Contribution de la prospection géophysique à large maille et de la géostatistique à l'étude des tracés autoroutiers. Application aux ferriers de la Bussière sur l'A77

Michel Dabas

► To cite this version:

Michel Dabas. Contribution de la prospection géophysique à large maille et de la géostatistique à l'étude des tracés autoroutiers. Application aux ferriers de la Bussière sur l'A77. Archeosciences, revue d'Archéométrie, 1999, 23, pp.17-32. 10.3406/arsci.1999.972 . hal-02925653

HAL Id: hal-02925653

<https://hal.science/hal-02925653>

Submitted on 30 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.

Contribution de la prospection géophysique à large maille et de la géostatistique à l'étude des tracés autoroutiers. [Application aux ferriers de la Buissière sur l'A77]

In: Revue d'Archéométrie, N°23, 1999. pp. 17-32.

Citer ce document / Cite this document :

Dabas Michel. Contribution de la prospection géophysique à large maille et de la géostatistique à l'étude des tracés autoroutiers. [Application aux ferriers de la Buissière sur l'A77]. In: Revue d'Archéométrie, N°23, 1999. pp. 17-32.

doi : 10.3406/arsci.1999.972

http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/arsci_0399-1237_1999_num_23_1_972

Abstract

For the first time in France (1995), an electromagnetic survey using a large mesh was undertaken for a detection of archaeological structures over a distance of more than one kilometre (Motorway A77). The original aspect of this project is two fold : a survey of more than one kilometre long, and second, the area which is located only in a forest, a place which is often neglected by archaeologists and surveyors, including geophysicists...The geophysical diagnostic was positive and was at the origin of the change of the main line of the motorway.

The structures which were sought after, are heaps of slags. Magnetic susceptibility was systematically measured over a surface of 300 by 1000 m. This measurement enable the distinction between the main areas of metallurgical activity and places where slags were scattered.

Problems related with spatial sampling (definition of sample interval in both direction) are also considered using the theory of geostatistics (variograms and kriging). Cross-validations have shown that the original sampling interval was relevant. Finally, this type of study can be applied to other types of archaeological structures when magnetic susceptibility is enhanced not solely as a result of the action of fire or metallurgical works.

Résumé

For the first time in France (1995), an electromagnetic survey using a large mesh was undertaken for a detection of archaeological structures over a distance of more than one kilometre (Motorway A77). The original aspect of this project is two fold : a survey of more than one kilometre long, and second, the area which is located only in a forest, a place which is often neglected by archaeologists and surveyors, including geophysicists...The geophysical diagnostic was positive and was at the origin of the change of the main line of the motorway.

The structures which were sought after, are heaps of slags. Magnetic susceptibility was systematically measured over a surface of 300 by 1000 m. This measurement enable the distinction between the main areas of metallurgical activity and places where slags were scattered.

Problems related with spatial sampling (definition of sample interval in both direction) are also considered using the theory of geostatistics (variograms and kriging). Cross-validations have shown that the original sampling interval was relevant. Finally, this type of study can be applied to other types of archaeological structures when magnetic susceptibility is enhanced not solely as a result of the action of fire or metallurgical works.

CONTRIBUTION DE LA PROSPECTION GÉOPHYSIQUE A LARGE MAILLE ET DE LA GÉOSTATISTIQUE A L'ÉTUDE DES TRACÉS AUTOROUTIERS Application aux ferriers de la Bussière sur l'A77

Michel DABAS*

Résumé : Pour la première fois en France (1995), une prospection électromagnétique à large maille a été entreprise pour la détection non-destructive de structures archéologiques sur une distance kilométrique (autoroute A77). L'originalité de la démarche tient en deux points : prospection géophysique à large maille sur une distance kilométrique et prospection uniquement en sous-bois donc dans des conditions où les méthodes classiques (prospection aérienne, prospection pédestre) sont peu applicables. Le diagnostic géophysique positif quant à la présence de structures archéologiques a permis de déplacer l'axe de l'autoroute.

Les structures à rechercher correspondent à des ferriers. Sur la largeur de la bande des 300 mètres de la future autoroute A77 et sur plus d'un kilomètre de longueur, la susceptibilité magnétique du sol a été mesurée. Cette mesure a permis en particulier de faire la distinction entre les aires principales de traitement et les surfaces où les scories ont été répandues.

Les problèmes liés à l'échantillonnage spatial (définition du pas de mesure dans les deux directions) sont aussi abordés sous l'angle géostatistique (variogrammes et krigeage). Les validations croisées ont montré pour les structures recherchées la pertinence de la maille choisie. Enfin, ce type d'étude peut être étendu à la détection systématique d'autres types de sites archéologiques où l'augmentation de la susceptibilité magnétique des sols du fait de l'homme n'est pas forcément le résultat d'une activité métallurgique ou de l'action du feu.

Abstract : For the first time in France (1995), an electromagnetic survey using a large mesh was undertaken for a non-destructive detection of archaeological structures over a distance of more than one kilometre (Motorway A77). The original aspect of this project is two fold : a survey of more than one kilometre long, and second, the area which is located only in a forest, a place which is often neglected by archaeologists and surveyors, including geophysicists... The geophysical diagnostic was positive and was at the origin of the change of the main line of the motorway.

The structures which were sought after, are heaps of slags. Magnetic susceptibility was systematically measured over a surface of 300 by 1000 m. This measurement enable the distinction between the main areas of metallurgical activity and places where slags were scattered.

Problems related with spatial sampling (definition of sample interval in both direction) are also considered using the theory of geostatistics (variograms and kriging). Cross-validations have shown that the original sampling interval was relevant. Finally, this type of study can be applied to other types of archaeological structures when magnetic susceptibility is enhanced not solely as a result of the action of fire or metallurgical works.

Mot-clefs : Industrie du fer, paléométallurgie, scorie, variogramme, krigeage, susceptibilité magnétique, échantillonnage spatial, archéologie des tracés linéaires, géostatistique, interpolation, validation croisée autoroute.

Key-words : Iron making, slags, Variogram, Kriging, Magnetic Susceptibility, spatial sampling, motorway planning, geostatistics, interpolation, cross-validation.

1 - LES FERRIERS

La recherche sur les ferriers, et de manière plus générale en paléométallurgie, est très active en France depuis les années 1970 (C. Domergue). Elle a été formalisée par une série de programmes nationaux (H27 à partir de 1981, H3 à partir de 1990 et maintenant H25 de la SDA) qui intégraient un certain nombre de régions dont le po-

tentiel métallurgique était important, ainsi que par la création depuis 91 d'une unité propre du CNRS (UTC de Sévenans). A l'étranger, il faut souligner entre autre les travaux de Pleiner (Tchécoslovaquie), Bielenin (Pologne) ou de Tylecote en Angleterre.

Les études en paléométallurgie visent le traitement des données de terrain ainsi que l'établissement d'une carte archéologique des sites d'extraction minière et de trans-

* UMR 7619 CNRS, Université Paris VI, Tour 15-25, Et, DGA, Boîte 105, 4 place Jussieu, 75252 PARIS cedex 05.

formation avant l'apparition des hauts-fourneaux (Mangin *et al.*, 1994). Les régions les plus concernées sont : la Lorraine (présence du CRPG et du Laboratoire d'Archéologie des Métaux à Nancy), la Franche-Comté (Institut d'Archéologie de l'Université de Besançon et SRA), la Bourgogne avec les travaux relativement anciens sur la Côte d'Or (Morvan, Haut-Auxois), la Saône-et-Loire, la Nièvre, l'Yonne (travaux sur l'A5 en outre), les Pyrénées et enfin la Haute-Marne.

Les sites d'activité métallurgique s'identifient d'abord par la présence des déchets du travail du métal à savoir les scories et les éléments architecturaux liés aux fours et habitations. Ce type de matériel (en incluant même les parois de fours, briques, etc.) possède une signature magnétique très forte qui les rendent *a priori* facilement identifiables par les méthodes magnétiques et/ou électromagnétiques.

Les vestiges se présentent généralement sous plusieurs formes (Mangin *et al.*, 1992) :

- des scories dispersées sur une surface plus ou moins étendue. Ce type de site se retrouve dans des zones cultivées, et si l'existence même du site ne pose pas de problème au prospecteur pédestre, sa limite est difficile à cerner visuellement (étalement des scories sur une surface importante, scories qui s'enroben de terre). Les anomalies aériennes (phytologiques ou chromatiques) sont aussi assez rares sauf pour la partie extraction proprement dite (puits de mine souvent signalés par les prospecteurs aériens). La prospection géophysique permet dans ce cas de parfaitement cartographier l'extension du ferrier et ce d'autant plus facilement que la zone est parfaitement dégagée de tout obstacle entravant le déplacement de l'opérateur,

- des scories accumulées sur les bordures de champs (résultant de la même cause que l'épierrement des champs). La prospection à vue permet de les déceler facilement,

- des ferriers étalés qui correspondent à des ferriers complètement nivelés mais dont la base est conservée *in situ*. Ils correspondent généralement à des prairies naturelles et ne sont que très peu visibles dans la topographie. Une tranchée de drainage, un ruisseau, une route ou les taupinières, permettent au prospecteur pédestre de l'appréhender. Là encore, la prospection géophysique permettra de cerner le site et même les aires de production et le bâti (*cf.* ferriers médiévaux de Minot en Bourgogne, Dabas *et al.*, 1987).

- des ferriers intacts (les bases des fourneaux se trouvent généralement sous ou à côté des dépôts principaux) qui n'ont pas ou peu été retouchés par l'homme après la phase d'exploitation. Généralement ces ferriers sont localisés dans les zones boisées.

Les ferriers de la Bussière, objet du présent travail, rentrent dans cette catégorie (sauf une petite partie du ferrier Nord qui a été arasé et correspond à une bordure de champ cultivé). Situés dans une partie ancienne d'une chenaie d'un domaine, ils ont été peu perturbés par les travaux de sylviculture très destructifs liés à l'exploitation moderne des résineux.

2 - CONTEXTE

L'étude archéologique préliminaire faite au niveau de l'Avant Projet Sommaire (C. Ferrier, J. Pascal, B. & Y. Rialland, Sept. 1991) avait abouti à recenser sur les 92 km de tracé de l'autoroute A77 (Dordives à Cosne-sur-Loire) 167 « indices de site » (un indice de site correspond dans cette phase de l'étude d'une autoroute à un élément non encore validé sur le terrain permettant de soupçonner l'exis-

tence d'un site : toponymie, situation géographique propice à une implantation, trace sur une photographie aérienne, etc.). Parmi ceux-ci, un ensemble de ferriers avait été détecté au niveau de La Bussière (PK57 à 58) au lieu-dit « les Grands Bois » et plus précisément « les Brouys ». Ce ferrier se situe dans le Loiret, mais peut être rattaché aux ferriers de la Bourgogne et plus particulièrement à ceux de l'Yonne (28 km à vol d'oiseau des ferriers de Tannerre-en-Puisaye) ou de la Nièvre. Les ferriers de l'Yonne ont fait l'objet d'un recensement précoce.

Ces ferriers étaient déjà pour certains d'entre eux reportés sur la carte géologique (dénomination : xfe). Ces formations ne sont pas isolées puisqu'on en retrouve sur une zone qui s'étend entre la Bussière et Arrabloy à 5 km au sud-est. Encore plus au Sud mais à l'Est, la région de la Puisaye est connue pour ses exploitations métallurgiques remontant à l'époque romaine.

Les sondages géotechniques avaient aussi traversé en plusieurs endroits des formations qualifiées de « mâchefer » par les foreurs sur une épaisseur métrique.

Les indices toponymiques de la région sont aussi très clairs : étang des Ferrys, le Ferri, les Forges, la Ferrerie, ou plus indirectement comme : les terres rouges, le bois des marnes, les Marnes (ayant pu servir dans l'exploitation métallurgique, dans les tuileries, en amendement ou dans la fabrication du charbon de bois). Certains des toponymes de ce bois ont une origine ancienne : Ferme de la Maison Rouge (romain ?) ou le Brouy (probablement gaulois, broga=limite).

Il est difficile de dater ces ferriers avant la fouille qui a eu lieu (responsable A. Rebiscoul), mais une exploitation romaine du fer est attestée par ailleurs dans la région.

Ces ferriers ont été réexploités très souvent pour la recharge des chemins ou pour en réextraire le fer pendant les guerres (dans l'Yonne plus de 470 000 tonnes de scories ont été réexploitées entre 1924 et 1929 par exemple).

De manière surprenante, l'origine du minerai est encore problématique (Sparnacien ?). La feuille géologique d'Orléans (n° 95, 1967, J. Goguel) ne signale-t-elle pas : « Le minerai de fer n'est pas utilisable et l'on ignore la provenance des matières traitées jadis à la Bussière ».

Les scories sont du type « scories coulées » (la scorie suivant la définition de Tylecote est la partie qui correspond effectivement à la coulée hors du fourneau pendant l'opération de réduction). Nous utiliserons par la suite le terme de ferrier, plutôt que celui du produit à savoir le mâchefer ou scorie pour désigner l'ensemble de ces structures.

Si l'existence d'une partie de ces ferriers était connue, aucune cartographie de détail n'avait été faite pour en délimiter précisément le contour. Toute la zone se trouve dans des bois dont la visibilité est de plus réduite par la présence de buis.

Le but de la prospection était donc de localiser d'éventuels ferriers non encore connus et de cartographier leur extension dans la bande des 300 mètres.

La zone retenue en première approche est limitée par le bois qui s'étend entre la D43 au Nord et la D622 au Sud, sur une longueur de 1100 m et une largeur de 300 m.

3 - GÉOLOGIE - PÉDOLOGIE

Pour cette étude ont été utilisés les documents disponibles à l'époque (1995) avant la réalisation des travaux de terrain (Carte géologique au 1/80000 et 1/50000, sondages du CETE Rouen, sondages de la SARG et prospection géophysique de l'Européenne de Géophysique).

Tout le terrain prospecté appartient à la formation à

sable et argile de Sologne. Nous n'avons rencontré entre le PK57,6 et le PK58,7 que des sables plus ou moins grossiers avec une proportion d'argile et de silex variable. Des niveaux majoritairement argileux existent localement, mais il est difficile de les cartographier avec les sondages à la tarière qui sont trop espacés (100 m au mieux) par rapport à l'extension spatiale des nappes argileuses. Ces niveaux sont responsables de plusieurs nappes perchées constatées par les foreurs. La multiplicité des mares et étangs de la région, en charge après les pluies de l'hiver, est le reflet de cette variabilité spatiale. Des niveaux silicifiés (silex) peuvent être rencontrés localement.

La prospection géophysique (Européenne de Géophysique) a confirmé l'existence d'une couche d'argile massive (résistivité de 10 ohm.m) en profondeur entre des niveaux sableux plus ou moins argileux (30 à 250 ohm.m) grâce à plusieurs sondages électriques. Mais ces types de sondage sont très intégrateurs et ne peuvent différencier des alternances de couches peu épaisses comme l'avaient fait les sondages géotechniques à la tarière. L'épaisseur de cette couche est d'au moins cinq mètres et son pendage Nord fait qu'elle recoupe la topographie entre le PK58,8 et le PK58,3.

Le résultat des sondages électriques, qui nous donne donc les variations verticales dans le terrain, ont été confirmés par une prospection électromagnétique (EM31). Les deux profils effectués le long de l'axe de l'A77 montrent une augmentation très nette des conductivités entre le PK57,7 et le PK58,3 (passage de 10 à 40 milliSiemens par mètre).

En résumé, l'information apportée à la fois par les sondages géotechniques (tarière-fosse) et par les prospections géophysiques (sondage électrique et profilage de conductivité), nous montre l'existence en surface de niveaux sablo-argileux à argilo-sableux extrêmement variables latéralement. En profondeur, un niveau argileux à pendage Nord devient sub-affleurant entre le PK57,8 et 58,3 juste avant la vallée du Vernisson. Au Sud du Vernisson, on retrouve des niveaux plus sableux.

Il a été possible d'utiliser les informations topographiques contenues dans les fichiers du Système d'Information Géographique (SIG) propre à Scétauroute (MACAO). Des programmes d'interface entre MACAO et un SIG du commerce (IDRISI de l'Université de Clark) ainsi qu'un logiciel de cartographie (SURFER de Golden Software) ont été écrits (voir dans ce même numéro l'article de Dabas et Chazaly). La figure 1 montre le tracé de l'A77 avec les points kilométriques ainsi que la topographie déduite d'un relevé photogrammétrique.

4 - MESURE DE LA SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE

4.1 - PRINCIPE, APPAREILLAGE

La susceptibilité magnétique est la propriété physique qui traduit la possibilité d'un matériau de réagir à un champ magnétique. Il a été démontré que la susceptibilité magnétique augmente pour les matériaux ayant subi l'action du feu ou de façon plus générale, pour tout sol fortement anthropisé. Ce phénomène est la base des prospections géophysiques appliquées à l'archéologie. Il sera possible par exemple de détecter des fours, des scories, des éléments en terre cuite, mais aussi des systèmes de fosses et fossés enfouis, et même dans des situations très favorables, des trous de poteaux.

Dans le cas présent, les scories donnent lieu à une très forte augmentation de la susceptibilité qui peut même

Fig. 1 : Axe du projet et topographie issus du SIG MACAO.

saturer l'appareil de mesure. Celui-ci fait partie de la catégorie des appareils électromagnétiques (EM15 de Geonics, appartenant au Centre de Recherches Géophysiques, CNRS, Garchy). L'EM15 est un appareil de type Slingram : les deux bobines sont orientées à 35° de la verticale et séparées de 0,83 m. La fréquence d'émission est de 16 KHz. Il est réputé pour sa robustesse et la fiabilité des mesures : les dérives instrumentales de l'appareil sont restées mineures pendant les cinq jours d'opération et ont pu être corrigées sur le terrain. Les données présentées n'ont donc pas nécessité de post-traitements. Signalons que cet appareil n'est plus commercialisé actuellement (remplacé par l'EM38) et que celui utilisé comporte un certain nombre de modifications opérées au C.R.G.

L'appareil originel ne comportait en effet qu'un petit vu-mètre et était conçu comme un simple détecteur de métaux. Plusieurs modifications ont été introduites : mise de l'appareil sur un trépied à une distance de 3 cm au-dessus du sol. Affichage de la réponse du sol sur un micro-ampèremètre analogique puis numérique. L'afficheur a permis de se rendre compte d'une saturation du signal dans la bobine réceptrice pour les fortes valeurs. Un étalonnage a permis d'établir la correspondance entre susceptibilité magnétique apparente et courant mesuré ($1 \text{ milliAmp} = 0,3 \cdot 10^{-5} \text{ uSI}$) (Tabbagh, 1982).

Suite aux travaux de Tite et Mullins (1970) en Angleterre et de Parchas et A. Tabbagh (1978), il a été montré que ce type d'appareil mesurait la susceptibilité magnétique plutôt que les propriétés électriques des sols. Leur profondeur de pénétration est essentiellement liée à la géométrie des bobines (écartement et inclinaison) plutôt qu'à la fréquence d'émission (à 16 KHz, la profondeur d'investigation serait voisine de 30 m pour un sol de conductivité moyenne 20 milliS/m).

Les calculs que nous avons effectués ont prouvé que la profondeur d'investigation de l'EM15 reste faible (programme SH1D, A. Tabbagh) : nous avons modélisé l'effet d'une couche magnétique (susceptibilité magnétique de $6 \cdot 10^{-3}$ uSI, typique des scories de la Bussière) dans un milieu faiblement magnétique ($1 \cdot 10^{-3}$ uSI). Le graphe figure 2 montre l'évolution de la susceptibilité magnétique apparente en fonction de la profondeur de la couche magnétique. La variation de susceptibilité due à cette couche devient inférieure à 10 % de la valeur du milieu environnant pour des profondeurs supérieures à 38 cm. Si l'on admet que sur le terrain, n'est significative qu'une variation de plus de 10 % des mesures, une couche à plus de 40 cm ne sera donc plus détectable (définition de la profondeur d'investigation).

Mais deux arguments montrent que cette limite n'est pas rédhibitoire pour l'archéologie : 1) les ferriers en zone boisée sont rarement enfouis à grande profondeur ; 2) il existe des mécanismes de redistribution verticale dans le sol des particules magnétiques (cf. §4.2, Site de Farges-Allichant) par des animaux fouisseurs en dehors de tout travail agricole.

Une prospection visuelle méthodique pourrait bien évidemment apporter beaucoup de renseignements. Mais il se pose dans le cas de la Bussière deux problèmes qui empêchent la réalisation d'une véritable cartographie de ces vestiges avec une prospection visuelle ou un ramassage de surface : 1) toutes les structures sont sous couvert forestier très dense par endroits. Ces zones sont souvent évitées ou négligées par les prospecteurs (géophysiciens y compris...). Mais il faut se rappeler que l'industrie métallurgique a nécessité beaucoup de bois et que donc les zones boisées aujourd'hui étaient certainement bien différentes... 2) les scories sont très souvent répandues sur une grande surface, résultat de mécanismes naturels (érosion) ou anthropiques (réemploi pour la recharge des chemins entre autre). Il est alors impossible visuellement de délimiter les zones du ferrier avant les phases de décapage systématique du terrain et trop tard pour que les archéologues interviennent.

La prospection électromagnétique, même sous un recouvrement humique, détectera les concentrations de scories. Elle apportera de plus une information supplémentaire, comme dans un ramassage de surface avec comptage, à savoir une valeur quantifiée. On pourrait imaginer transposer la technique classique de comptage d'objets de surface aux scories, mais ceci n'est certainement pas viable. Nous nous sommes rendu compte que la densité en surface de scories est souvent très importante à des distances de plus de 100 mètres du site principal. Seule une mesure tenant aussi compte de la profondeur, c'est-à-dire *in fine* une mesure volumique et non plus surfacique permet de faire la différence entre un « épandage » de surface et un ferrier. Le chiffre donné par l'appareil intègre la susceptibilité sur un certain volume et répond donc aux exigences de détection en donnant une idée de la densité des vestiges sous-jacents. Les limites des ferriers seront donc mieux définies.

4.2 - PROSPECTIONS SUR LES FERRIERS – ÉTUDES DÉJÀ RÉALISÉES, HISTORIQUE, APPORT DE LA GÉOPHYSIQUE

Plusieurs expériences de prospection géophysique sur des ferriers ou des ateliers antiques ont été effectuées par l'équipe du Centre de recherches Géophysiques de Garchy.

Fig. 2 : Réponse théorique de l'EM15(Geonics) à une couche magnétique de profondeur variable.

A) Le site d'atelier céramique de Jaulges-Villiers-Vineux (Yonne) a été prospecté dans les années 1978 à 1980 (Scollar *et al.*, 1990 ; Hesse *et al.*, 1982 ; Hesse, 1998). Sur ce site d'une étendue de plus de 10 ha, une prospection électromagnétique utilisant l'EM15 a été effectuée sur 9 ha. La maille de mesure correspond à une surface élémentaire de 50 m². Cette prospection a permis la définition de l'extension horizontale du site. Les conclusions de cette prospection à large maille sont les suivantes :

- Comme les mesures sont nécessairement sous-échantillonnées (*i.e.* pas assez de points de mesure en fonction de la densité des structures recherchées), il faut mesurer un paramètre physique qui soit « signifiant ». Il est donc plus utile de mesurer directement la susceptibilité magnétique plutôt que les anomalies du champ magnétique qui ne montrent que ses variations. Ceci revient à limiter l'usage des méthodes électromagnétiques aux prospections à large maille ;

- Il faut disposer *a priori* d'une technique permettant d'estimer l'erreur introduite par le choix des paramètres de maille (cf. paragraphe sur les variogrammes).

- La profondeur d'investigation de l'appareil utilisé est faible (de l'ordre de 30 cm) et donc le volume échantillonné est faible.

B) Le ferrier de Tannerre dans l'Yonne (Dabas, 1989) est un des ferriers les plus étendus que nous connaissons (plus de 70 ha). La prospection géophysique entreprise visait cette fois-ci à définir l'extension verticale des dépôts métallurgiques. Plusieurs sondages électriques ont été effectués et ont montré que les scories se traduisaient par un niveau résistant. L'extension verticale maximale de ce ferrier a été calculée à 5 mètres.

C) Le ferrier du Velbret et celui de Minot en Bourgogne correspondent à des ferriers sous prairie qui ne sont pas visibles dans la topographie (Dabas *et al.*, 1987). Ils ont été prospectés sur une surface de 2 ha avec l'EM15 et une maille de 50 m². Deux groupes de structures ont pu être mis en évidence de part et d'autre d'un ruisseau. Les prospections géophysiques de détail (maille de 1 m²) ont permis de distinguer plusieurs bâtiments et des limites confirmées par la fouille.

D) L'intérêt de la prospection du site du Maillet (Cher) tient au fait qu'il a été prospecté avec plusieurs méthodes électromagnétiques et magnétiques. Les conclusions les plus importantes sont que les appareils électromagnétiques ne possèdent pas une dynamique suffisamment importante pour une cartographie de la structure interne de ce ferrier. Par contre, la prospection magnétique a pu mettre en évidence la présence de deux fours. C'est le seul cas à notre connaissance d'une détection non-destructive de structures à l'intérieur même d'un ferrier.

E) Le cas des deux fourneaux gallo-romains trouvés sur le tracé de l'A71 (Farges-Allichant, fouille A. Ferdière) est aussi assez rare puisqu'il s'agit de deux structures peu étendues, isolées et profondes (2 mètres). L'EM15 avait été utilisé avec une maille de 2x2 m ainsi qu'un autre appareil électromagnétique construit au Centre de Recherche Géophysique de Garchy le SH3 (Tabbagh, 1982) dont la profondeur d'investigation est légèrement inférieure au mètre.

Ceci nous amène à formuler une hypothèse importante pour la détection des structures archéologiques par la mesure de la susceptibilité magnétique : il est possible d'utiliser des appareils géophysiques dont la profondeur d'investigation soit moindre que la profondeur des structures archéologiques recherchées. Ce phénomène a été observé à plusieurs reprises. Son explication probable est l'existence de mouvements verticaux des éléments magnétiques dans le sol (rappelons que les particules responsables du magnétisme des sols ont des diamètres inférieurs à 100 nm, Dabas, 1989).

F) La prospection du site de Nozières avec l'EM15 est intéressante puisqu'elle couple la mesure de la susceptibilité magnétique sur le terrain avec la mesure de la même grandeur avec un pont de susceptibilité sur les échantillons ramenés en laboratoire. Il a été démontré, grâce à deux échantillonnages (une maille de 32 et une maille de 50 m²) que la distance entre points de mesure était suffisante pour délimiter correctement le site.

G) Le site des batteries de fours de Milanówek-Falencin (Dabas *et al.*, 1993) en Pologne a permis de montrer la complémentarité des approches magnétiques et électromagnétiques. Dans ce cas, la distance entre les fours est trop faible par rapport à leur profondeur d'enfouissement (un mètre). On ne peut distinguer les fours séparément. La méthode électromagnétique permet quand même de mieux délimiter les groupes d'anomalies correspondant à des densités de fours différentes et de plus cette méthode est beaucoup plus sensible aux structures étendues (gradient horizontal faible) que les méthodes magnétiques.

H) Le dernier cas présenté est celui d'un groupe de trois ferriers prospectés sur l'A5 (G. Ducomet et fouille de C. Dunikowski). Ce groupe de ferrier a été détecté par une prospection pédestre fine (maillage de 5 m, Dunikowski et Cabboi, 1995). Ces trois ferriers ont pu être associés à une dizaine d'ateliers et à dix-huit bas fourneaux en parfait état. Un des ferriers était visible dans un champ labouré (ferrier arasé) alors que les deux autres étaient protégés par une couverture forestière. Une prospection électromagnétique (SH3, maille 5 x 5 m) a été déclenchée et a donné l'image très claire de trois zones de production. D'après l'avis du responsable de l'opération (Dunikowski, 1995, p. 25), « elle a fourni les résultats les plus importants » (par rapport aux autres méthodes de prospection). Par contre, l'interprétation des emplacements des fours et des structures internes aux ferriers n'a pu réellement être élucidée à l'époque même par une prospection magnétique complémentaire (seulement 6 fours trouvés par rapport à 16 prédits).

De ces différentes prospections, on peut conclure que :

- les prospections électromagnétiques à large maille permettent aisément de cartographier l'extension horizontale des sites de métallurgie,
- la prospection magnétique ne semble pas apporter dans l'état actuel de nos connaissances une information supplémentaire très intéressante,
- l'appareil électromagnétique utilisé doit posséder la dynamique la plus étendue possible de façon à pouvoir effectuer une mesure partout en particulier même pour les valeurs les plus hautes caractéristiques de la zone centrale du ferrier,
- la profondeur d'investigation de l'appareil EM choisi peut être inférieure à la profondeur des structures recherchées.

4.3 - STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE SUR LES TRACÉS LINÉAIRES

Un des buts de cette mission en 1995 était de tester sur une distance compatible avec les problèmes d'archéologie des grands tracés, les possibilités de détection de sites archéologiques par la mesure de la susceptibilité magnétique.

Nous avons adopté dans un premier temps la stratégie que nous utilisons pour les tracés linéaires d'autoroute à savoir un ensemble de profils parallèles à l'axe et espacés de 50 mètres. Sur la bande des 300 mètres, 7 profils longitudinaux ont été ainsi réalisés. Un suréchantillonnage le long du profil est effectué : le pas de mesure est de 10 mètres. Sous couvert forestier dense, il est difficile d'utiliser des moyens topographiques rapides (GPS ou théodolite). Toutes les mesures ont été faites avec un compas de relèvement et un décimètre. Chaque profil a été topographié séparément et les erreurs de bouclage sont de l'ordre de 2 mètres sur 300, ce qui est très inférieur au pas des mesures géophysiques. Seul l'axe central de la bande des 300 m était matérialisé sur le terrain et nous nous sommes appuyés sur celui-ci.

Dans un second temps, et à des fins de test de la validité de notre échantillonnage 23 profils transversaux de 300 m de longueur ont été effectués. Ces profils sont aussi espacés de 50 m et les mesures sont effectuées tous les 10 m. Ils forment donc un deuxième ensemble indépendant de points qui permettront de tester certaines hypothèses émises à partir de l'étude du premier ensemble de points.

Les conclusions que nous tirerons de l'étude sur l'échantillonnage ne sont valables *a priori* que pour la recherche de structures dont les tailles sont voisines de celles qui ont été trouvées à la Bussière. Il n'en reste pas moins que la démarche peut être étendue pour tout autre type de site.

Pour tester à la fois les possibilités de détection et la qualité de la détection en fonction de la taille de la maille, on dispose de deux outils : l'outil « visuel » et l'outil statistique.

L'outil visuel se basera sur le « rendu » des cartes des anomalies : l'interpréteur comparera la forme et la dimension des anomalies obtenues en fonction des différents échantillonnages de terrain. Le problème est qu'il ne dispose pas de « référence » pour comparer les différents résultats entre eux (la totalité de la surface n'a pas été découpée). Il se limitera donc à un critère de type absence/présence de site et ne pourra dire si la forme d'une anomalie correspond bien à la forme du ou des sites.

L'outil statistique que nous allons développer fait appel au théorème de Shannon sur l'échantillonnage que nous explicitons ci-après.

Fig. 3 : Illustration du théorème de Shannon pour un ensemble de 3 groupes composés d'un ensemble de structures identiques.

Ce théorème du traitement du signal permet de préciser la relation qui existe entre taille d'une structure et taille de la maille utilisée pour la détection de celle-ci. Considérons le cas le plus simple : la détection en une dimension d'une structure ou d'un ensemble de structures de tailles identiques égales à X mètres. Le théorème de Shannon dit que pour détecter correctement la ou les structures, il faut échantillonner (prendre une mesure)

au moins tous les $X/2$ mètres. Ce théorème s'étend facilement à deux dimensions (ce qui est le cas rencontré par le prospecteur sur le terrain) et pour un ensemble de structures de tailles variables. En appelant X , la plus petite des tailles de la plus petite des structures, le théorème de Shannon stipule que l'on doit effectuer une mesure dans les deux directions de l'espace au moins tous les $X/2$ mètres. En géophysique, on détecte des anoma-

lies (électriques, magnétiques, électromagnétiques, etc.). La taille d'une anomalie est toujours supérieure à la taille du corps qui en est la cause et cette taille croît avec la profondeur de la structure recherchée. Seule la modélisation permet de prévoir la taille de l'anomalie en fonction de sa forme et de sa profondeur. A défaut, la taille X du corps étant un minoration de la taille de l'anomalie, on peut continuer à définir $X/2$ comme étant le majorant de la taille de maille à ne pas dépasser.

Cette notion est représentée graphiquement dans les trois graphiques ci-joints dans le cas simple d'un ensemble d'anomalies de tailles identiques. Sur la figure 3 (d'après Dabas *et al.*, 1998), un ensemble de trois groupes sont constitués de structures de tailles identiques x (1 sur ce graphique). Ils ont été créés pour simuler respectivement une structure peu étendue (A), une structure étendue massive (B) et une structure étendue linéaire (C). Dans la première expérience, on imagine un maillage dont la dimension soit égale dans les deux directions à x . Au croisement de chaque maille, on imagine de mettre un cercle si la structure est présente. Il est clair que lors de cette première expérience, l'image obtenue ne permet pas de reconnaître les structures. Le groupe A a été perdu. Le groupe B est détecté mais sa forme est perdue et le groupe C est éclaté en un nombre de sous-groupes. Dans l'expérience suivante, la maille de mesure est choisie à $x/2$. On voit que les trois groupes ont bien été détectés et que leurs formes peuvent être correctement appréciées.

L'outil statistique aura un double intérêt :

- il permet d'interpoler et d'extrapoler entre les points de mesure (procédure rendue obligatoire par les logiciels de représentation de données qui supposent une maille régulière) en fonction de paramètres liés à la structure même des données (le variogramme) et non à des critères géométriques arbitraires (procédures de courbure minimale, fonctions splines, triangulation, etc.),
- il permet de savoir si l'échantillonnage est valide au sens de la théorie du traitement du signal (théorème de Shannon).

Deux niveaux de validation sont possibles : l'étude du variogramme ou la simulation.

1 - Dans l'étude du variogramme que nous allons détailler par la suite, on étudie particulièrement l'ordonnée à l'origine du variogramme. Si celle-ci est voisine de 0, l'échantillonnage est *a priori* adéquat. Dans le cas contraire, soit l'échantillonnage n'est pas assez dense, soit les mesures sont bruitées.

2 - Dans les simulations, il est possible de prédire les valeurs en un ensemble de points et de comparer les estimations aux valeurs mesurées (les points auront été au préalable enlevés de la statistique de départ). Ceci nous permettra de tester éventuellement différentes stratégies d'échantillonnage et/ou de tester différents interpolateurs.

Outils statistiques

Nous avons utilisé deux outils géostatistiques utilisant la théorie des variables régionalisées et disponibles sur le marché : GEOEAS (Englund et Sparks, 1991) et VARIOWIN (Pannatier, 1996).

GEOEAS (Geostatistical Environmental Assessment Software, EPA, version 1.2.1) est un logiciel du domaine public (on peut le copier et le distribuer librement, adresse internet : www-sst.unil-ch/ftp/geostat/geoeas.zip et documentation : [geopdf.zip](http://www-sst.unil-ch/ftp/geostat/geopdf.zip)) fourni avec une documentation

importante. Il correspond sous une interface un peu démodée maintenant (Menus sous DOS) à un ensemble de programmes pour effectuer des analyses géostatistiques sur des données spatiales en 2 dimensions. Il est limité à un maximum de 1000 données et possède aussi une limite sur le nombre de paires pour calculer le variogramme.

VAROWIN est une version commerciale de GEO-EAS sous Windows. Il a été développé suite aux travaux de la thèse de Pannatier à Lausanne et est vendue avec un livre (Pannatier, 1996) (adresse : www.springer-ny.com/ordernew.html).

La théorie des variables régionalisées (Matheron, 1965 ; Note de l'Ecole des Mines, 1972) est basée sur l'analyse des variogrammes qui traduisent le degré de corrélation spatiale des points de mesure les uns par rapport aux autres en fonction de leurs distances. De la connaissance de cette fonction, on peut en déduire une série de poids (krigeage) qui permettront de calculer la valeur en des points non mesurés au départ. Ce rééchantillonnage sera nécessaire pour produire des grilles de mesures régulières par exemple (la plupart des logiciels de représentation de données nécessitent des grilles carrées).

L'étape la plus importante est le calcul du variogramme et plus exactement les coefficients liés au modèle qui s'adaptera le mieux aux données du variogramme expérimental. Le variogramme est un graphe qui représente le demi-écart quadratique moyen de couples de points en fonction de leur éloignement (distance h). Le variogramme est caractérisé généralement par trois paramètres : l'effet de pépité (« nugget ») qui représente la variance quand $h=0$, la portée (« range ») ou distance au-delà de laquelle la variance entre couples de points ne croît plus, le palier (« sill ») qui représente la valeur de la variance après le palier. On peut expliquer intuitivement ces paramètres du variogramme : lorsque la distance h entre deux points tend vers zéro, la différence de valeurs entre ces mêmes points doit tendre elle-même vers zéro si les mesures sont cohérentes. L'effet de pépité est alors nul. Si la valeur est non nulle cela peut provenir de deux raisons : soit les mesures sont entachées d'erreur (*i.e.* deux mesures faites au même endroit peuvent ne pas être identiques), soit l'échantillonnage des points ayant servi à calculer l'ensemble des points du variogramme n'est pas « correct » et il existe des variations à des échelles spatiales inférieures au pas de mesure des données, on parle alors de micro-variance.

A priori, la variance des données croît avec la distance entre les points (*i.e.* plus on s'éloigne d'un point, plus la probabilité que la mesure soit différente augmente). Ceci n'est valable que jusqu'à une distance h appelée portée. Au-delà de cette valeur, les valeurs sont complètement décorréliées (*i.e.* on ne peut plus prédire leur valeur). Le variogramme atteint alors son ordonnée maximale, le palier.

Le calcul du variogramme est assez complexe et n'est en pratique qu'approché. En effet, la distance entre les points varie de façon discontinue et on a l'habitude de regrouper les points en classe de distance (« lag »). Le variogramme est alors calculé pour tous les ensembles de points (« paires ») dont l'interdistance est comprise entre le min et le max de la classe. Le choix du nombre de classes et de la distance (« lag spacing ») d'une classe peut donc faire varier la forme du variogramme. En règle pratique, il faut choisir un variogramme qui soit le plus « robuste » possible en fonction du choix des classes. De manière pratique, on remarque que les estimations

sur les points krigés ne varieront que peu en fonction du choix du variogramme. Le dernier paramètre important lors du krigeage est le choix de la zone d'influence (« local search neighborhood ») c'est-à-dire le nombre de points, la distance et éventuellement la direction des points qui participent au calcul de la valeur krigée.

5 - RÉSULTATS

5.1 - GÉOPHYSIQUE

Sur la figure 4, l'implantation de chacun des points de mesure a été reportée. Ils ont été acquis selon 7 profils longitudinaux de 1050 m (direction N245) ainsi que selon 23 profils transversaux (direction N155) de 300 m de long. Ceci représente un ensemble de 1349 mesures (il a été admis pour le tracé des plans que la bande des 300 mètres est localement droite sur la longueur du bois (erreur maximale de 30 m)). Les seuls points qui n'ont pu être mesurés correspondent à l'emplacement d'une marnière (PK58,2) ainsi qu'à l'extrémité Est du lac des Ferrys.

Les données de susceptibilité peuvent être regroupées en un ensemble cohérent de 4 anomalies principales (nous reviendrons après sur les détails de tracé de cette carte).

Le groupe A correspond à un ferrier peu visible en surface. Il est recouvert dans sa presque totalité par une plantation récente de pin. C'est le seul ferrier en rive droite du Vernisson. Il a une forme rectangulaire bien marquée. Sa limite Est est très claire sur le terrain et correspond à un léger ressaut du terrain. La limite Ouest semble être recoupée par le lac, ce qui pose le problème de l'antériorité de ce ferrier par rapport au lac. La limite Nord coïncide avec la berge du Vernisson. La limite Sud est située dans un champ (les deux « pointes »). Nous avons limité dans un premier temps la prospection à la seule surface boisée, aucun indice visuel n'étant visible dans le champ en bordure. Quand ce ferrier fut découvert et cartographié, nous avons inclus par précaution toute la surface du champ dans la prospection. Ceci nous a per-

mis de trouver l'extension du ferrier vers le Sud, ... et de suppléer à la défaillance de notre première estimation visuelle ! Le labour du champ a en effet très certainement étalé beaucoup les restes du ferrier et a eu pour conséquence de diminuer la susceptibilité qui est en effet un peu plus faible ici qu'au centre du ferrier dans le bois. Un trésor monétaire aurait été trouvé dans ce ferrier (Mme de Chasseval, comm. personnelle).

Il semblerait qu'il y ait presque continuité entre le ferrier A et le groupe que forment B et C. Peu d'éléments sont visibles au sol. Il faut dire qu'à l'œil nu, de nombreuses petites scories (<1 cm) sont disséminées sur plusieurs hectares et il est impossible de délimiter visuellement des vestiges. La mesure magnétique a permis par contre de visualiser ce « pont » entre les anomalies avec une concentration faible, mais nette, de la susceptibilité vers le PK58,35.

Le groupe B, C forme un ensemble très clair. Au sol, C correspond à un ensemble de ferriers emboîtés. C'est l'ensemble le plus visible sur toute la surface prospectée. Nous avons estimé à plus de sept mètres l'épaisseur de scories à cet endroit. Le ferrier B a été arasé à plusieurs reprises (chemins, champs) et est difficilement visible à l'œil nu. Sur la carte magnétique, il correspond à une structure plus ou moins circulaire bien délimitée d'au moins un hectare. Nous y avons observé, à la faveur d'un endroit excavé, des structures rubéfiées avec une stratigraphie en place...

Enfin le groupe D est bien délimité et semble séparé des autres ferriers. Sa surface est importante et il est clair qu'il s'étend plus à l'Ouest que la limite de la bande des 300 mètres.

Les quelques points isolés autour correspondent à des ensembles trop ponctuels pour pouvoir être interprétés. Ils correspondent parfois à des recharges par des scories des zones effondrées des chemins. Seule l'anomalie au PK57,65 et sur l'axe de l'autoroute reste à signaler. Elle ne correspond pas visiblement au système des ferriers et pourrait correspondre à d'autres types de vestiges archéologiques (tuilerie ?).

Fig. 4 : Implantation des points de mesure sur la bande des 300 mètres.

5.2 - ÉTUDE DE LA VALIDITÉ DE L'ÉCHANTILLONNAGE

5.2.1 - Variogrammes

Les variogrammes ont été calculés avec le logiciel VarioWin qui présente l'intérêt de ne pas posséder de limites en terme de nombre de points et de nombre de paires. Par contre, à l'inverse de GeoEAS, il ne sait pas traiter les points doubles. Comme nous avons effectué la prospection dans les deux directions, nous avons une centaine de points géographiquement équivalents.

Dans un premier temps, nous avons tracé (fig. 6) un graphe de corrélation entre les mesures prises dans le sens de l'axe de l'autoroute et les mesures effectuées quelques jours après dans le sens perpendiculaire. Deux concentrations sont bien visibles correspondant d'une part aux faibles susceptibilités (moins de $100 \cdot 10^{-5} \text{ uSI}$) caractérisant le «niveau de fond géologique» et d'autre part les très fortes susceptibilités (plus de $500 \cdot 10^{-5} \text{ uSI}$) caractérisant les ferriers (la variance plus faible de cette classe est liée uniquement à la saturation de l'appareil de mesure). La droite de corrélation a une pente de 1,11 et une ordonnée de 34 ($R=0.84$). En forçant la droite à passer par l'origine, la pente devient égale à 1,0 (ligne pointillée).

La différence de mesure entre les deux directions est donc très faible. Nous sommes de toute façon dans les limites de détection de cet appareil puisque le prospecteur a du mal sur le terrain à estimer à mieux que $30 \cdot 10^{-5} \text{ uSI}$. A cette incertitude, peut s'ajouter une dérive instrumentale du zéro de l'appareil commune à tous les appareils électromagnétiques. De plus, il est très difficile dans un bois de faire une mesure exactement au même endroit plusieurs jours après... Nous considérerons donc que la droite passe par l'origine et que la réponse est cohérente entre les deux directions (pente de 1.0). En conséquence, nous avons moyenné les points obtenus dans les deux directions afin d'éliminer tous les points doubles et pouvoir calculer les variogrammes avec VarioWin.

Fig. 5 : Carte des susceptibilités magnétiques sur la bande des 300 mètres.

Fig. 6 : Corrélation des mesures de susceptibilité entre les profils parallèles et transversaux.

Un des paramètres importants dans le calcul du variogramme est le choix des classes de distance. La forme du variogramme calculé peut changer en fonction du choix de la distance entre les classes. Par exemple, il faut éviter d'avoir des classes de distance («lag spacing») pour lesquelles le nombre de points intervenant dans le calcul de la variance soit trop faible. Il est donc plus prudent de changer la taille des classes afin de vérifier la «stabilité» de la forme d'un variogramme calculé. Cet effet sera présent malheureusement sur toutes les données issues d'un maillage très anisotrope : les premières classes refléteront la variance le long des profils, mais la classe pour laquelle la distance sera proche de celle entre profils verra son effectif nécessairement différent des classes voisines. Sur la figure 7, nous avons présenté le variogramme obtenu à partir de tous les points mesurés dans le sens parallèle à l'axe de l'autoroute pour des intervalles de distance de 10 et de 20 m. L'effet de taille des classes est nettement visible sur la classe à 100 et 150 mètres. On peut minimiser cet effet en choisissant des tailles de classe qui ne soient pas des sous-multiples de la distance entre profils comme sur la figure 7b (taille de 20 m). On remarquera malgré ceci que la forme du variogramme est identique (modèle sphérique) pour les deux tailles de classe et que les paramètres de portée, de pépité et de palier sont quasi-identiques.

Afin de comparer les échantillonnages, les variogrammes ont été calculés pour les points pris dans le sens perpendiculaires (fig. 8) et enfin en regroupant tous les points (fig. 9).

Les paramètres sont inscrits dans le tableau I.

On remarquera dans un premier temps que le variogramme sur l'ensemble des points a une forme plus proche d'un modèle sphérique théorique et que sa portée est plus importante que pour les variogrammes obtenus seulement avec les points dans une des deux directions.

Dans un second temps, pour comparer ces 3 ensembles de données, une validation croisée («cross-validation») a été calculée. Elle consiste à retirer un à un chacun des points (valeur appelée Z_i) des 3 ensembles de données à calculer d'après le modèle sa valeur Z_i^* (cette phase n'est malheureusement pas réalisée avec VarioWin). Sur la figure 10 est représenté l'histogramme de $(Z_i - Z_i^*)$. Les erreurs ont été représentées graphiquement par des cercles proportionnels sur la figure 11 et le tableau II résume quelques variables statistiques de cette population. Les erreurs maximales sont bien évidemment dans les zones frontalières des anomalies, là où la prédiction est la moins fiable.

L'échantillonnage selon le sens longitudinal semble au vu de ces derniers tableaux donner les résultats les plus intéressants (écart-type le plus faible, histogramme le plus symétrique et le plus centré pour la validation croisée, effet de pépité le plus faible pour le variogramme).

Nous avons alors interpolé par krigeage les 3 ensembles de données pour créer une maille régulière de 10x10 m (fig. 12, N=Pépité, P=Portée, S=palier). Les paramètres utilisés sont ceux des variogrammes du tableau I. Nous retrouvons les effets classiques liés à une prospection avec une maille rectangulaire : élongation des anomalies dans le sens des profils et meilleure définition des anomalies dans le sens perpendiculaire au profil que dans le sens perpendiculaire. Comme les anomalies sont allongées dans le sens des profils transverses, nous pensons que les statistiques qui favorisaient les profils longitudinaux sont plus liées à la direction des structures recherchées qu'à un pur effet de géométrie par rapport à l'axe du projet. Il n'en reste pas moins, qu'il est α

Variogramme de la Susceptibilité (profils paral.)
Modèle sphérique, lag de 10m
Nugget=960; Range=130m; Sill=25000

Variogramme de la Susceptibilité (profils par.)
Modèle sphérique, lag de 20m
Nugget=1500; Range=148m; Sill=25000

Fig. 7 : Variogramme pour les profils parallèles A- lag de 10 m ; B- lag de 20m.

priori plus facile d'implanter et de mesurer sur de longs profils que sur des profil plus courts... La figure 12c obtenue avec tous les points possède le plus de hautes fréquences et permet la meilleure délimitation des structures.

En résumé, pour les structures recherchées, nous pensons que le temps pris à effectuer les profils longitudinaux ne peut être compensé par un gain d'information dans le même rapport. Les profils longitudinaux étaient suffisants pour la détection et la cartographie des principaux groupes métallurgiques (cf. §5.2.2). Ceci est d'autant plus vrai que les dérives des appareils électro-magnétiques, ainsi que les problèmes de positionnement dans les sous-bois risquent de poser plus de problèmes que d'en résoudre quand on essaye d'additionner les informations prises selon deux types d'axe...

À titre de comparaison, nous avons tracé à partir du même jeu de données la carte de susceptibilité en utilisant un autre interpolateur exact et très utilisé : l'algorithme de courbure minimale («minimum curvature»). Il reste clair que la carte obtenue présente un aspect visuel moins «plaisant» que la carte obtenue avec krigeage. Ceci est lié clairement à une moins bonne prise en considération d'information à grande distance (grande longueur

Variogramme de la Susceptibilité (profils perp.)
Modèle sphérique, lag de 10m
Nugget= 3700; Range=139m; Sill=38000

Variogramme de la Susceptibilité (profils perp.)
Modèle sphérique, lag de 20m
Nugget=3650; Range= 138m; Sill=38000

Fig. 8 : Variogramme pour les profils transverses pour un lag de 20.

d'onde) et à un poids trop important donnés aux points locaux introduisant un bruit haute fréquence. Le krigeage est donc un interpolateur à privilégier lors de mesures sur des mailles rectangulaires.

5.2.2 - Simulations

Dans un dernier temps, nous avons effectué un ensemble de simulations afin de confirmer l'intérêt de l'usage du krigeage et de déterminer pour notre ensemble de données ce qu'aurait été la carte dans le cas de différentes stratégies d'échantillonnage.

Variogramme de la Susceptibilité (tous les points)
Modèle sphérique, lag de 10m
Nugget=4500; Range=163m; Sill=32000

Fig. 9 : Variogramme incluant tous les points.

Nous avons enlevé des données tous les points correspondant au profil situé à $y = -50$ m (ce profil a été choisi car il recoupait toutes les structures détectées). Le variogramme a été recalculé et est proche du variogramme calculé avec tous les points (1187 points, pépite de 3500, portée de 150 m et plateau de 32000). Les valeurs krigées ont alors été comparées aux valeurs réelles (courbe supérieure) ainsi qu'aux valeurs calculées par un algorithme de courbure minimale (courbe pointillée inférieure, fig. 14). Il est clair qu'en dehors des anomalies dues aux ferriers, les deux algorithmes sont aussi bons, mais que les erreurs sont maximales sur les frontières d'anomalies, ce que nous avions déjà remarqué sur la validation croisée figure 11. On remarquera surtout que les erreurs sont plus importantes pour les valeurs déduites par l'algorithme de la courbure minimale.

Enfin, nous avons voulu tester l'échantillonnage le long du profil en ne prenant qu'un point sur 2 ou 5, ce qui équivaudrait à une maille de mesure de 20×50 ou 50×50 m sur le terrain. Nous avons représenté figure 15 sous forme de pixels les mesures afin d'éviter le lissage introduit par les logiciels de représentation de données.

Pour chacune des cartes, le variogramme a été calculé et l'interpolation sur une maille carrée effectuée à partir du modèle issu du variogramme (tab. III).

On remarquera la stabilité des paramètres des différents variogrammes, en particulier la portée, et même un curieux effet de pépite nul pour l'échantillonnage le plus grand. Il faut donc rester prudent quant à l'interprétation de l'effet de pépite, et ne pas déduire la validité d'un ensemble de mesures et de l'échantillonnage correspondant, uniquement à partir de l'effet de pépite.

	Profils longitudinaux	Profils transverses	Tous les points
Nombre de points	679	770	1291
Nombre de paires	230 181	296 065	832 695
Modèle	Sphérique	Sphérique	Sphérique
Pépite ($\cdot 10^{-10} \text{ uSI}^2$)	960	3700	4500
Portée (m)	130	139	163
Palier ($\cdot 10^{-10} \text{ uSI}^2$)	24000	34000	31500

Tab. I : Paramètres des variogrammes pour les différentes populations de points.

Fig. 10 : Histogramme de la validation croisée des points (modèle de la fig. 9).

	Profils longitudinaux	Profils transverses	Tous les points*
Nombre de points	679	770	985
Moyenne (. 10^{-3} uSI)	0.4	0.3	0.5
Médiane(. 10^{-3} uSI)	0.4	1.3	2.3
Quartile 25%(. 10^{-3} uSI)	-13	-14	-22
Quartile 75%(. 10^{-3} uSI)	+14	+20	27
Ecart-type(. 10^{-3} uSI)	67	78	81

(* : nous nous sommes limités à la zone entre -140 et +140 pour des problèmes logiciels, mais nous avons vérifié que le variogramme est identique entre cette population et celle incluant tous les points).

Tab. II : Paramètres statistiques de l'erreur de cross-validation ($Z - Z^*$).

Fig. 11 : Représentation par cercles proportionnels de l'erreur de validation croisée.

Longitudinal - Krigeage Sphé (N=960, P=130, S=24040)

Transversal - Krigeage Sphé (N=3700, P=139, S=34300)

Total - Krigeage Sphé (N=4480, P=163, S=31520)

Fig. 12 : Cartes de susceptibilités obtenues par krigeage à partir : A- des profils parallèles, B- des profils transverses, C- de tous les points.

	Maille de mesure (10x50)	(20 x 50)	(50 x 50)
Nombre de points	679	335	139
Nombre de paires	230 181	55945	9591
Modèle	Sphérique	Sphérique	Sphérique
Pépite ($\cdot 10^{-10} \text{ uSI}^2$)	960	960	0
Portée (m)	130	133	130
Palier ($\cdot 10^{-10} \text{ uSI}^2$)	24000	25000	26000

Tab. III : Paramètres des variogrammes pour différentes mailles.

	Maille de mesure (10x50)	(20 x 50)	(50 x 50)
Nombre de points	679	335	139
Moyenne ($\cdot 10^{-5} \text{ uSI}$)	0.4	0.4	1.9
Médiane ($\cdot 10^{-5} \text{ uSI}$)	0.4	1.5	6.0
Quartile 25% ($\cdot 10^{-5} \text{ uSI}$)	-13	-14	-30
Quartile 75% ($\cdot 10^{-5} \text{ uSI}$)	+14	+21	+47
Ecart-type ($\cdot 10^{-5} \text{ uSI}$)	67	77	117

Tab. IV : Paramètres statistiques de l'erreur de validation croisée ($Z - Z^*$) en fonction de la maille.

Fig. 13 : Carte de susceptibilité obtenue par courbure minimale (tous les points).

Fig. 14 : Valeur prédite par krigeage (A), par courbure minimale (B) et valeur mesurée (C) pour le profil $y = -50$.

Dans le dernier tableau, nous avons effectué la validation croisée des 3 ensembles de données (tab. IV).

Les résultats sont ici plus parlants en terme de choix du pas de mesure. On remarquera la dissymétrie de plus en plus grande (moyenne et médiane différentes et non nulles, quartiles non symétriques) et un écart-type de plus en plus important.

Lorsque la taille de la maille augmente, nous pensons que le choix du maillage trouve ici un critère plus solide que par les paramètres directs du variogramme. En particulier l'écart-type de la validation croisée ou mieux la distance entre les quartiles 25 et 75 % par exemple, peuvent servir de critère de choix pour la maille de mesure en fonction de la précision de mesure des données. Il est peu différent pour les mailles de 10 et 20 mètres mais croît très vite pour des mailles plus importantes. Avec une erreur de mesure de l'ordre de 34 (estimée à la fois par l'opérateur sur le terrain et par l'ordonnée à l'origine de la figure 6), nous pensons qu'une maille de 20x50 aurait été suffisante (distance interquartile de 35).

Fig. 15 : Simulations d'échantillonnage par décimation des profils longitudinaux et en utilisant une interpolation par krigeage. A- Données originelles (points 10x50, grille 10x10), un point sur 2 (20x50, grille 20x20), C- un point sur 5 grille (50x50, grille 50x50).

6 - CONCLUSIONS

En résumé, la cartographie de la susceptibilité magnétique a permis de détecter et de cartographier quatre ensemble de ferriers qui s'étendent sur toute la largeur de la bande des 300 mètres et même au-delà pour certains d'entre eux. Cette cartographie a été faite en moins d'une semaine malgré des circonstances défavorables (sous-bois dense et pluie continue) et la première carte des vestiges transmise à la direction de SAPRR dans les mêmes délais. La fouille des ferriers est une opération longue, coûteuse et difficile. A la fois pour cette raison et dans le cadre de la préservation de cet ensemble de sites, la SAPRR a décidé de modifier le tracé initial de l'autoroute et de le faire passer plus à l'est. Cet exemple d'interaction sans fouilles entre un aménageur et un prospecteur est à ce jour unique et a permis la sauvegarde d'une partie du site.

L'autre volet de ce travail, plus méthodologique, visait à définir une stratégie en terme d'échantillonnage spatial de la susceptibilité, et plus exactement à définir une stratégie à maille large pour tous les travaux dits «linéaires» (TGV, autoroutes, routes). Les conclusions en terme de taille minimale que nous avons pu déduire de l'étude géostatistique ne sont *a priori* valables que pour le type de structures et les tailles rencontrées dans cette portion de l'autoroute A77. Il n'en reste pas moins que l'outil géostatistique a permis de montrer par exemple l'intérêt du krigeage par rapport à d'autres algorithmes d'interpolation dans le cas de mailles anisotropes. Cette stratégie a été depuis lors appliquée à plusieurs chantiers autoroutiers (A77 Sud, A89 et A66).

Dans un second temps, nous avons par des simulations essayé de trouver un critère pour estimer la qualité d'un échantillonnage par rapport à un autre : le calcul de la distance entre les quartiles à 25 et 75 % de la validation

croisée de la carte krigée nous a permis d'estimer la qualité de l'échantillonnage en fonction du seuil de bruit de la mesure. Nous avons proposé que cette distance inter-quartile soit plus petite ou au plus égale au bruit de la mesure. Ce bruit de mesure doit donc être estimé sur le terrain par des mesures en un même point à plusieurs jours d'intervalle (bruit instrumental), mais aussi par recoupement de mesures sur un même point (permet d'intégrer l'erreur de topographie inévitable pour les mailles larges).

Dans le cas de la Bussière, l'échantillonnage dans une seule direction (profils parallèles à l'axe de l'autoroute) tous les 20m pour des profils tous les 50 m aurait été suffisant. Le gain de temps aurait été d'un facteur 4 (335 mesures par rapport aux 1291 effectivement prises).

Au-delà de l'aspect géostatistique, il est difficile de quantifier la perte d'information entre les différentes cartes surtout si l'on se place du côté de l'interpréteur car, au-delà du « confort visuel », se reposent toujours les deux mêmes questions : 1- La détection des structures, 2- leur cartographie. Si l'on adopte le premier point de vue, la maille de 50x50 était suffisante, ce qui était évident puisque les structures sont bien plus grandes. Si l'on adopte le second, intervient nécessairement le facteur de « qualité » de tel ou tel détail qui sera crucial pour le prospecteur et pour l'archéologue, comme l'est par exemple dans une fouille un objet isolé mais permettant le calage de toute une stratigraphie. Ceci revient dans notre cas à ne pas attribuer le même poids à chaque pixel de notre carte. Mais ceci est plus du ressort de l'interpréteur que du géophysicien... et il faut bien admettre alors que c'est alors l'expérience de l'interpréteur qui est prépondérante.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier la SAPRR (Société des Autoroutes Paris-Rhin-Rhône, concessionnaire de l'A77) pour avoir financé cette opération et tout particulièrement M. Pinochet et Mme Frère-Sautot pour les fructueux échanges d'idées. Une partie de cette étude n'aurait pas été possible sans le prêt des documents de Scetauroute (Melle Le Goff et M. Louvel), ainsi que les connaissances de prospection dont j'ai pu bénéficier auprès de M. Hesse depuis de longues années.

Ont participé au terrain : F. Tixier, géologue et A. Carissimo, géophysicien sous la responsabilité de M. Dabas.

Nous ne saurions oublier Mme de Chasseval, propriétaire des terres de la Bussière.

BIBLIOGRAPHIE

- DABAS, M., HESSE, A. et JOLIVET, A., 1987 - *Premiers résultats géophysiques et perspectives pour l'exploration géophysique des sites métallurgiques médiévaux de Minot (Côte-d'Or)*, p. 129-144, Paris, ed. C.T.H.S., 153 p.
- DABAS, M., 1989 - *Comportement magnétique des sols dans le domaine fréquentiel et temporel. Application à la prospection de sites archéologiques*. Thèse Université Paris VI, 274 p.
- DABAS, M., HERBICH, T. et MISIEWICKZ, K., 1993 - Apport de la prospection électromagnétique à l'étude du site métallurgique de Milanówek, *Archaeologia Polona*, 31, 51-70.

- DABAS, M., CHERY, P. et VOLTZ, M., 1995 - Epaisseur de la couverture de sol et prospection géophysique par méthode électrique : étude de cas en Petite Beauce, *Géologues*, 109, 17-23.
- DABAS, M., 1998 - La prospection géophysique, in *La Prospection*, collection « Archéologiques » sous la direction de A. Ferdière, eds. Errance.
- DUNIKOWSKI, C. et CABBOT, S., 1995 - La Sidérurgie chez les Senons : les ateliers celtiques et gallo-romains des Clérimois (Yonne). *DAF*, 51, 181 p.
- ENGLUND, E. et SPARKS, A., 1991 - GEO-EAS 1.1.1, *Geostatistical environmental assessment software, User's guide* ; EPA (Environmental Monitoring Systems laboratory), Office of Research and development, U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada 89119, 184 p.
- HESSE, A., AUBIN, C., THOMPSON, J. et JORDAN, D., 1982 - Electromagnetic survey on the Gallo-roman pottery workshop of Jaulges-Villers-Vieux. 22nd Int. Symposium on Archaeometry, Bradford, March 30-April 3, 1982, Abstracts, Bradford University, 1 p.
- HESSE, A., 1998 - Multi-parametric survey for archaeology : how and why, or how and why not ? In *Abstracts of the 1st International workshop « Electric, magnetic and electromagnetic methods applied to cultural heritage »*, Ostuni, Italy, 29 Sept. 1998.
- MANGIN, M., KOESMANN, I., BIRKE, W. et PLOQUIN, A., 1992 - *Mine et Métallurgie chez les Eduens*, Ann. Litt. de l'Université de Besançon, 363 p.
- MANGIN, M., 1994 - *La sidérurgie ancienne de l'est de la France dans son contexte européen*, Ann. Litt. de l'Université de Besançon, 424 p.
- MANGIN, M., KOESMANN, I., BIRKE, W. et PLOQUIN, A., 1992 - *Mine et métallurgie chez les Eduens*, Ann. Litt. de l'Univ. de Besançon, 364 p.
- MANGIN, M., PLOQUIN, A., FLUZIN, P. et FORRIERES, C., 1994 - Les thèmes de recherche dans l'Est de la France, in *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen*, Ann. Litt. de l'Univ. de Besançon, 424 p.
- MATHERON, 1965 - *Les variables régionalisées et leur estimation*, Thèse, Masson ed. (épuisé).
- Note interne de l'Ecole des Mines, 1972 - *La théorie des variables régionalisées et ses applications*.
- PANNATIER, Y., 1996 - *VARIOWIN : Software for Spatial Data Analysis in 2D*, Springer-Verlag, New York, USA.
- PARCHAS, C. et TABBAGH, A., 1978 - Simultaneous measurements of electrical conductivity and magnetic susceptibility of the ground in electromagnetic prospecting. *Archaeophysics*, 10, 682-691.
- SCOLLAR, I., TABBAGH, A., HESSE, A. and HERZOG, A., 1990 - *Archaeological prospecting and remote sensing. Topics in remote Sensing 2*. Cambridge University Press, London, 674 p.
- TABBAGH, A., 1974 - Méthodes de prospection électromagnétique applicables aux problèmes archéologiques, *Archaeophysics*, 5, 351-437.
- TABBAGH, A., 1982 - L'interprétation des données en prospection électromagnétique avec les appareils SH3 et EM15, *Revue d'Archéométrie*, 6, 1-11.
- TABBAGH, A., 1986 - Applications and advantages of the Slingram electromagnetic method for archaeological prospecting, *Geophysics*, 51, 576-584.
- TITE, M.S. et MULLINS, C.E., 1970 - Electromagnetic prospecting on archaeological sites using a soil conductivity meter, *Archaeometry*, 12, 1, 97-104.