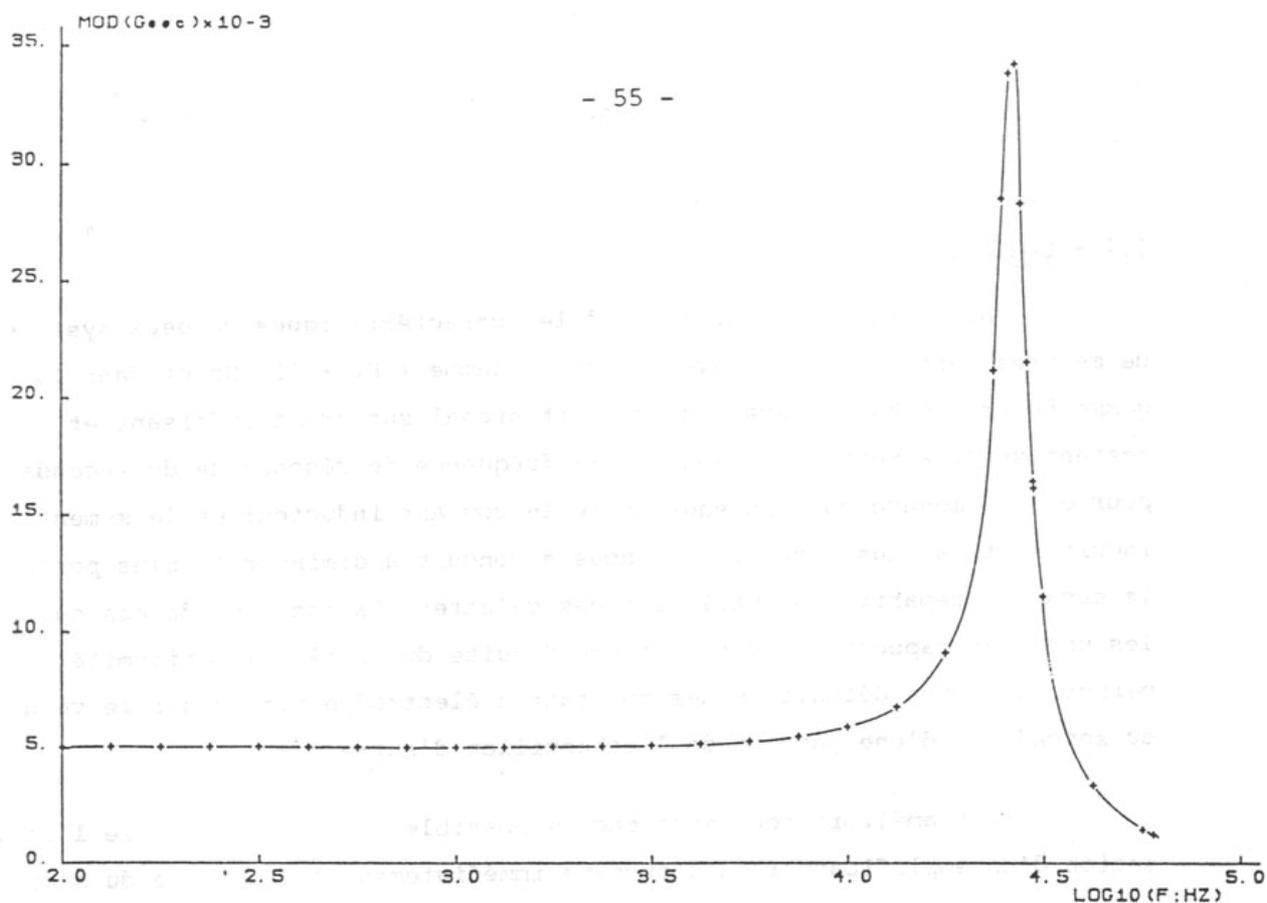


Fig. I.13 - Variation en fonction de la fréquence du module de la constante électrodynamique du circuit secondaire de l'appareil haute fréquence.

2. Nouveau calcul des constantes électrodynamiques

Le calcul expérimental des constantes électrodynamiques est le suivant [6] :

Lorsqu'un courant $I = \frac{ep}{R}$ parcourt la primaire, nous mesurons e_{bob} induite dans une petite bobine étalon de surface S et constitué de n spires. On a :

$$e_{bob} = - \frac{d\phi}{dt} \text{ et } \Phi = G_p M$$

Le moment M de la bobine étalon est :

$$M = n S I = \frac{n S e p}{R} \text{ (avec } \mu_0 = 1 \text{ en cgs)}$$

Le courant varie en $e^{j\omega t}$ donc le moment induit également :

$$e_{bob} = - \frac{d(G_p M)}{dt} = - \frac{j \omega G_p n S e p}{R}$$

soit:

$$G_p = - \left(\frac{1}{j \omega} \right) \left(\frac{R}{n S} \right) \left(\frac{e_{bob}}{e p} \right)$$

Le calcul est identique pour les secondaires, il suffit de remplacer G_p par G_s et e_p par e_s .

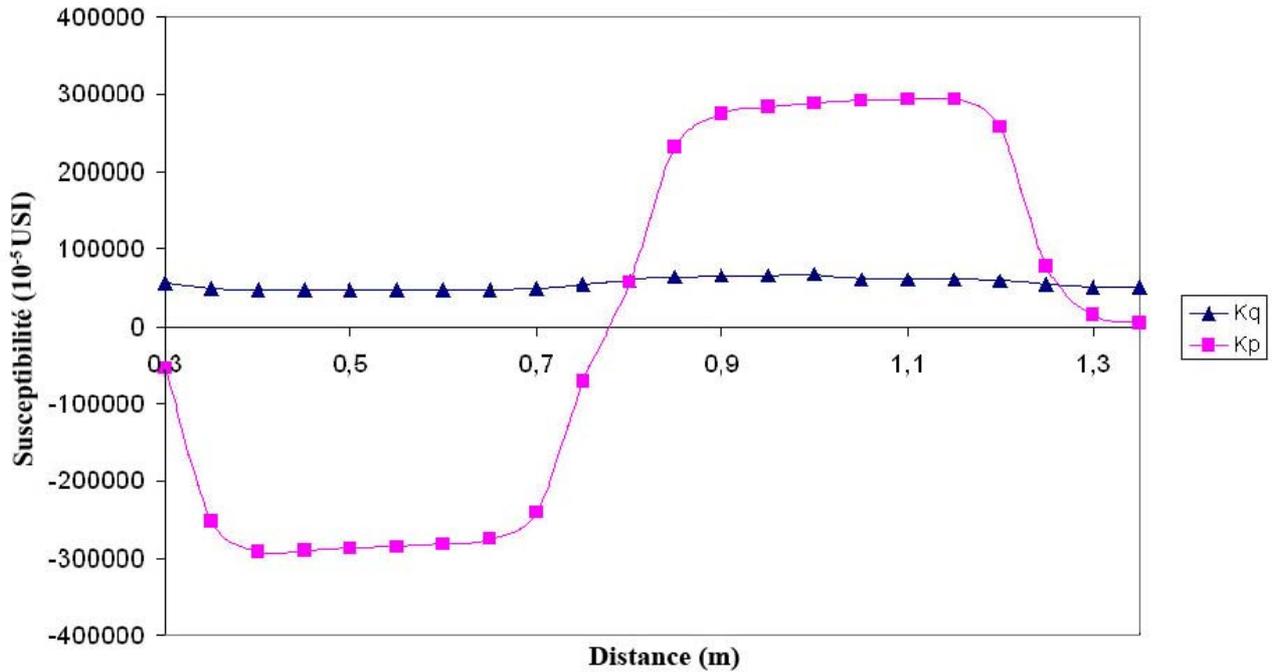
Voici nos résultats (en *USI*) :

Système « basses fréquences » : $G_p = 1,67 \times 10^{-3}$ et $G_s = 2,28 \times 10^{-1}$.
Système « hautes fréquences » : $G_p = 8,65 \times 10^{-4}$ et $G_s = 5,24 \times 10^{-3}$.

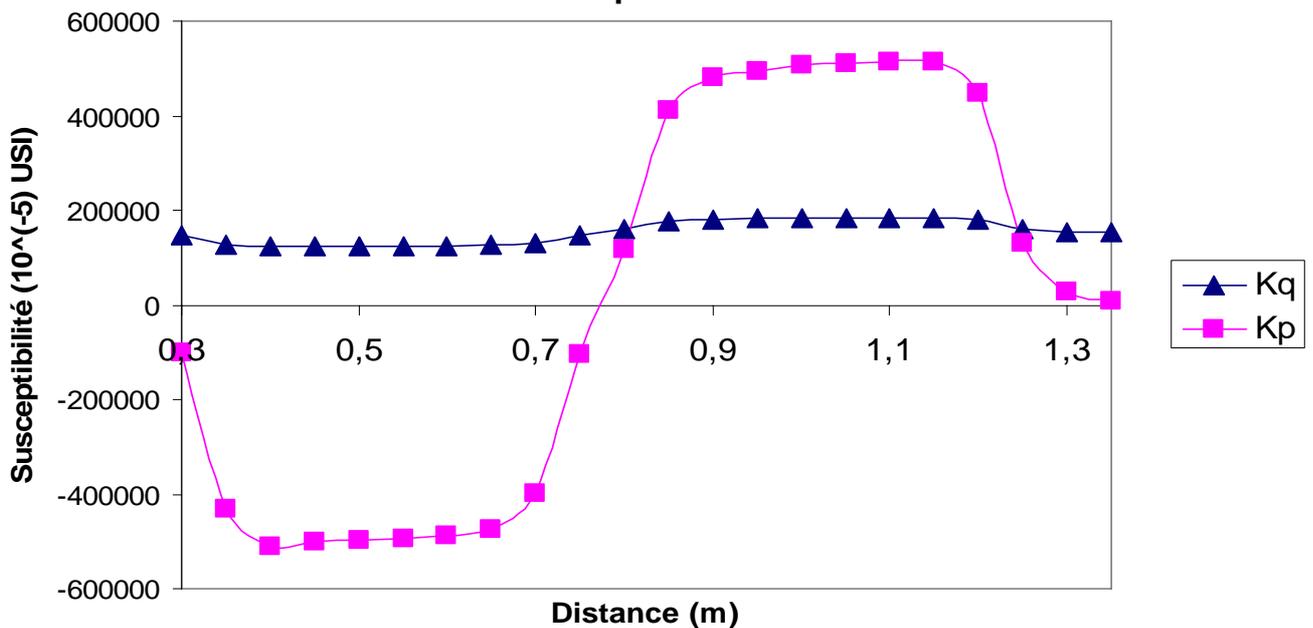
Annexe 4

Détermination des positions de signal optimal suite à l'introduction d'un tore le long des bobines

Pour une fréquence de 71 Hz



Pour une fréquence de 122Hz



Pour une fréquence de 10024 Hz

