



HAL
open science

Premiers résultats et perspectives pour l'exploration géophysique des sites métallurgiques médiévaux de Minot (Côte d'Or)

Michel Dabas, Albert Hesse, Alain Jolivet

► **To cite this version:**

Michel Dabas, Albert Hesse, Alain Jolivet. Premiers résultats et perspectives pour l'exploration géophysique des sites métallurgiques médiévaux de Minot (Côte d'Or). Méthodes pluridisciplinaires d'étude scientifique des sites et des vestiges archéologiques, CTHS, pp.129-144, 1989, Actes du 112ième Congrès National des Sociétés savantes, Lyon 1987, GMPCA. hal-02926448

HAL Id: hal-02926448

<https://hal.science/hal-02926448>

Submitted on 31 Aug 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PREMIERS RÉSULTATS ET PERSPECTIVES POUR L'EXPLORATION GÉOPHYSIQUE DES SITES MÉTALLURGIQUES MÉDIÉVAUX DE MINOT (Côte-d'Or)

par Michel DABAS *, Albert HESSE, Alain JOLIVET

Résumé

Les sites d'atelier métallurgique se présentent souvent sous l'aspect de "ferriers", amas de déchets et de scories dont la configuration topographique en élévation sur le sol environnant permet en général d'apprécier approximativement leur importance et leur limite. Il n'en est plus de même dès lors que ces "ferriers" ont une élévation négligeable ou nulle qui ne les identifie pas clairement dans la configuration topographique environnante.

Dans ce cas la prospection géophysique trouve tout son intérêt et deux expériences d'étendue assez importante (chacune de l'ordre d'un hectare) ont été conduites sur les ateliers du Brévon et du Velbret à Minot (Côte-d'Or) pour évaluer ces possibilités. Les cartes électromagnétiques (EM 15 Geonics et SH3 C.R.G. Garchy), établies sur une large maille (50 m²), permettent d'apprécier l'extension des matériaux de forte susceptibilité magnétique issus de l'élaboration du métal. Les cartes électriques, réalisées en maille fine (1 m²) à l'aide de l'équipement RATEAU, récemment mis au point au laboratoire, font apparaître de larges étendues de matériaux résistants (déchets métallurgiques et/ou restes de constructions) dans lesquelles peuvent être distingués des éléments de structure interne et des sous-ensembles plus ou moins isolés. Bien que l'identification finale reste à donner par des sondages archéologiques, la prospection permet une lecture schématique d'ensemble et l'amorce d'une comparaison entre les deux sites étudiés qui feront l'objet de l'exposé.

*

* *

Les recherches, conduites en collaboration avec l'Equipe d'Histoire des Mines et de la Métallurgie (C.N.R.S. - Université de Paris I) s'inscrivent dans une étude générale de la métallurgie cistercienne et de son rôle dans le développement sidérurgique européen entre le XIIe et le XIVE siècle, notamment en ce qui concerne l'application de l'énergie hydraulique à la production du fer (Benoît, Guillot, Ploquin, Fluzin, 1987).

Si l'on connaît relativement bien par une documentation abondante la production des

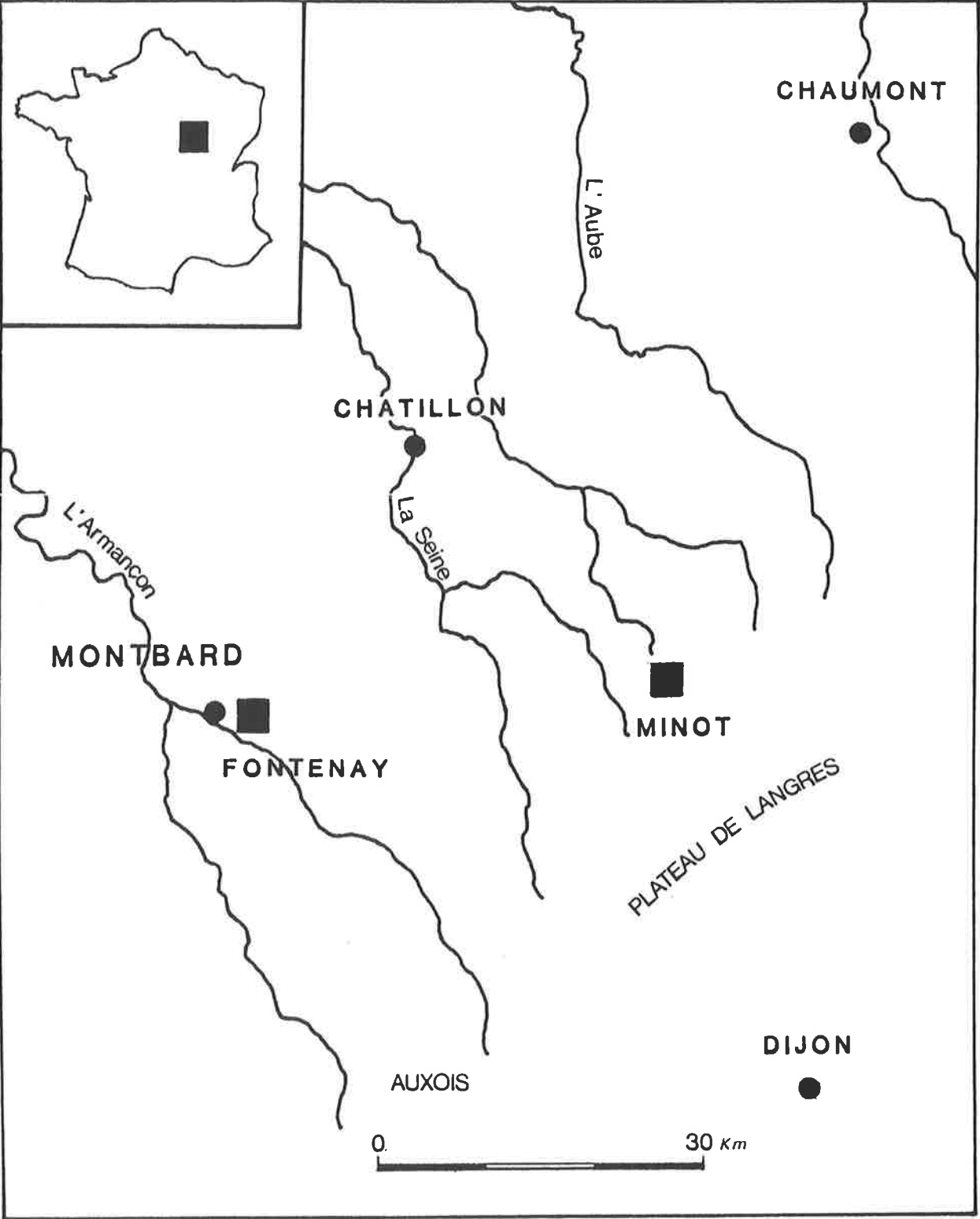
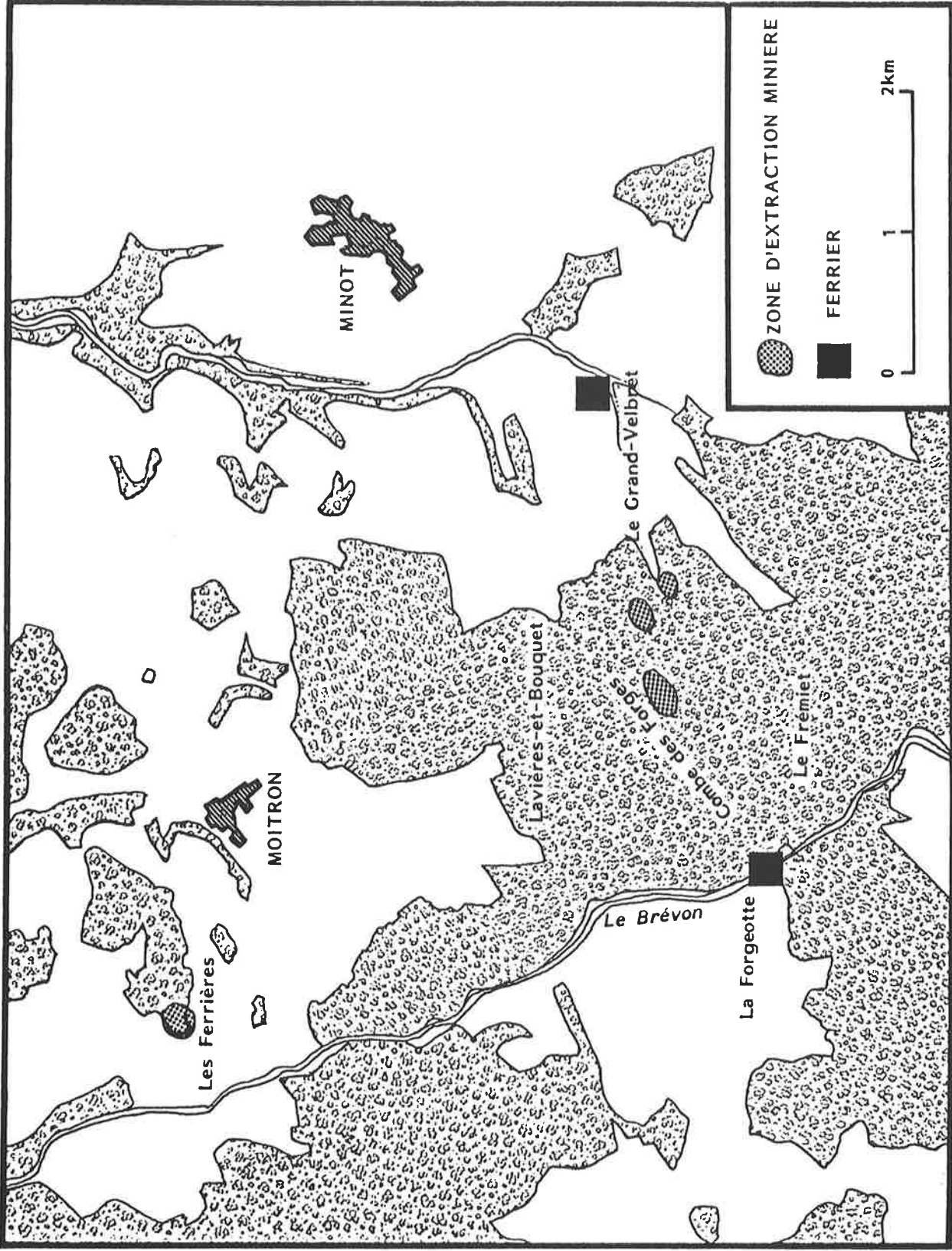


Fig. 1. — Localisation de la région étudiée (d'après Benoit *et al.*, 1987).



abbayes cisterciennes, il n'en va pas de même pour les sites de Minot dont on sait qu'ils sont, au moins en partie, la possession d'un seigneur laïc. L'intérêt de ces recherches archéologiques sur le terrain tient alors au fait qu'elles devraient permettre une comparaison entre les deux technologies mises en oeuvre et de compléter, sur le plan technique les insuffisances des textes (fig. 1).

La reconnaissance au sol, conduite par P. Benoît et son équipe, a permis de reconnaître plusieurs établissements : d'une part des sources d'extraction du fer, mines et minières (fig. 2), d'autre part dans deux petites vallées des ateliers dont la présence se traduit principalement par des ferriers étalés en nappe relativement uniforme sans formation de la butte topographique assez notable constituée par l'amoncellement des résidus (laitiers, scories, ...) qui est souvent ailleurs le fait de ces sites. Il faut d'ailleurs noter que cette faible proportion d'apparition des ferriers en nappe n'est peut-être qu'un artifice dû à ce qu'ils marquent évidemment beaucoup moins le paysage. Le site de La Forgeotte, qui nous intéressera principalement ici, ne laisse en effet apparaître ses caractères, alors très évidents, qu'à la faveur de son recoupement par la petite rivière du Brévon dans les berges de laquelle de violentes variations de couleur de l'orangé au bleu-noir en passant par des terres très brunes ou violacées ne laissent aucun doute sur la destination du site et la grande variété des matériaux présents dans le sous-sol.

Mettant en application une méthode éprouvée sur des sites de nature comparable (Hesse, Bossuet, Choquier, 1986), la première exploration a consisté à établir une carte de susceptibilité magnétique à large maille (1 point pour 50 m²) (Hesse, Tabbagh, 1981) à partir de la composante en phase du signal émis à 16 kHz du détecteur électromagnétique EM15 de Geonics : cette mesure se fonde sur le fait que non seulement les déchets métalliques mais aussi les terres associées présentent, sous l'action des feux, une considérable élévation de la valeur de cette grandeur intrinsèque des matériaux (voir annexe). On notera qu'il en est d'ailleurs de même sur les sites d'atelier de potier (Hesse *et al.*, 1982). Malgré la très faible profondeur d'investigation de l'appareil (30 à 40 cm maximum), on tire parti de ce que ces terres caractéristiques, indépendamment d'éventuelles structures qui auraient pu n'être conservées qu'au dessous de la profondeur des labours, sont le plus souvent présentes en affleurement sous la surface. L'intérêt des mesures, même si ces terres reconnaissables à leur couleur ne sont pas, comme c'était le cas ici, masquées par la végétation, est de fournir très rapidement (plus de 1 ha par jour) un relevé fiable de l'extension, des limites et des structures majeures du site.

La carte obtenue (fig. 3) représente environ 2 ha et couvre tout le fond en prairie du vallon : des bois limitent l'exploration sur toutes les bordures sauf vers le nord où les mesures ont été interrompues faute de réponses positives et d'évidence de prolongement important du site dans les sections mises au jour dans les berges du ruisseau. La carte délimite nettement le maximum d'extension des déchets de métallurgie (zone en grisé) et suggère des sous-ensembles, quelque peu imprécis dans leur répartition. Il faut aussi noter que les susceptibilités rencontrées dépassaient les capacités de lecture de l'EM15 dans sa configuration de l'époque : la saturation entraîne un écrêtage en plateau de toutes les fortes valeurs (>300 x 10⁻⁵ U_{si}/m³).

La disponibilité toute récente d'une version relativement opérationnelle du RATEAU

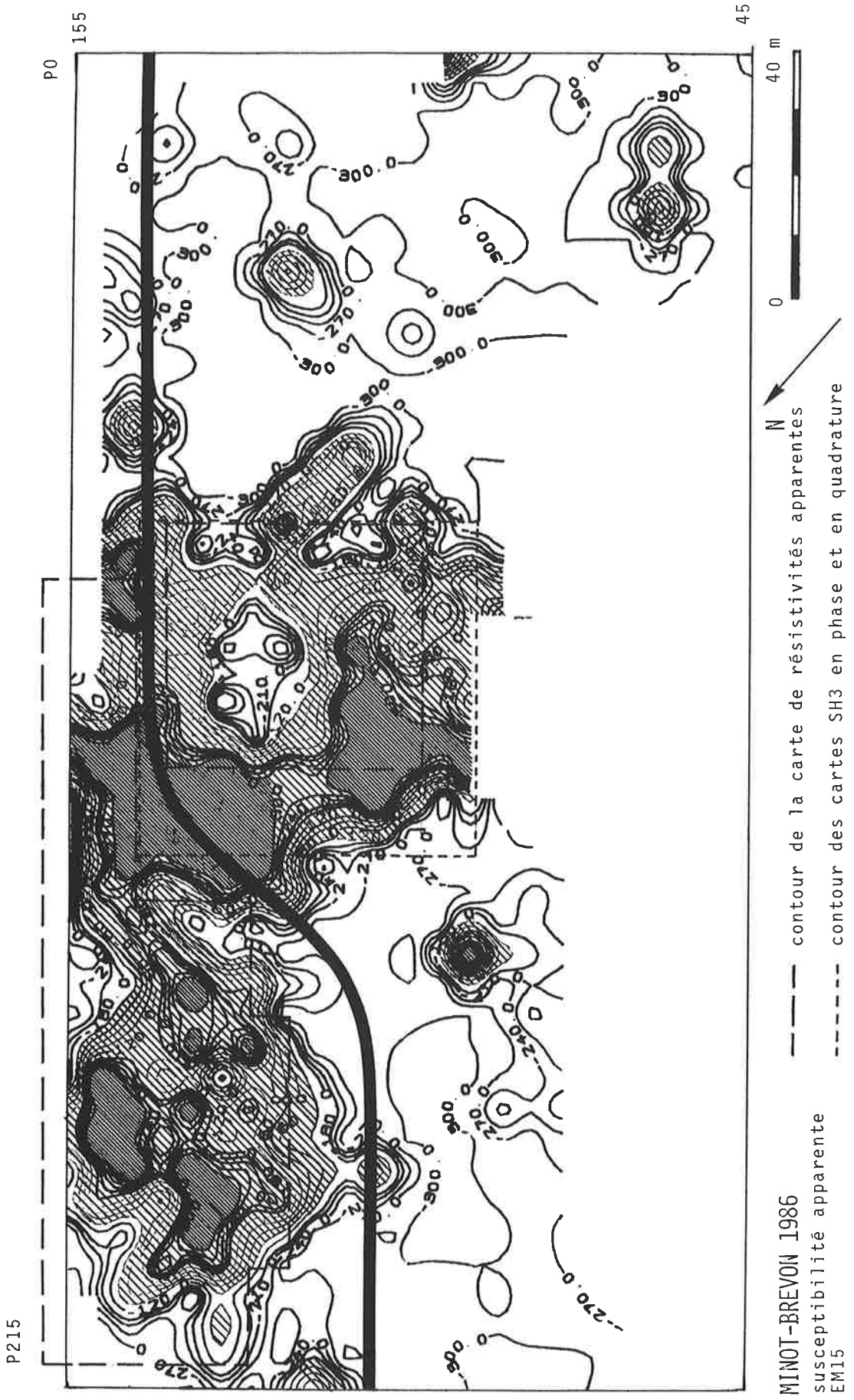


Fig. 3. — Carte de la susceptibilité magnétique apparente en surface (EM15 Geonics) sur l'ensemble du site.

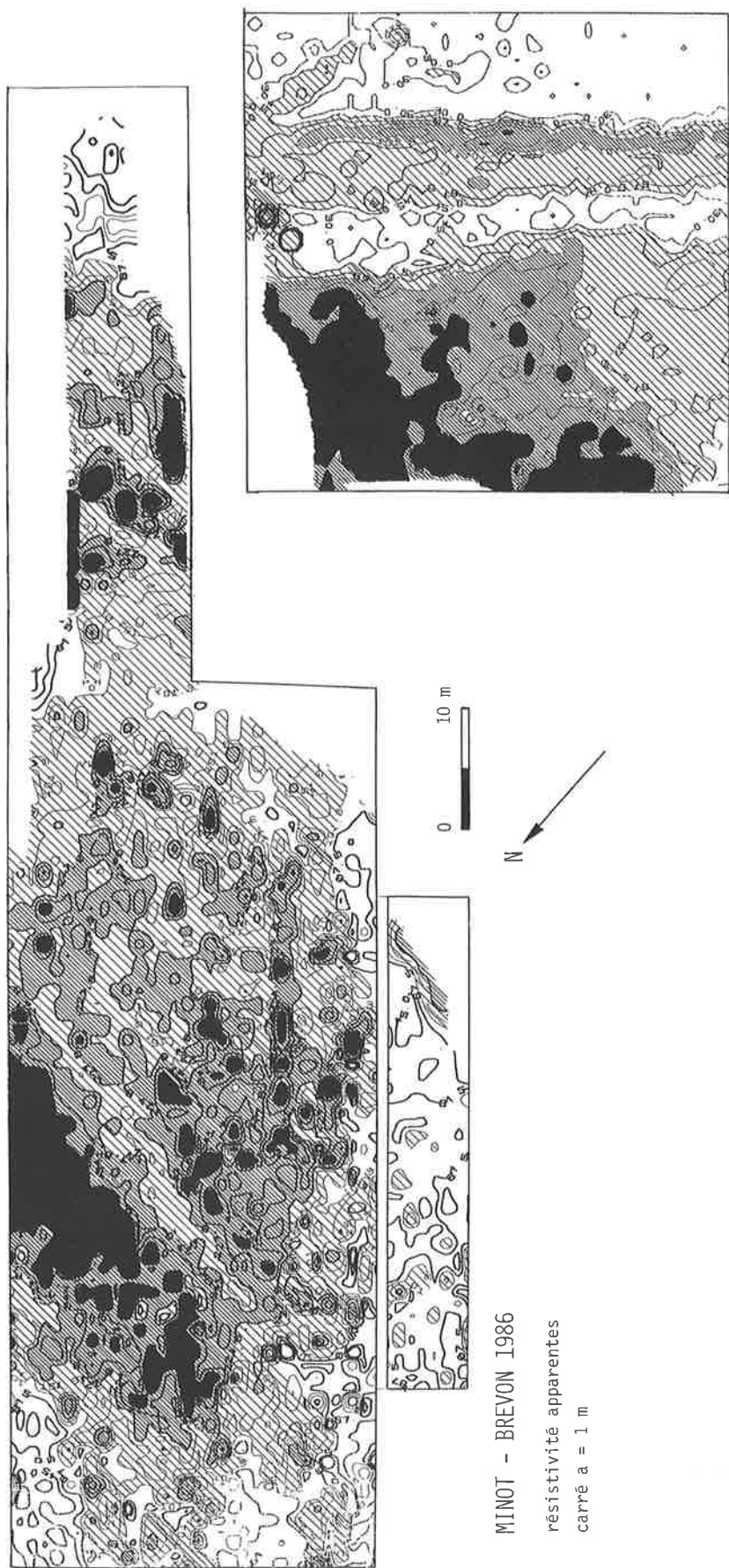


Fig. 4. — Carte de la résistivité apparente (quadripôle carré de 1 m de côté, dispositif RATEAU) sur l'ensemble du site.

P149

P120

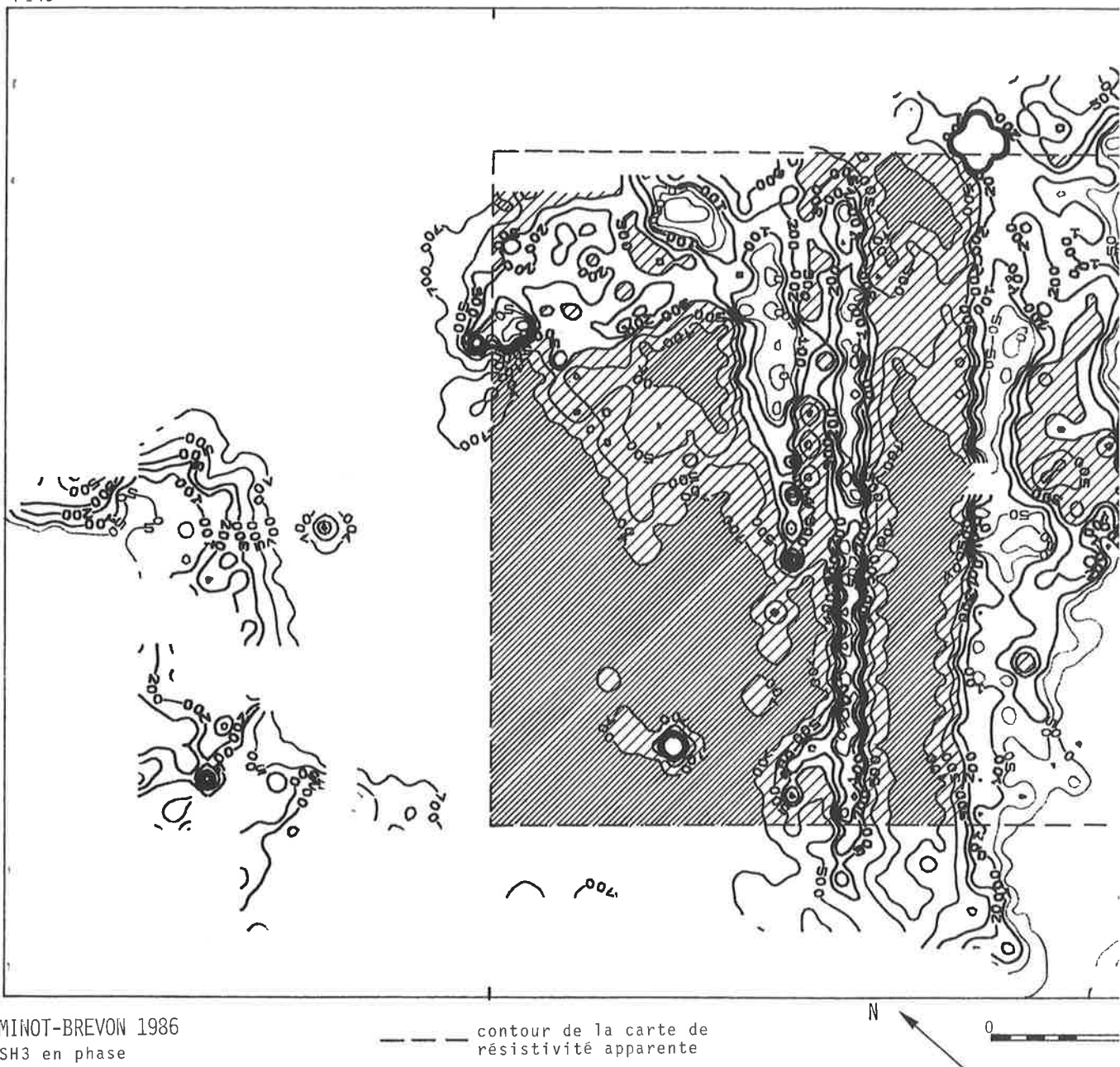


Fig. 5. — Carte de la susceptibilité magnétique apparente en profondeur (composante en phase SH3 Garchy) sur la zone sud.

(Hesse, Jolivet, Tabbagh, 1986 et Dabas, Hesse, Jolivet, 1987) (fig. 4) nous a incité à étudier la réponse en résistivité du site : s'il est vrai que l'on pouvait espérer des valeurs relativement fortes des laitiers et des scories, il n'était pas assuré cependant que les anomalies soient parfaitement lisibles et interprétables. La carte obtenue (fig. 7), en deux sous-ensembles de part et d'autre du Beuvron, couvre essentiellement la zone précédemment délimitée par l'EM15 (fig. 3). On y discerne, au nord, une plage étendue de fortes valeurs qui semble partagée en son milieu par une anomalie linéaire de faible valeur dans l'orientation ONO-ESE. Les contours assez réguliers et grossièrement perpendiculaires suggèrent la possibilité d'un bâtiment : il faudrait pour cela supposer qu'il est rempli de scories, et que celles-ci débordent également à l'extérieur (cf. carte EM15), il pourrait évidemment aussi s'agir de pierres. On peut cependant être étonné que la carte, réalisée à maille fine (1 mesure par m^2), n'individualise aucun mur. Il n'en est pas de même pour l'autre portion de la carte où un mur E-O, d'ailleurs soupçonné dans la topographie, limite clairement les fortes réponses de résistivité vers le sud où le terrain devient marécageux. On peut également reconnaître sur cette portion de la carte quelques frontières rectilignes plus ou moins cohérentes avec celles observées sur l'autre rive du Brévon ainsi qu'un alignement. Les fortes résistivités se répartissent en plages relativement bien individualisées et uniformes à des niveaux de réponse assez différents (différences de nature des matériaux accumulés à l'intérieur (?) de l'établissement ?). On notera aussi la situation très particulière du mur détecté en position de barrage en travers de la vallée : compte tenu de la nature du site, il peut trouver une explication technologique pour la retenue des eaux nécessaires à l'exercice de la métallurgie ainsi qu'à l'assèchement de la partie aval de ce fond de vallée comme cela s'est produit sur le site proche de l'abbaye de Fontenay.

Cette exploration d'ensemble a été complétée par une reconnaissance de détail sur le secteur sud du site avec le détecteur électro-magnétique à signal harmonique SH3 (C.R.G. Garchy) ; cet appareil présente l'avantage de fournir deux mesures : l'une en phase qui correspond habituellement à la susceptibilité magnétique, l'autre en quadrature qui devrait donner une conductivité apparente.

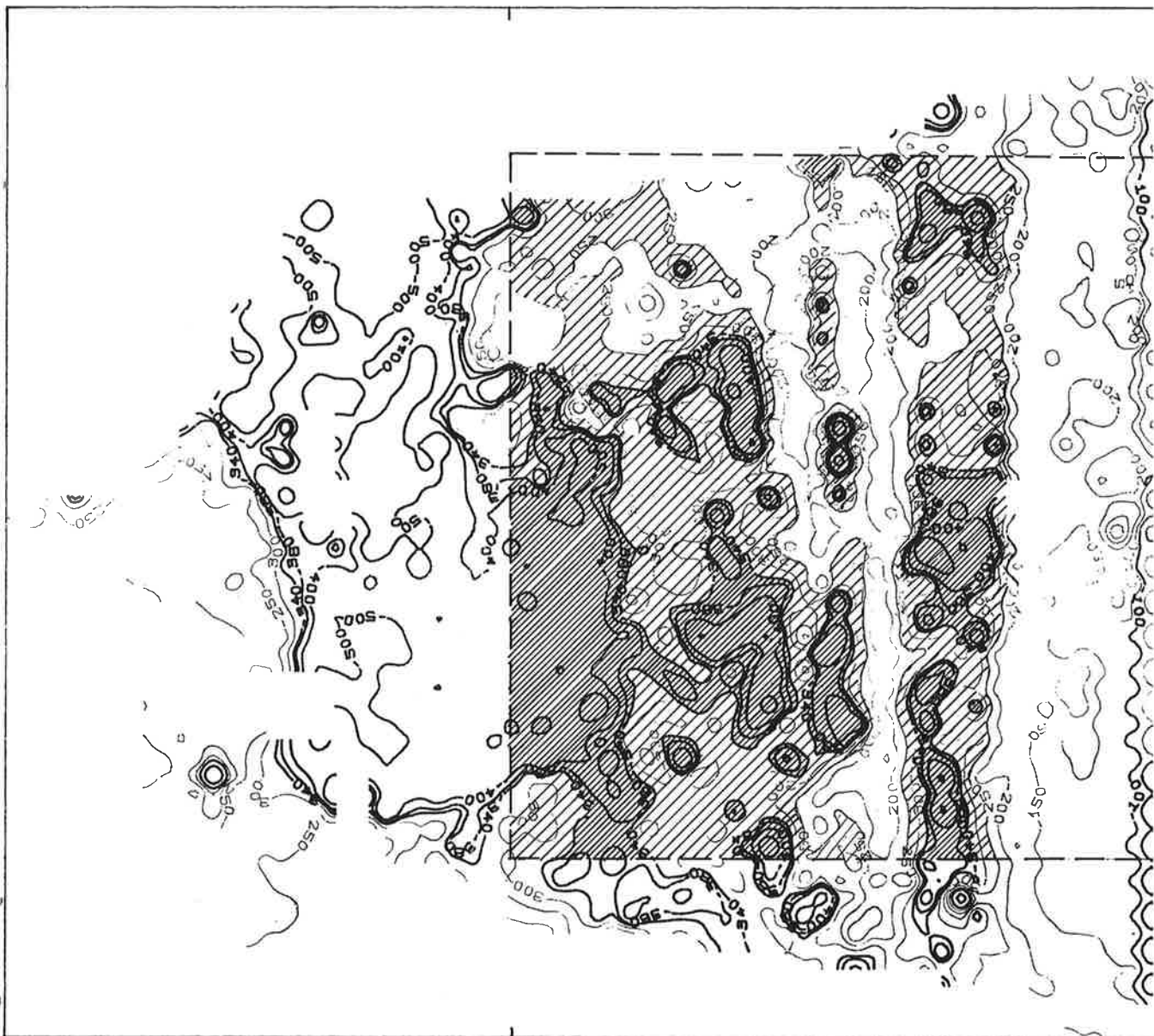
Dans le cas particulier des sites métallurgiques, il n'en va pas ainsi car la susceptibilité est si élevée que la composante en phase sature la réception du SH3 et que la composante en quadrature de la susceptibilité n'est plus négligeable devant la conductivité. On n'obtient donc pour le moment que deux cartes extrêmement perturbées :

- la carte de susceptibilité sur la composante en phase n'est plus définie pour les valeurs supérieures à $700 \cdot 10^{-5} \text{ Usi/m}^3$ (fig. 5).

- les données en quadrature résultent de la superposition des effets de la conductivité électrique et de viscosité magnétique, puisque, en accord avec la théorie de Néel, la composante en quadrature du signal reçu dépend de cette dernière grandeur (voir annexe). On pourrait évaluer cette viscosité en tenant compte, point par point, de la conductivité estimée à partir de la carte de résistivité établie à l'aide du dispositif RATEAU. Cette opération n'ayant pas encore été accomplie à ce jour, on s'est contenté d'une approximation sur l'ensemble de la carte en estimant la résistivité à une valeur uniforme $100 \Omega m$. On obtient ainsi une nouvelle carte (fig. 6) dont on constate qu'elle diffère effectivement des précédentes pour la même zone. Faute d'avoir réalisé le calcul de la viscosité point par point, on ne peut pousser l'analyse très loin

P149

P120



MINOT-BREVON 1986
SH3 en quadrature

— — — contour de la carte de résistivité
apparente

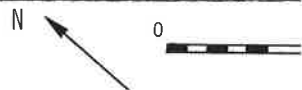


Fig. 6. — Carte approchée de la viscosité magnétique sur la zone sud (à partir de la réponse en quadrature du SH3 pour une valeur de résistivité fixée uniformément à 100 Ω m).

P 120

P 80

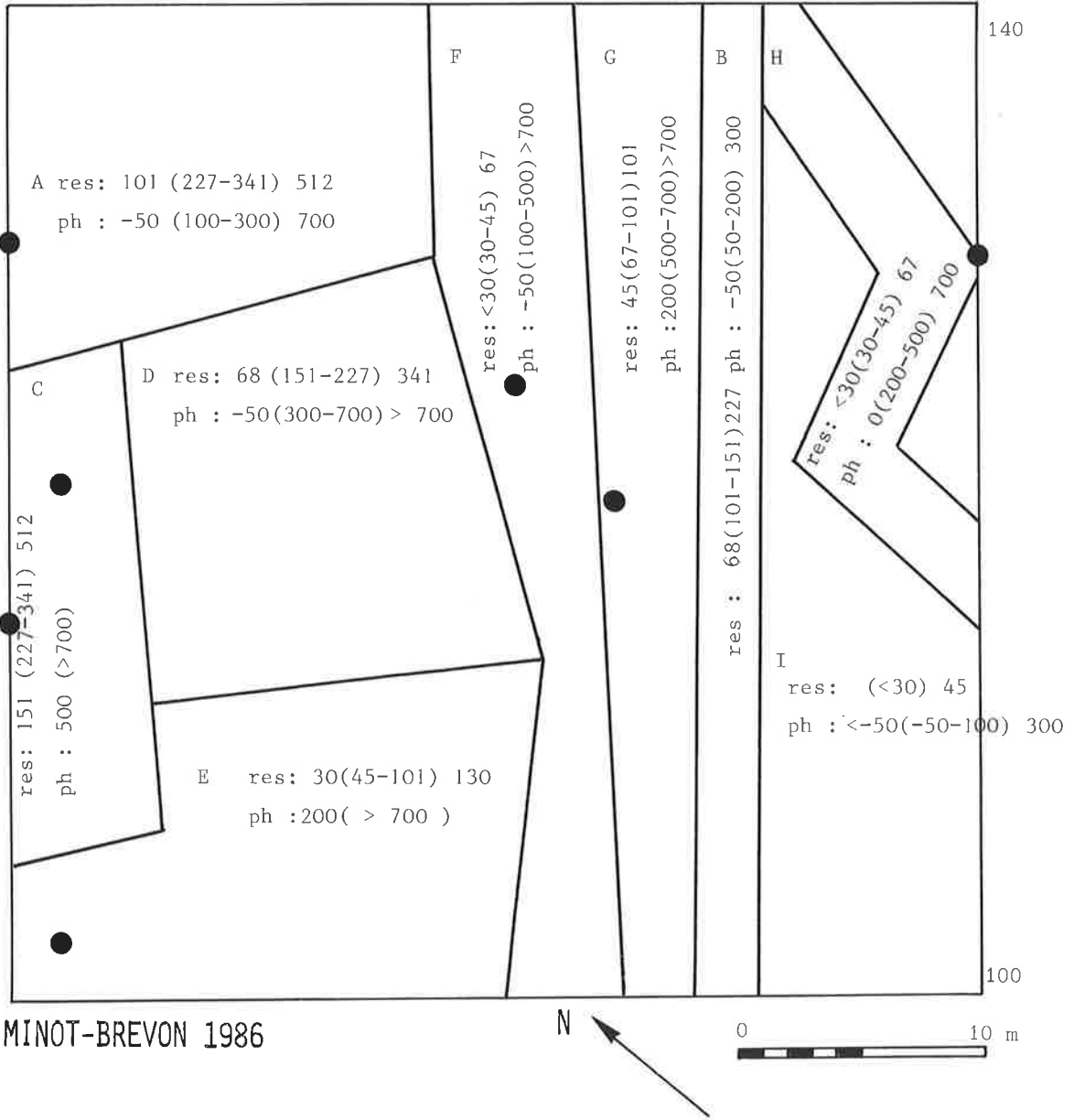


Fig. 7. — Découpage de la zone Sud de A à I en fonction de la plage de réponse obtenue sur la résistivité apparente et le signal SH3 en phase. Les cercles noirs localisent les échantillons prélevés.

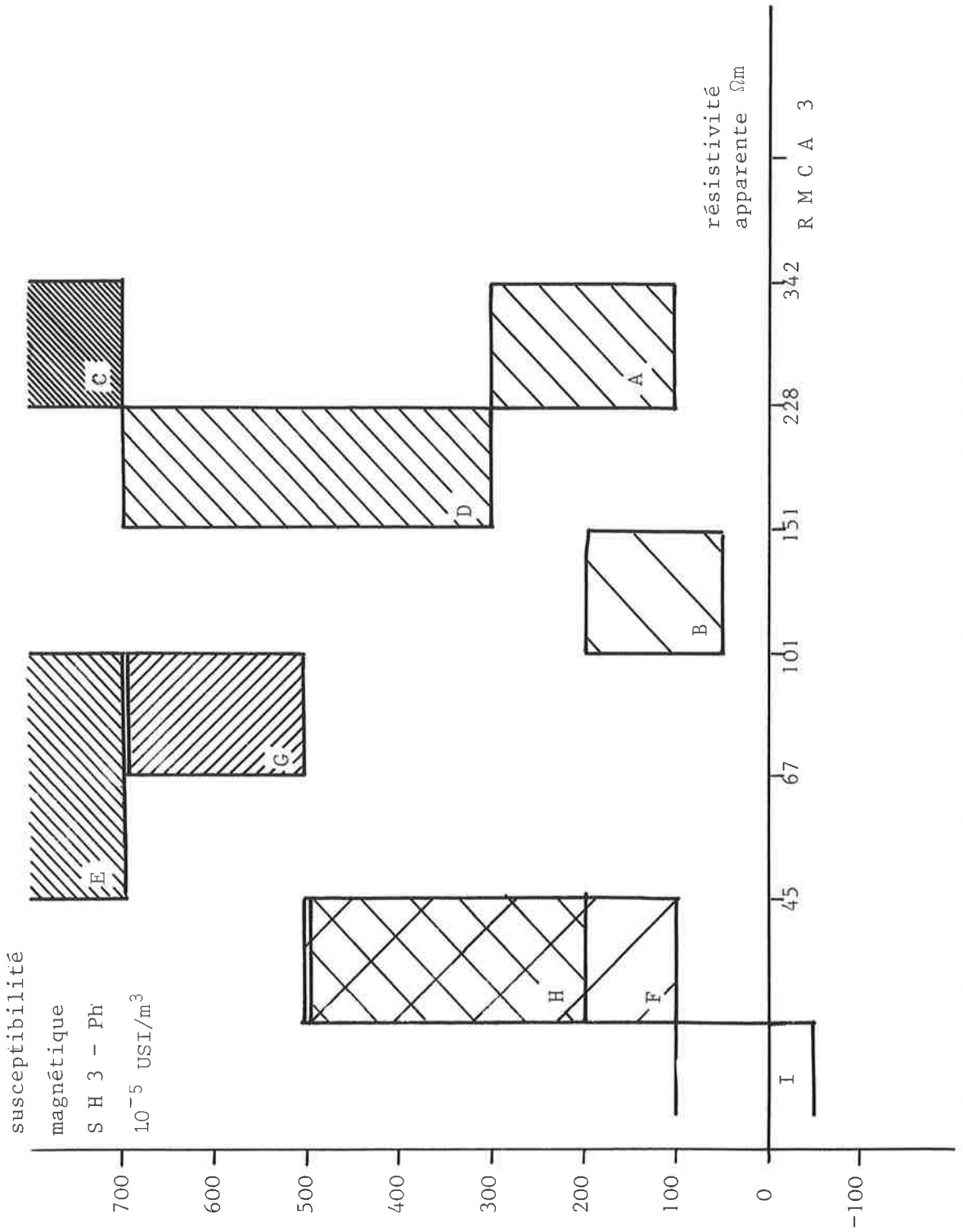
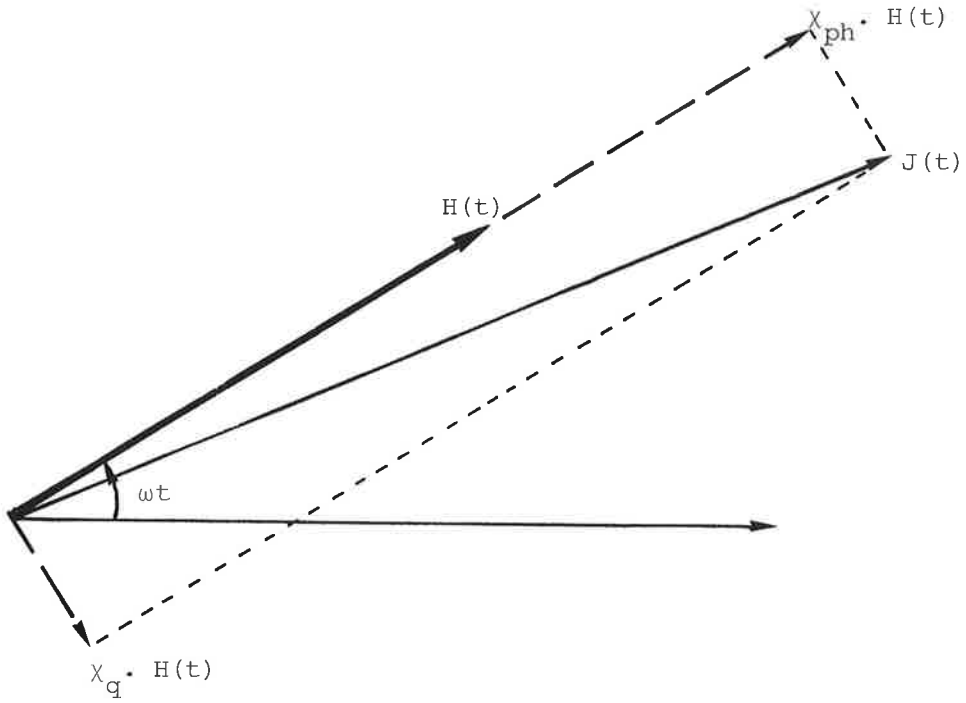
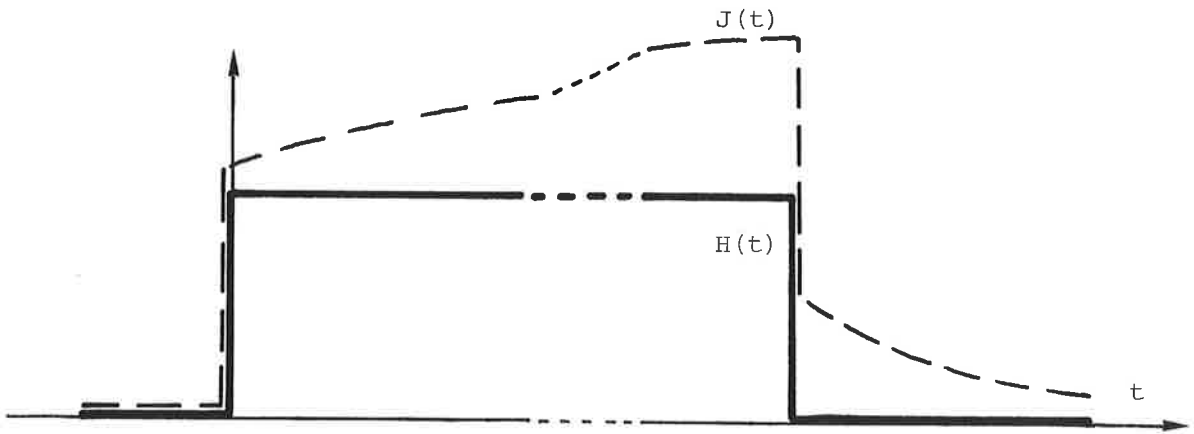


Fig. 8. — Représentation approximative des valeurs rencontrées pour les trois paramètres étudiés dans chacune des zones définies sur la figure 7. L'intensité du hachurage caractérise la plus ou moins grande valeur de l'estimation proposée de la viscosité.



a/ en régime sinusoïdal établi



b/ en régime impulsionnel

Fig. 9. — Représentation théorique des phénomènes d'aimantation en fonction du temps et du régime du champ inducteur.

mais on peut tenter de classer les différents secteurs de la zone étudiée (fig. 7) en fonction de la plage de réponse obtenue pour chacun des trois paramètres. Un graphique approprié portant la résistivité apparente en abscisses, la susceptibilité magnétique en ordonnées, auxquelles vient s'ajouter un hachurage plus ou moins serré selon la réponse obtenue en quadrature, permet de visualiser clairement la grande variété des propriétés de ces secteurs du terrain (fig. 8).

Il est déjà bien connu que le fait de disposer de deux paramètres différents au cours d'une prospection permet souvent de lever des indéterminations sur la cause de certaines anomalies, voire quelquefois d'identifier des structures. Dans le cas de la métallurgie, où les matériaux présents sont particulièrement complexes et variés, on conçoit bien l'intérêt de disposer des trois paramètres qui viennent d'être cartographiés à Minot. A ce jour (août 1987), des prélèvements d'échantillons ont pu être réalisés sur le site grâce à l'obligeance du propriétaire du site, M. Jager, maire d'Étalante. Ces échantillons (localisés par un symbole particulier sur la carte, fig. 7) présentent, comme on le pressentait, des caractères extrêmement différenciés : limons gris stérile en amont du mur de barrage supposé, amas de pierres calcaires, couches d'occupation (?) à fragments de terre cuite, terres très noires à résidus métallurgiques, argile jaune du substrat géologique, etc... en aval. L'étude de ces échantillons en laboratoire est à ce jour engagée dans le cadre du programme évoqué en annexe.

BIBLIOGRAPHIE

NEEL (L.), 1949, "Théorie du traînage magnétique des ferro-magnétiques en grains fins avec application aux terres cuites", dans *Annales de Géophysique*, 5, fasc. 2, p. 99-136.

LEBORGNE (E.), 1955, "Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel", dans *Annales de Géophysique*, 11, p. 399-419.

MULLINS (C.), 1971, "The magnetic properties of the soil and their application to archaeological prospecting" (Ph. D. thesis 1971), dans *Archaeo-Physika*, 5, p. 145-347.

GRAHAM (I.D.G.) et SCOLLAR (I.), 1976, "Limitations on magnetic prospection in archaeology imposed by soil properties", dans *Archaeo-Physika*, 6, p. 1-124.

HESSE (A.) et TABBAGH (A.), 1981, "Geophysical prospection on wide mesh grids in archaeological surveys. Sampling and interpretation problems", dans *21st Symposium on Archaeometry Brookhaven, 18-22 mai 1982, Abstract*, 1 p.

HESSE (A.), AUBIN (A.), THOMPSON (J.) et JORDAN (G.), 1982, "Electromagnetic survey on the gallo-roman pottery workshop of Jaulges-Villiers-Vineux", dans *22nd Symposium of Archaeometry, Bradford, 30 mars-3 avril 1982, Abstracts*, p. 46.

HESSE (A.), BOSSUET (G.) et CHOQUIER (A.), 1986, "Reconnaissance électrique et électromagnétique de sites et de structures de métallurgie ancienne", dans *Prospezioni archeologiche*, n° 10, p. 71-77.

HESSE (A.), JOLIVET (A.) et TABBAGH (A.), 1986, "New prospects in shallow depth electrical surveying for archaeological and pedological applications", dans *Geophysics*, vol. 5, p. 585-594.

DABAS (M.), HESSE (A.) et JOLIVET (A.), 1987, "Prospection électrique superficielle automatisée", dans *2e Symposium "Photographie aérienne et prospection géophysique en archéologie"*, Bruxelles, 8 novembre 1986, Actes à paraître.

BENOIT (P.), GUILLOT (I.), PLOQUIN (A.) et FLUZIN (Ph.), 1987, "Archéologie et paléo-métallurgie des sites de Minot et Fontenay en Bourgogne", *Actes du Symposium Archaeometallurgie von Kupfer und Eisen in West Europa, Mainz, 12-15 septembre 1986*, à paraître.

ANNEXE

Programme d'étude de la viscosité magnétique des sols archéologiques par des mesures en champ transitoire et en champ alternatif

Il est établi depuis trente ans environ par les travaux d'E. Leborgne (1955) que les sols présentent une susceptibilité magnétique et une viscosité magnétique (ou traînage) plus élevées que celles de la roche mère sous-jacente.

Sur les sites archéologiques et en particulier sur les sites d'occupation, cet effet se trouve encore renforcé par différents mécanismes (déchets métalliques, feux). La susceptibilité magnétique (ou du moins ses contrastes) a été largement utilisée en prospection archéologique, mais la viscosité beaucoup moins. Elle fournit pourtant des réponses appréciables avec des appareils E.M. Slingram à émission sinusoïdale (SH3) ou à champ transitoire (DECCO fabriqué par Elsec) comme nous le signalons dans le texte. La réponse due à la viscosité a été jusqu'à maintenant considérée soit comme négligeable, soit comme parasite. La seule expérimentation a été effectuée par C. Mullins (1974) et I.D.G. Graham et I. Scollar (1976). Nous nous proposons, par une étude d'une grande variété de sols, de mesurer la viscosité et d'étudier sa variation avec la susceptibilité magnétique. Ces auteurs, tout en ne pouvant déterminer de façon absolue l'effet dû à la viscosité, ont montré en effet qu'il existe une très forte corrélation entre la susceptibilité et la viscosité (corrélation prévue par la théorie de Néel (1949) pour les monodomains dispersés). Cette corrélation, mise en évidence sur un grand nombre de sites, ne semble plus exister pour les sites où une industrie métallurgique s'est développée. Pour ces sites en effet, la viscosité est anormalement faible. L'objet du programme consiste à vérifier ce dernier point et les premières mesures semblent corroborer cette observation. S'il en est ainsi, la mesure de la viscosité magnétique apporterait donc une information nouvelle, différente de celle de la susceptibilité magnétique et permettrait une caractérisation des sites métallurgiques anciens.

L'approche expérimentale peut s'orienter dans deux voies selon que les mesures sont faites en régime sinusoïdal établi ou en régime impulsif. Deux appareils ont donc été construits.

1. La mesure en champ alternatif nous donne la susceptibilité en phase et en

quadrature. Rappelons que l'on définit la susceptibilité magnétique en champ continu comme le rapport de l'aimantation volumique induite dans l'échantillon à l'intensité du champ inducteur.

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

En champ alternatif, le vecteur \vec{J} n'est plus en phase avec \vec{H} : χ présente une composante parallèle à \vec{H} qui est la susceptibilité en phase (χ_p) et une composante en retard de 90° , qui est la susceptibilité en quadrature (χ_q). D'après les travaux de Mullins, on aurait couramment pour les sols

$$\chi_q = 4 \text{ à } 7 \%$$

$$\chi_p$$

La relation théorique liant χ_p , χ_q et la viscosité mesurée en régime transitoire pour une population de grains monodomains dispersés est :

$$\frac{\delta \chi_p}{\delta \log(\omega/\omega_0)} = \frac{2}{\pi} \chi_q = - \frac{1}{h_0} \frac{\delta \sigma_r}{\delta \log(t/t_0)}$$

(h_0 = champ inducteur de pulsation ω , σ_r aimantation rémanente).

En définissant une constante de viscosité V_c par :

$$V_c = \frac{1}{h_0} \frac{\delta \sigma_r}{\delta \log(t/t_0)} \quad \text{ou par } \sigma_r - \sigma_0 = h_0 V_c \log(t/t_0)$$

(σ_0 = aimantation rémanente à $t=0$), V_c devrait donc être liée à la fois à χ_q et à la pente de χ_p en fonction de $\log \omega$.

L'appareil que nous avons construit en 1986 répond à un certain nombre de critères : uniformité du champ excitateur sur l'échantillon, champ de l'ordre de grandeur du champ terrestre. Cet appareil en champ alternatif nous permet d'évaluer χ_p et χ_q et de tester la première partie de l'égalité : les mesures sur les premiers échantillons de terre sont en accord avec la théorie. Un nombre, pour l'instant assez réduit, d'échantillons de sites métallurgiques a montré un χ_q très faible, confortant l'hypothèse des sols à viscosité très faible en relation avec cette activité. Une série de mesures beaucoup plus complètes est en cours.

2. En régime impulsif (fig. 9), on mesure la décroissance de σ_r après une excitation très brève (500 μ s). Un échantillonneur permet de connaître, de plus, la loi de décroissance de σ_r dans les 500 μ s après la coupure du courant. On peut donc estimer

$$\frac{\delta \sigma_r}{\delta \log t} \quad \text{et } V_c.$$

Les mesures sont en cours à l'heure actuelle (août 1987) et seuls deux aspects qualitatifs de la formule ont été vérifiés sur des échantillons d'origine non métallurgique :

$$\chi_q = \text{cste} \quad \frac{\delta\sigma}{\delta \log t} = \text{cste}$$

En conclusion, la mesure en champ alternatif a permis, au moins sur les quelques échantillons analysés, de confirmer notre hypothèse de travail : viscosité magnétique anormalement faible sur les produits et les sols métallurgiques anciens (scories de La Forgeotte à Minot, du Pays de Bray, et même du Mali). Il reste à étudier de façon systématique des sols d'habitat (trente sols sélectionnés sont en cours d'analyse) pour essayer de préciser les valeurs quantitatives de viscosité associées aux différents milieux archéologiques.

* *Ingénieur géophysicien.*

***Centre de recherches géophysiques du C.N.R.S., Garchy (Pouilly-sur-Loire).*

***Ingénieur, Centre de recherches géophysiques du C.N.R.S., Garchy (Pouilly-sur-Loire).*