Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Band: 86 (1998-1999)

Heft: 2

Artikel: Prospection géophysique de deux tronçons de voies anciennes du Plateau vaudois

Autor: Gex, Pierre

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-281118

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 27.11.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat. 86.2: 89-115. ISSN 0037-9603

Prospection géophysique de deux tronçons de voies anciennes du Plateau vaudois

par

Pierre GEX[1]

Abstract.–GEX P., 1998. Geophysical prospection of two sections of ancient roads of the Plateau vaudois, Switzerland. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 86.2*: 89-115.
Geophysical prospecting methods can provide valuable information for archaeological site surveys provided that physical contrast exists between the structures and their surrounding terrain. Under such conditions, electrical, magnetic or electromagnetic methods allow archaeological remains to be located from the surface and their lateral extension can be delineated with no soil disturbance. Reconnaissance of ancient roads of the Roman period or later, visible on some aerial photographs of the Plateau vaudois, is a task well suited to geophysical prospecting. The paper presents a brief description of the resistivity instrumentation designed especially for archaeological prospecting. The Wenner (AB=3 m) and the pole-pole (AM=1 m) arrays were carried out during the survey. The conductivity meter EM-31 was also tested on a profile. The results confirm the presence of the ancient roads described or illustrated in local archaeological literature. At one site, the presence of a road was able to be verified through the inspection of a canalisation trench. Comparisons are made with some other examples of Roman roads detected by comparable resistivity methods. Model tank experiments were also conducted in order to compare the geophysical response with field results, and good agreement was found. The methodology developed in this study seems efficient and well adapted to the detection of ancient roads and should prove a valuable tool in further field investigations.

Keywords: Geophysical prospection, archaeological prospection, resistivity methods, ancient roads, Roman roads.

[1]Institut de Géophysique, Université de Lausanne, CP, CH-1015 Lausanne
E-mail: Pierre.Gex@ig.unil.ch

CODEN: BSVAA6

© Société vaudoise des Sciences naturelles
Droits de reproduction réservés

Résumé.—GEX P., 1998. Prospection géophysique de deux tronçons de voies anciennes du Plateau vaudois. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 86.2*: 89-115.
La prospection géophysique appliquée à l'archéologie peut apporter des résultats importants à la reconnaissance de certains sites, pour autant qu'un contraste physique suffisant existe entre les structures à rechercher et le sous-sol environnant. L'application de différentes méthodes, notamment la résistivité électrique, le magnétisme ou encore les méthodes électromagnétiques, permettent à partir de la surface, sans perturber le sous-sol, de se faire une idée de la localisation des vestiges en présence, de confirmer ou d'infirmer leur extension dans le terrain. Le problème de la reconnaissance des anciennes voies de communication, notamment des segments de routes, peut-être romaines, qu'on retrouve en plusieurs endroits du Plateau vaudois, souvent grâce à la photographie aérienne, semble se prêter favorablement à la prospection géophysique. L'article présenté, après une description d'un matériel de mesures électriques spécialement développé pour la prospection archéologique, permet de confirmer par la méthode de résistivité la présence de plusieurs tronçons de routes décrits ou illustrés dans la littérature, aux environs de Granges-Marnand dans la Broye, ainsi que dans la zone Orny-Entreroches-Eclépens. Les dispositifs Wenner (AB=3 m) et pôle-pôle (AM=1 m) ont été appliqués et un essai à l'aide du conductivimètre électromagnétique EM-31 a également été tenté. Sur l'un des sites, une fouille destinée à la pose d'une conduite a permis une vérification *in situ* de la présence d'une route. Les anomalies de résistivités relevées concordent parfaitement avec d'autres exemples de la littérature. Enfin, un essai de modélisation en cuve analogique a fourni des résultats en bon accord avec les mesures de terrain. La méthodologie développée dans cette étude devrait encourager son application à la problématique des routes anciennes et fournir un outil de vérification de certaines hypothèses d'itinéraires.
Mots-clés: Prospection géophysique, prospection archéologique, méthodes de résistivités, routes anciennes, voies romaines.

1. Introduction

La première application d'une méthode géophysique à un problème de prospection archéologique est due à l'Anglais R. Atkinson. En 1946, il eut l'idée d'utiliser la méthode de résistivité électrique, alors couramment pratiquée lors d'études géologiques et de génie civil, à l'étude du site préhistorique de Dorchester-on-Thames, non loin d'Oxford. Le succès de cette prospection, réalisée avec un matériel encore rudimentaire, donna une impulsion décisive à ce genre de recherches et montra tout l'intérêt qu'on pouvait tirer de l'étude géophysique, rapide et non destructive, des sites historiques prometteurs, souvent d'ailleurs repérés par photographie aérienne.

Les progrès techniques des années 50 et 60, notamment l'apparition des circuits transistorisés, permit un bond en avant du matériel de mesures et également la construction en 1958 par M. J. Aitken, aussi pionnier en la matière, du premier magnétomètre à protons, appareil qui allait devenir l'un des plus utilisés en prospection archéométrique (Aitken *et al.* 1958, Clark 1996). Quelques années plus tard, en Allemagne, I. Scollar construisit son propre magnétomètre et entreprit également de nombreuses études par résistivité. On lui doit encore les premiers traitements informatiques des données, rendus rapidement nécessaires par le grand nombre de mesures acquises sur le terrain lors d'études de détails. Citons enfin les importants travaux de l'Italien M. Lerici, qui appliqua notamment la méthode de résistivité électrique aux grands sites étrusques de Toscane (Tarquinia, Vulci, Cerveteri) et permit la découverte et l'exploration ingénieuse de centaines de tombes (Lerici 1960). Depuis,

les développements techniques des méthodes appliquées à l'archéologie ont suivi tout naturellement ceux des méthodes géophysiques mises en œuvre en sciences de la terre, avec les adaptations nécessaires aux dimensions réduites des vestiges face aux structures géologiques naturelles.

L'application des méthodes géophysiques dans le domaine de la prospection archéologique permet ainsi, sous réserve de conditions favorables, la détection et la délimitation des vestiges enfouis tels que murs, pavages, routes, emplacements de fours, fossés comblés, etc. Le repérage de ces structures n'est évidemment possible que par la présence d'un contraste des paramètres physiques entre la structure recherchée et le terrain environnant. Ainsi, la résistivité électrique (ou la susceptibilité magnétique dans le cas d'une prospection magnétique) doit être différente de celle du milieu encaissant. Si cette condition est nécessaire, elle n'est pas suffisante: il faut que le vestige recherché présente en plus un certain volume par rapport à sa profondeur.

2. Problématique des routes anciennes dans le canton de Vaud

L'intérêt pour les «routes romaines» est déjà ancien dans le canton de Vaud. Dès le début du siècle, les historiens ont recherché patiemment les traces de réseaux routiers, encouragés par les découvertes ou les redécouvertes des bornes milliaires, témoins incontestables de la romanisation des grands axes routiers. Cependant, la reconstitution de certains tracés se heurte souvent à des problèmes, comme par exemple l'incertitude sur la provenance réelle des bornes, souvent retrouvées hors contexte archéologique, et les hypothèses sont nombreuses voire hasardeuses. Citons pour mémoire les articles généraux de Maillefer (1900) et ceux plus spécifiques de Bourgeois (1925, 1927), Kasser (1947), Poget (1950) et les mentions nombreuses de vestiges routiers dans la Carte archéologique du canton de Vaud de Viollier (1927). Cependant, depuis une quinzaine d'années, les connaissances sur le sujet ont subi une profonde évolution. Si les auteurs cités tenaient facilement pour romains beaucoup d'anciens chemins empierrés, parfois taillés dans le rocher comme il est possible d'en voir dans le Jura, ou encore simplement désignés comme «Chemin des Romains» par la tradition locale, la recherche moderne montre une méfiance et une prudence extrêmes dans l'attribution des vestiges de routes aux grands axes classiquement reconnus comme romains.

Avec les études de Mottas (1982, 1986) et plus encore celles de Vion (1989a, 1989b, 1995), la problématique des routes anciennes, romaines ou plus tardives, est devenue un sujet complexe, en «rupture méthodologique» complète avec les travaux anciens. Mentionnons par exemple un aspect important de ce changement d'attitude face aux faits d'observation: la plupart des anciens historiens attachaient une importance primordiale à la toponymie et notamment aux termes «Etraz» et «Vy d'Etraz», si fréquents dans la toponymie vaudoise. Ces expressions dérivent du terme latin *strata* signifiant «voie pourvue d'un revêtement en dur» qui a d'ailleurs influencé également d'autres langues puisqu'on le retrouve sous les formes *Strasse* et *street.* Ainsi, jusqu'il y a peu de temps, les historiens pensaient que toute ancienne route ou chemin portant le nom d'Etraz avait certainement un tracé romain. Cependant, une certaine retenue dans l'attribution d'une origine romaine à une route ancienne ne devrait pas non plus l'exclure *a priori.* Il est probable que bien des axes

routiers anciens révélés par les photos aériennes et par les études historiques peuvent avoir une origine romaine, sans pour autant négliger l'influence des rajeunissements ou des transformations subies par ces routes au cours des siècles suivants. Une datation précise n'est souvent pas possible, faute de trouvaille de matériel.

La recherche actuelle s'appuie sur une approche plus globale, en intégrant des éléments plus nombreux et complexes, avec en particulier la notion de réseau régional et son évolution chronologique. A la vision ancienne de segments de routes, plus ou moins hétéroclites, déterminant un ensemble régional s'oppose la recherche moderne où le réseau acquis au cours du temps prédomine et où peuvent s'insérer des segments de tracés ou d'itinéraires plus anciens reconnus localement.

3. But de l'étude

On sait l'importance de la photographie aérienne pour la prospection archéologique. Dans le cadre du canton de Vaud, de nombreux sites ont été localisés ou découverts par ce moyen et les indices de routes sont parfois spectaculaires. On trouvera dans Francillon et Weidmann (1983) et Francillon (1989) d'excellents aperçus sur l'archéologie aérienne en Suisse ainsi que plusieurs exemples de sites vaudois. A partir des segments de routes visibles sur certains clichés, on pourrait s'attendre de la part des archéologues à une série de vérifications systématiques au sol. Mais, en réalité, la place qu'occupe la fouille archéologique dans la prospection du réseau des routes anciennes est très restreinte. Il faut rappeler en effet que les techniques de fouille et de documentation se sont beaucoup affinées ces dernières décennies et sont devenues par conséquent lentes et coûteuses. Une grande part des investigations archéologiques sont des fouilles d'urgence imposées légalement lors de travaux variés de génie civil tels que pose de canalisation, constructions ou corrections de routes, fondations de bâtiment, etc. Un bon exemple récent est donné par les découvertes de six tronçons de voies sur le tracé de l'autoroute A1 dans la Broye (Boisaubert *et al.* 1998). Les occasions de tomber sur une structure de route ancienne intéressante sont donc relativement rares, et leur dispersion ne permet guère l'étude extensive d'un tracé. Enfin, mettre en œuvre par intérêt purement scientifique une série de sondages systématiques le long d'un axe routier présumé est hors de question par l'ampleur et le coût des travaux nécessaires.

Dans un tel contexte, l'apport de la prospection géophysique peut se révéler d'un grand intérêt: l'implantation de profils et l'acquisition des mesures sont rapides et pratiquement sans emprise sur le terrain. Sur les sites de notre étude, il a d'ailleurs été possible de se restreindre presque partout simplement aux bordures des chemins et routes agricoles, nombreux et souvent pratiques par leur disposition parallèle résultant des remaniements parcellaires.

Le but de notre étude, essentiellement méthodologique, est de montrer qu'il est possible, par un suivi au sol, de confirmer et d'enrichir l'information fournie par la photo aérienne notamment. Les profils géophysiques mesurés, s'il n'ont pas amené, dans l'état actuel de nos recherches, la découverte de nouveaux axes routiers, ont permis de montrer qu'une prospection plus systématique, beaucoup moins coûteuse et contraignante que par fouilles, pourrait être

entreprise avec profit. Par ailleurs, la localisation précise d'éventuels sondages de contrôle pourrait également être facilitée.

4. Choix des sites

La situation des zones prospectées, dont le choix résulte d'une consultation de la littérature et de quelques tests de terrain, est représentée sur la carte de la figure 1.

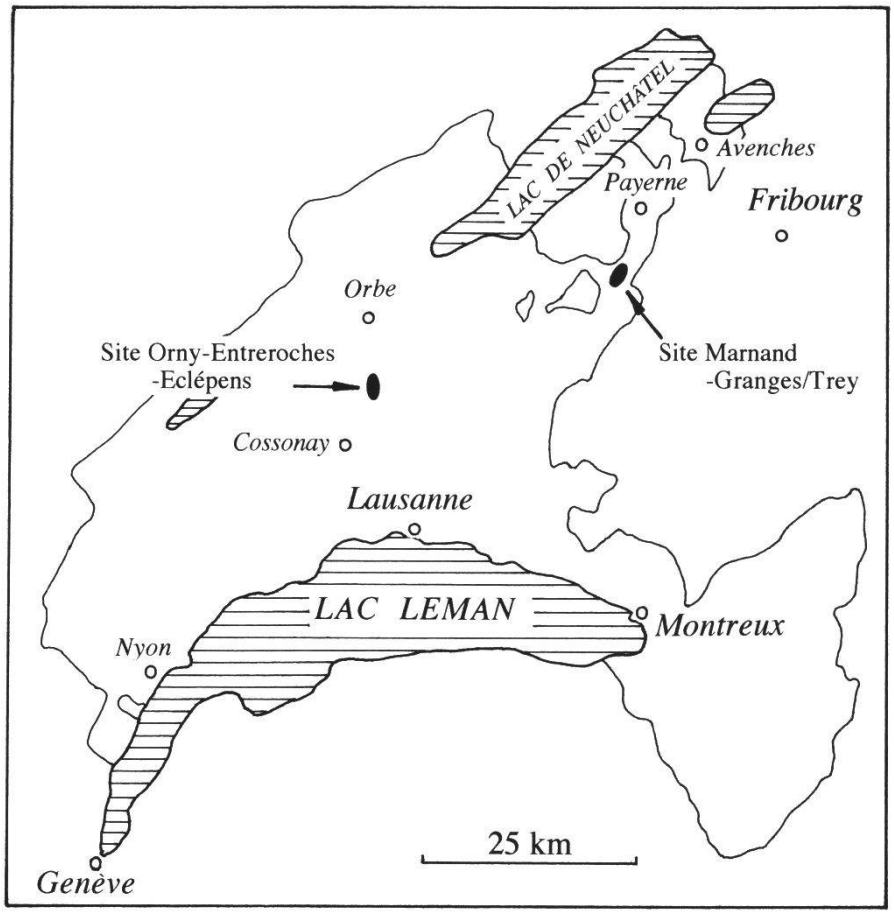

Figure 1.–Carte de situation des deux tronçons de routes étudiés.

4.1. *Site de la zone Marnand-Granges-sous-Trey*

Le passage de cette ancienne route constitue l'un des exemples de prospection aérienne de Francillon et Weidmann (1983, fig. 10, p. 8). Cet axe routier était inconnu jusqu'à l'époque de la prise du cliché en 1979. La photo est d'ailleurs assez spectaculaire (fig. 2) pour mériter de figurer en page de couverture de la revue *Archéologie suisse*. Elle est également reproduite dans Mottas (1982). L'examen de ce document, suffisamment explicite pour permettre facilement son report sur la carte topographique, nous avait incité déjà en 1986 à entreprendre quelques profils d'essai par la méthode de résistivité. Les anomalies relevées avaient montré que la méthode semblait efficace et méritait une application plus systématique.

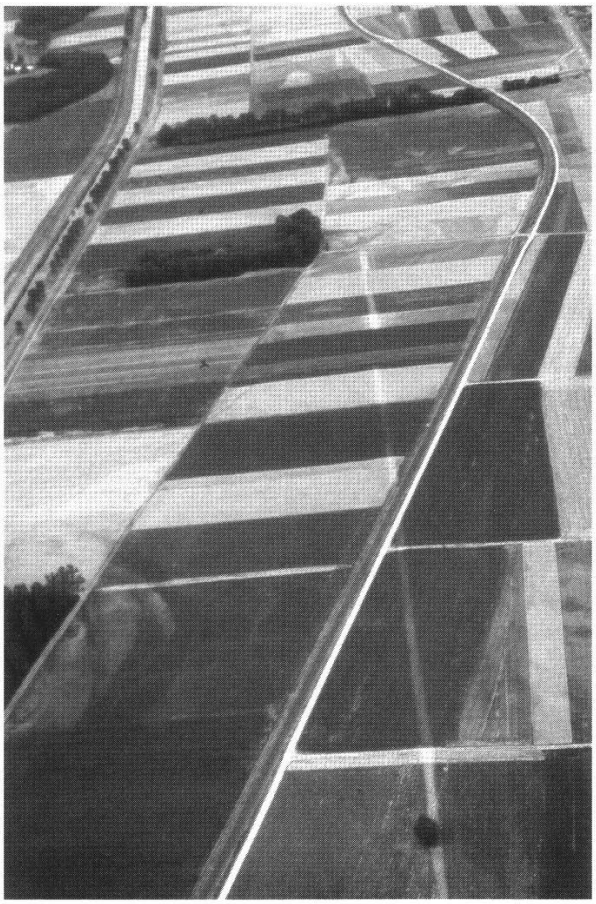

Figure 2.–Vue aérienne du tronçon de route de Marnand-Granges-sous-Trey, prise en direction du NE (photo D. Weidmann, SMHA).

Mentionnons encore que ce tronçon figure sur la feuille au 1:25 000 «Romont» de l'Atlas géologique suisse (WEIDMANN *et al.* 1996).

Dans ce même secteur, une fouille rapide à l'occasion de travaux d'améliorations foncières a permis par chance de relever une coupe de la structure interne de la route, considérée comme très probablement romaine (KLAUSENER 1984). La succession des niveaux, de haut en bas, est la suivante:

1) Terre végétale sur environ 50 cm
2) Niveau de sables et graviers fins sur 5 à 15 cm d'épaisseur
3) Couche de 10 à 20 cm de graviers grossiers à éléments centimétriques
4) Niveau inférieur de gros galets (5 à 10 cm de diamètre) sur 5 à 20 cm
5) Sol vierge constitué de limons et d'argiles à débris de tourbe.

Chaque niveau va s'amincissant vers les bords et, à l'endroit de la fouille, la chaussée mesure 7 m de large. La présence des fossés bordant la voie à quelques mètres, visibles ailleurs sur la photographie aérienne, n'a pas été confirmée dans ce sondage-ci. Ces fossés font habituellement partie de la structure de la route et se retrouvent parfois sur d'autres sites. Enfin, aucune datation de l'ouvrage n'est possible faute de matériel.

Ce type de construction de route se retrouve très fréquemment dans tout l'Empire romain, avec des variantes dues aux conditions de terrains locales et selon l'importance stratégique ou commerciale de la voie. On en trouvera d'autres descriptions dans l'ouvrage général de CHEVALLIER (1997) ou encore dans l'étude plus technique de XEIDAKIS et VARAGOULI (1997).

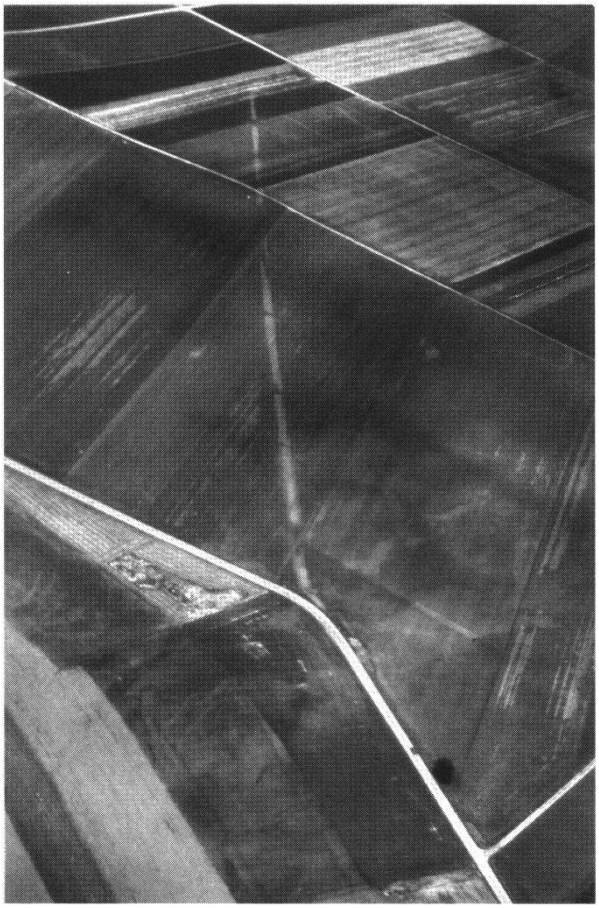

Figure 3.–Vue aérienne du tronçon de route Orny-Entreroches, prise en direction du N (photo D. Weidmann, SMHA).

4.2. *Site de la zone Orny-Entreroches-Eclépens*

Le tronçon de route de la région située à l'E du village d'Orny est illustré par une photographie aérienne dans MOTTAS (1986, fig. 6, p. 126): ce segment d'environ 700 m de longueur débouche à Entreroches, au N du Mormont, obstacle naturel de calcaires du Secondaire que la route romaine traverse à la faveur d'une cluse, pour se poursuivre en ligne droite à travers champs en direction du NW et longer probablement la rive gauche du Nozon vers le N (fig. 3). Enfin, dans une zone située à 1.5 km au SE d'Eclépens, le passage de la même route est bien visible sur près de 400 m sur un cliché commenté par VION (1989, fig. 3, p. 16). D'après l'auteur, il s'agit «*très probablement de la voie romaine passant par* [...] *Entreroches*». Ces segments, comme d'ailleurs ceux décrits ci-dessus, se marquent par une ligne claire rectiligne sur la photographie aérienne.

Lors de l'étude de ce tronçon, nous avons eu la chance exceptionnelle de profiter du creusement d'une fouille pour une conduite de chauffage à distance, perpendiculairement au tracé de la voie et idéalement placé pour confirmer nos anomalies. On verra plus loin les détails de cette découverte.

5. Méthodes et mise en œuvre

Dans nos régions, la structure empierrée de ce genre de route permet l'application de la méthode de résistivité électrique, grâce au contraste prononcé entre les couches de graviers et les terrains environnants. Ces derniers sont formés essentiellement, pour les deux sites étudiés, d'alluvions ou de moraines argileuses. La première couche recouvrant la route n'est la plupart du temps qu'un niveau de terre végétale et de limons d'une épaisseur de l'ordre du mètre ou moins. Les niveaux graveleux représentent ainsi un obstacle au passage du courant électrique par rapport aux terrains encaissant plus conducteurs.

5.1. *Aperçu sur la méthode des résistivités électriques*

Le paramètre résistivité exprime la difficulté plus ou moins grande du passage d'un courant électrique dans un corps conducteur. Dans un sol ou une roche, les particules minérales se comportent normalement comme des isolants. Seule la présence d'eau contenant des ions permet le transport des charges électriques et donc la circulation d'un courant par conduction électrolytique. La résistivité dépend ainsi principalement de la quantité et de la minéralisation de l'eau dans un sol, donc de sa porosité et de son degré de saturation. On comprendra déjà intuitivement qu'un terrain graveleux offrira un chemin plus difficile au passage du courant qu'un sol limoneux ou argileux et sera donc plus résistant électriquement.

Sur le terrain, la méthode consiste à injecter un courant d'intensité I dans le sous-sol au moyen de deux électrodes A et B dont l'écartement détermine la profondeur d'investigation du dispositif. Deux électrodes M et N sont utilisées pour mesurer une différence de potentiel ΔV. Une valeur de la résistivité est obtenue, par application de la loi d'Ohm généralisée à un demi-espace, grâce au quotient $\Delta V/I$ multiplié par un coefficient K dépendant de la disposition géométrique des électrodes. Si le terrain considéré est homogène et isotrope, la valeur mesurée représente sa résistivité vraie, exprimée en ohm-mètre. En présence d'une inhomogénéité, structure archéologique dans notre cas ou variation géologique naturelle, on parle de résistivité apparente (également en ohm-m), moyenne complexe des diverses résistivités dans le rayon d'influence de la mesure.

Dispositifs de mesures

Plusieurs configurations sont possibles en variant la disposition géométrique des électrodes. Les caractéristiques de détection des dispositifs sont également différentes. En prospection archéologique, la disposition Wenner est fréquemment utilisée: les quatre électrodes sont colinéaires et équidistantes, avec un écartement de 1 m ou un multiple, facilitant ainsi une progression mètre par mètre, le plus souvent bien adaptée à l'échelle des structures recherchées.

Le dispositif de Schlumberger comporte également quatre électrodes AMNB en ligne, avec cependant un espacement MN inférieur ou égal à la longueur AB/5.

Egalement colinéaire, le «dipôle-dipôle» correspond à l'arrangement ABMN. Les deux couples d'électrodes ont le même écartement et sont séparés par un multiple de cet écartement suivant la profondeur d'investigation désirée.

Le dispositif «pôle-pôle» s'obtient en rejetant «à l'infini» les deux électrodes B et N. Il suffit alors de déplacer simplement le couple AM le long du profil en maintenant les liaisons électriques nécessaires au moyen d'un long câble. La notion d'infini est ici très relative puisqu'il suffit en pratique d'éloigner les électrodes A et B à une distance de l'ordre de 15 à 20 fois l'écartement entre A et M. Celui-ci vaut généralement 1 mètre ou parfois moins pour l'étude de structures situées à une profondeur de l'ordre du mètre.

Enfin, mentionnons encore, pour mémoire, le dispositif carré, développé et utilisé surtout par l'école anglaise, où les électrodes sont fixées sur un bâti carré rigide de 75 cm de côté.

Pour tous ces quadripôles, la valeur de la mesure est affectée géométriquement au centre du dispositif (au centre de la distance AM pour le pôle-pôle).

Profondeur d'investigation

Cette caractéristique importante des dispositifs n'a pas de définition physique précise: c'est la profondeur au-delà de laquelle on juge que la structure étudiée ne donne plus de signal clairement interprétable. En plus, la forme et l'amplitude de l'anomalie obtenue est fonction de la profondeur, de la forme, de la résistivité du corps perturbateur et de celle du milieu encaissant. Le dispositif jugé le meilleur pour une large structure horizontale peut se révéler inadapté pour la détection d'un corps étroit et vertical comme un mur, par exemple.

De nombreux auteurs ont tenté de cerner plus rigoureusement cette notion de profondeur d'investigation en proposant chacun un cadre de raisonnement personnel. On trouvera dans ROY et ELLIOT (1981) un résumé sur le sujet alors qu'il est traité de manière approfondie dans l'ouvrage de APPARAO (1997). Plus concrètement, dans le cas d'un quadripôle classique Schlumberger AMNB, l'ordre de grandeur de la profondeur d'investigation vaut en moyenne la longueur AB/4 (YÜNGÜL 1996, p. 46), et pour un dispositif Wenner, le même ordre de grandeur est acceptable. L'arrangement «pôle-pôle» est plus efficace par rapport à son encombrement puisque la profondeur d'investigation donnée par un écartement AM de 1 m est semblable à celle d'une ligne Wenner avec AB=3 m (MARTINAUD 1990, APPARAO 1997, p. 84).

Pour fixer les idées, la figure 4 montre, à la même échelle, les longueurs des divers dispositifs donnant la même réponse géophysique en résistivité apparente pour la structure théorique représentée à la partie inférieure de la figure. Malgré son extension latérale infinie, ce modèle de structure à trois terrains est une approximation raisonnable du cas d'une route ancienne, avec une couche graveleuse à 150 ohm-m de 0.5 m d'épaisseur enfouie à 0.5 m de profondeur dans une moraine argileuse à 50 ohm-m. L'approximation est acceptable puisque les dispositifs représentés sont de longueur comparable ou même souvent plus courts que la largeur moyenne d'une route (3 à 7 m). L'anomalie obtenue par les dispositifs de la figure 4 vaut 1.3 fois la résistivité du terrain encaissant.

5.2. *Dispositifs mis en œuvre sur les sites choisis*

Les premiers essais de 1986 avaient été réalisés avec un dispositif Schlumberger d'une longueur AB de 5 m. Des mesures comparatives avec un Wenner (AB=3 m) montrant des résultats analogues avec une progression plus

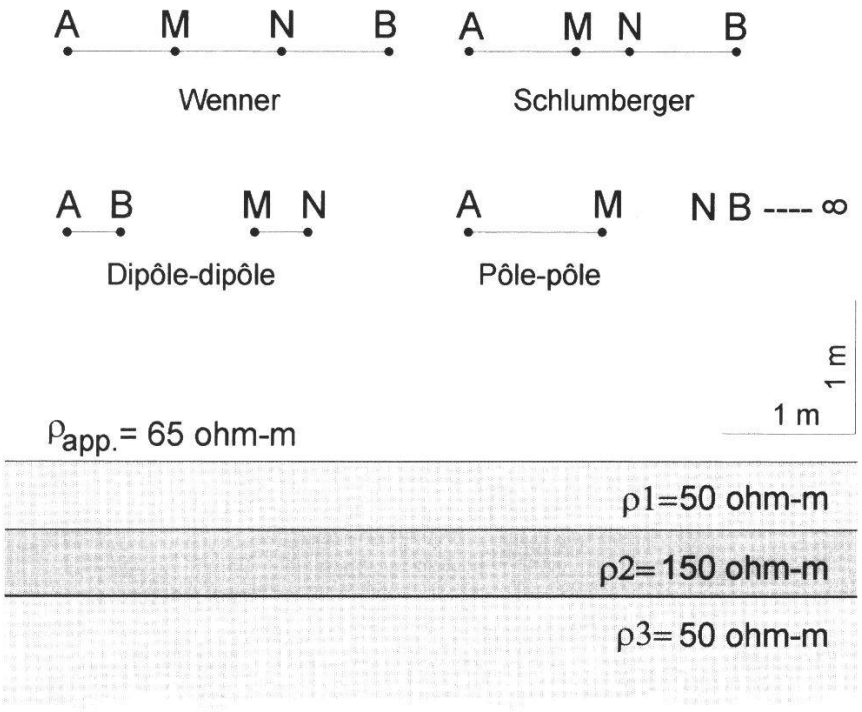

Figure 4.–Dimensions comparées de quatre dispositifs de mesures de résistivités électriques. L'amplitude de l'anomalie de résistivité apparente (65 ohm-m) est ici la même pour tous les dispositifs et représente une hausse de 30% de la résistivité du terrain encaissant (50 ohm-m).

facile dans le terrain, ce dispositif a été principalement utilisé sur les deux sites étudiés, la profondeur des structures étant souvent d'ailleurs de l'ordre de 0.5 m. Cette petite longueur de ligne permet, outre sa maniabilité, une bonne résolution latérale et sa profondeur d'investigation s'est révélée bien adaptée au problème. Quelques profils ont été réalisés avec un dispositif pôle-pôle (AM=1 m) comme comparaison et ont fourni d'excellents résultats, pratiquement semblables à ceux donnés par le Wenner.

Un test avec le conductivimètre électromagnétique EM-31 a été mené sur un profil déjà mesuré par une autre méthode, également à titre de comparaison. L'avantage de l'appareil EM-31 est sa faculté de mesurer très rapidement la conductivité apparente du sous-sol (inverse de la résistivité) par induction électromagnétique, sans contact avec le sol. On verra plus loin les résultats d'un profil typique.

L'instrument EM-31 se compose d'une perche de 4 m de longueur tenue horizontalement par l'opérateur à environ 1 mètre au-dessus de la surface du sol. A l'une des extrémités, une bobine d'émission crée un champ magnétique primaire variable qui produit par induction un champ secondaire détecté par une bobine située à l'autre extrémité. La profondeur d'investigation vaut environ 3 ou 6 m selon la configuration des bobines (horizontales ou verticales). Ces valeurs sont *a priori* déjà trop grandes pour la détection d'une structure résistante située à moins de 1 m de profondeur et cette méthode est peu adaptée à ce genre de recherches.

6. Matériel utilisé

Les mesures de résistivités ont été acquises grâce à un appareil de construction personnelle, très léger (0.6 kg) et maniable, spécialement adapté aux conditions de la prospection archéologique. Les électrodes sont constituées de tiges métalliques montées sur des manches de bois pour une manœuvre aisée sur le terrain.

Nous avons opté pour une liaison électrique aux électrodes au moyen de fils indépendants, non réunis en ligne dans un câble commun fixé rigidement aux électrodes comme c'est souvent l'usage. Ce système nécessite l'emploi d'une chevillière posée au sol pour l'implantation précise des électrodes mais permet une liberté de manœuvre plus grande et une progression plus rapide, notamment par le fait de ne déplacer que trois électrodes à chaque mesure, par simple permutation de M et N.

Le dispositif pôle-pôle a été mis en œuvre de deux façons dont quelques détails techniques sont donnés plus bas. Il nécessite une liaison électrique particulièrement longue avec les deux autres électrodes B et N fixes, rejetées 30 à 40 m plus loin que le profil à exécuter. Cette liaison est réalisée au moyen d'un câble double porté sur une bobine spécialement construite, à double contact permanent.

L'instrument de mesure comprend une lecture digitale du courant continu injecté et de la différence de potentiel mesurée. Une source de courant constant ajustable fournit une valeur de courant numériquement égale au coefficient géométrique du dispositif d'électrodes utilisé; ceci permet d'obtenir directement la valeur de la résistivité apparente. La polarisation des électrodes est corrigée de manière semi-automatique par mémorisation analogique et la qualité de la mise à zéro est contrôlée en permanence par l'opérateur. Cette façon de procéder est plus sûre qu'une correction automatique dans le cas d'une dérive dans le temps de la polarisation d'électrode. Si cette dérive est sans importance lors de mesures relativement lentes, elle devient gênante avec une cadence rapide d'acquisition. La source de courant est réalisée avec une batterie de 10 petites piles de 9 V en série; la faible intensité mise en jeu lors des mesures (6.3 mA dans le cas d'un dispositif Wenner de 3 m de longueur ou d'un pôle-pôle AM de 1 m) permet une longue autonomie. Dans le cas d'un contact plus difficile avec un sol plus sec, une deuxième batterie de 90 V est mise en série.

La mise en œuvre du dispositif pôle-pôle entraîne une grande distance entre les électrodes M et N qui peuvent ainsi être sensibles aux parasites électriques (courants vagabonds). Un circuit additionnel a été construit et permet, si nécessaire, de découper le courant I sous forme d'un signal carré à une fréquence environ 10 Hz. L'oscillateur pilote également un circuit inverseur du potentiel des électrodes M et N réalisant ainsi un redressement synchrone. La polarisation des électrodes ainsi que les variations relativement lentes dues aux courants vagabonds sont transformées en signaux alternatifs et n'influencent pas la lecture du potentiel.

Les électrodes A et B sont réalisées en acier et M et N en cuivre de 6 mm de diamètre. Ce faible diamètre permet une insertion facile dans le sol tout en conservant une robustesse acceptable.

Le dispositif pôle-pôle a été utilisé sous deux versions. La première consiste en un bâti en bois de forme triangulaire dont la base porte les deux électrodes A et M distantes de 1 m. Ce système très léger (0.6 kg) permet une grande rapidité des mesures et se manie aisément sur le terrain. La deuxième version, plus expérimentale, consiste à ne manipuler que l'électrode de courant A. L'électrode M prend la forme d'un barreau de cuivre nu (10 cm de longueur sur 2 cm de diamètre) simplement traîné sur le sol par son câble de liaison de 1 m de long, fixé solidement au pied de l'électrode A. Ce dernier dispositif ne fonctionne que sur un terrain humide puisque le contact électrique se fait sim-

plement par le poids du barreau de cuivre sur le sol. La résistance de passage est de l'ordre de quelque dizaines de kΩ et ne pose aucun problème puisque l'impédance d'entrée de l'appareil de mesure est voisine de 100 MΩ. Ce dispositif expérimental a donné d'excellents résultats. Sa mise en œuvre est très simple et efficace, sous réserve que le sol soit au moins légèrement humide, condition qui, il est vrai, n'est pas toujours remplie.

La précision des mesures de résistivité est fonction de plusieurs facteurs: erreurs instrumentales sur la lecture du courant et de la différence de potentiel, erreurs géométriques d'implantation des électrodes, parfois influence des courants vagabonds. Quelques tests (réoccupations de sections de profils par exemple) ont montré que l'erreur est généralement inférieure à 5% de la valeur finale de la résistivité.

7. Résultats et discussion

Plus de 1700 mesures de résistivités apparentes ont été exécutées sur l'ensemble des deux sites étudiés. Les résultats sont présentés sous forme de profils où l'échelle des abscisses est la même partout pour faciliter les comparaisons. L'échelle des résistivités apparentes par contre peut varier en fonction du contexte sédimentologique local et du contraste de résistivité entre le terrain encaissant et la structure étudiée. Dans l'ensemble, les anomalies de résistivités apparentes mesurées tant avec le dispositif Wenner (AB=3 m) qu'avec le pôle-pôle (AM=1 m) présentent une signature très semblable: un pic souvent aigu, d'une largeur à mi-amplitude de l'ordre de 4 à 8 m environ. Notons que la largeur d'une anomalie de résistivité est toujours supérieure à la largeur réelle de la structure perturbatrice.

7.1. *Zone Marnand-Granges-sous-Trey*

Le tronçon de route étudié s'étend sur 3.5 km, parallèlement à la Broye, entre la halte CFF de Trey et les environs de Marnand. La figure 5 montre la situation des profils, eux-mêmes présentés à la figure 6 (GM1 à GM10). L'examen des anomalies montre en général très clairement le passage de la route par une forte élévation de la résistivité, selon l'axe donné par la photo aérienne.

Le profil GM4 a été implanté volontairement, comme contre-épreuve, dans une zone défavorable. Situé sur le cône de déjection du petit torrent descendant du village de Trey, dont le cours a dû être rectifié en raison de ses fortes crues, ce profil montre de fortes valeurs de résistivités, entre 150 et 300 ohm–m, caractéristiques des dépôts de sables et graviers grossiers superficiels. Le passage de la route, de faciès lithologique semblable, ne peut ainsi être mis clairement en évidence et les résultats de la prospection sont ambigus: plusieurs anomalies sont visibles sur une distance de 60 m et rien ne permet de privilégier l'une par rapport aux autres.

Le profil GM5 montre deux anomalies distinctes; cependant l'amplitude, la signature et la position par rapport à l'axe général de la voie permettent d'interpréter l'anomalie du NW comme la plus plausible. L'élargissement du pic, observé parfois sur d'autres anomalies, peut s'expliquer peut-être par l'effet alternatif des labourages qui tend à disperser le corps graveleux de la structure.

La situation du profil GM8 est particulière. La feuille «Romont» de l'Atlas géologique (Weidmann *et al.* 1996) indique à cet endroit le passage d'un

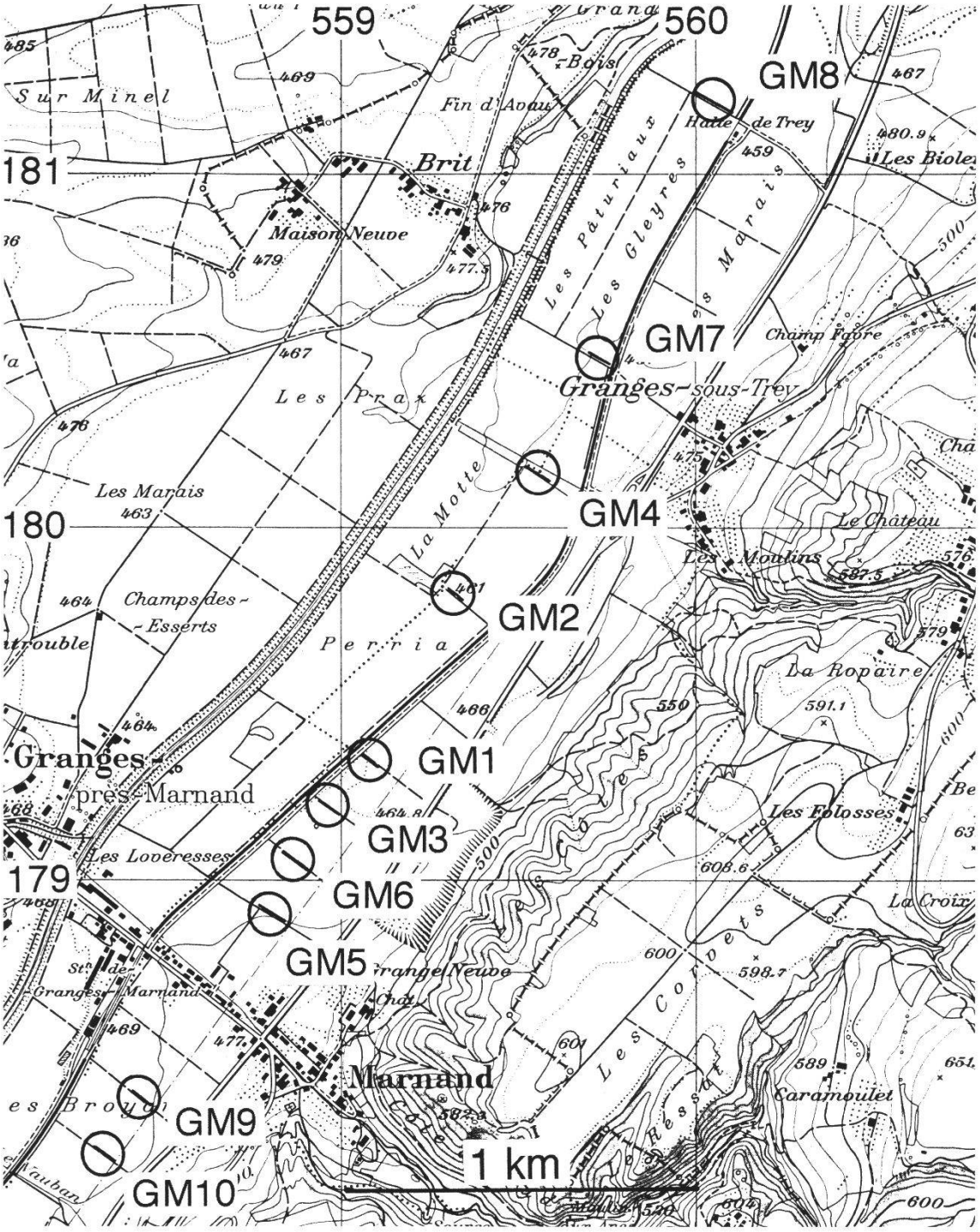

Figure 5.–Situation des profils de résistivités du site de Marnand-Granges-sous-Trey. (Reproduit avec l'autorisation de l'Office fédéral de topographie du 14.01.1998).

ancien bras de la Broye sous une faible épaisseur de limons et que les mesures montrent bien dans sa partie NW par une anomalie large d'environ 70 m. Les valeurs de résistivités ne sont pas très élevées par suite de la profondeur d'investigation modeste du dispositif. Cependant le passage de la route se marque nettement par un pic d'une signature analogue à celles des autres profils. Cette anomalie mériterait d'être confirmée par quelques profils parallèles aux environs car elle permettrait, en cas de succès, de confirmer le tracé vers le N, 700 m au delà de la dernière indication de la carte géologique.

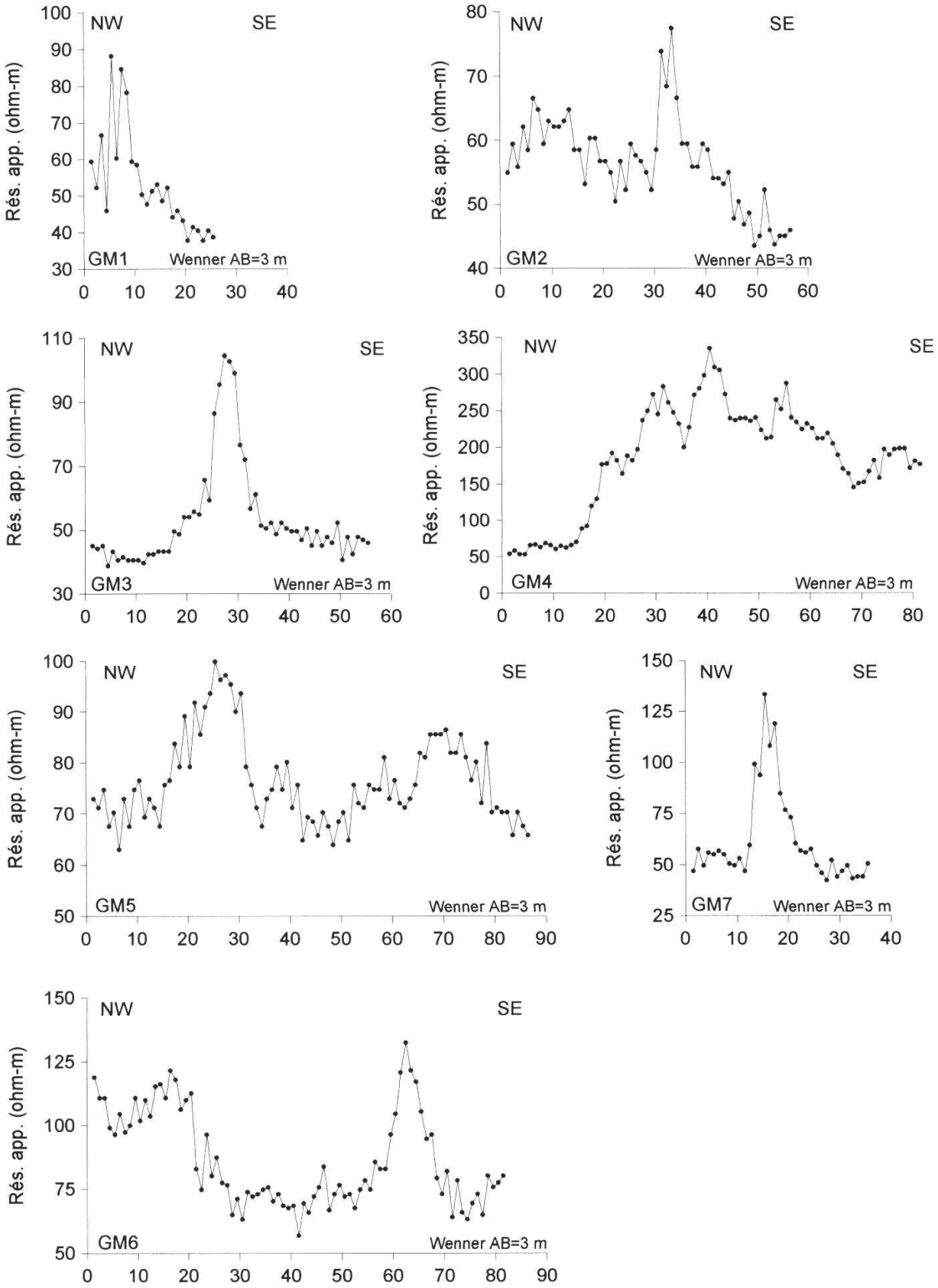

Figure 6.–Profils de résistivités apparentes GM1 à GM7 du tronçon de route de Marnand-Granges-sous-Trey. Distances horizontales en mètres.

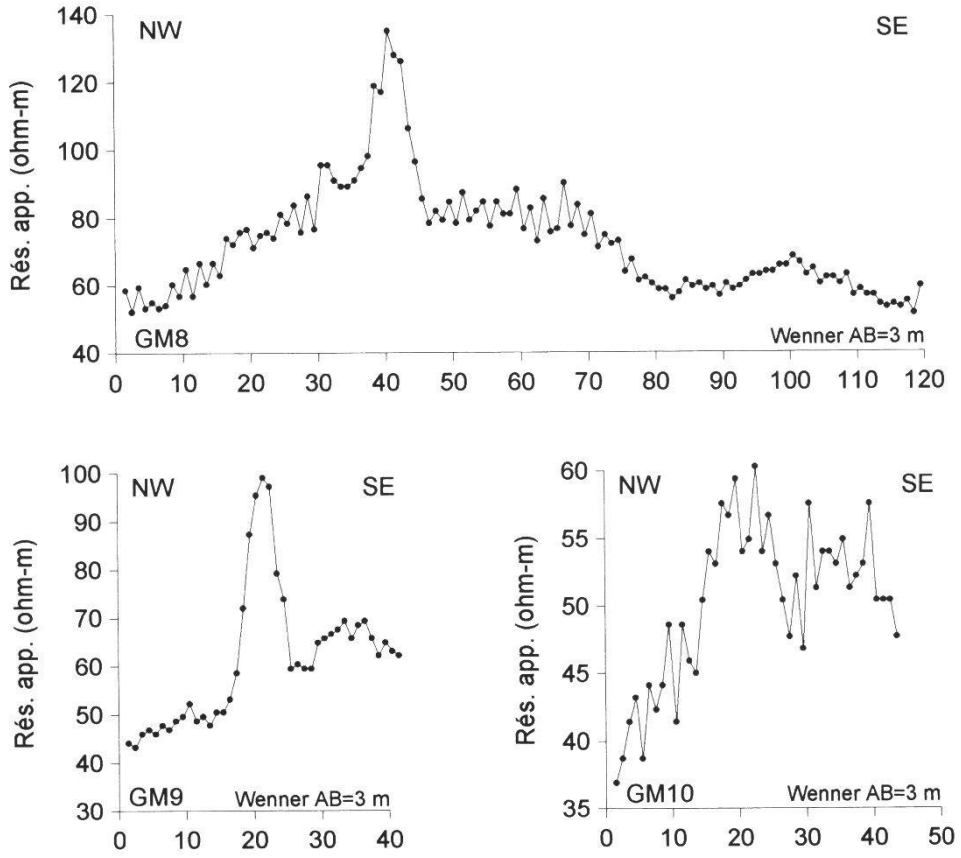

Figure 6 (suite).–Profils de résistivités apparentes GM8 à GM10. Distances en mètres.

Enfin, le profil GM10 est moins convaincant. Implanté parallèlement à 2 m d'un drainage moderne, son anomalie est perturbée sur le côté SE, probablement à cause des travaux de drainage.

7.2. *Zone Orny-Entreroches-Eclépens*

Cette zone comprend une première section où les profils, repérés ORNY, sont situés sur un tronçon de 1.5 km de longueur, environ 1 km à l'E du village d'Orny. La deuxième s'étend au S de la colline du Mormont, sur environ 500 m, à 1 km au SE d'Eclépens (profils ECL). La situation de l'ensemble des profils de la zone est représentée sur la figure 7.

Secteur d'Orny

Les anomalies des profils de la zone d'Orny sont souvent spectaculaires (fig. 8). Le dispositif pôle-pôle a été utilisé pour deux des profils (ORNY1 et ORNY3) avec d'excellents résultats. Une partie du profil ORNY1 a également été doublée avec le dispositif Wenner (AB=3 m) pour comparaison. Le profil ORNY2 montre une anomalie très nette avec pourtant des résistivités élevées dans sa partie E, entre 150 et 200 ohm-m. Ces valeurs sont très probablement à mettre en relation avec les dépôts graveleux dus à une ancienne divagation du Nozon, visible d'ailleurs sur la feuille «La Sarraz» de l'Atlas Siegfried au 1:25'000 de 1892.

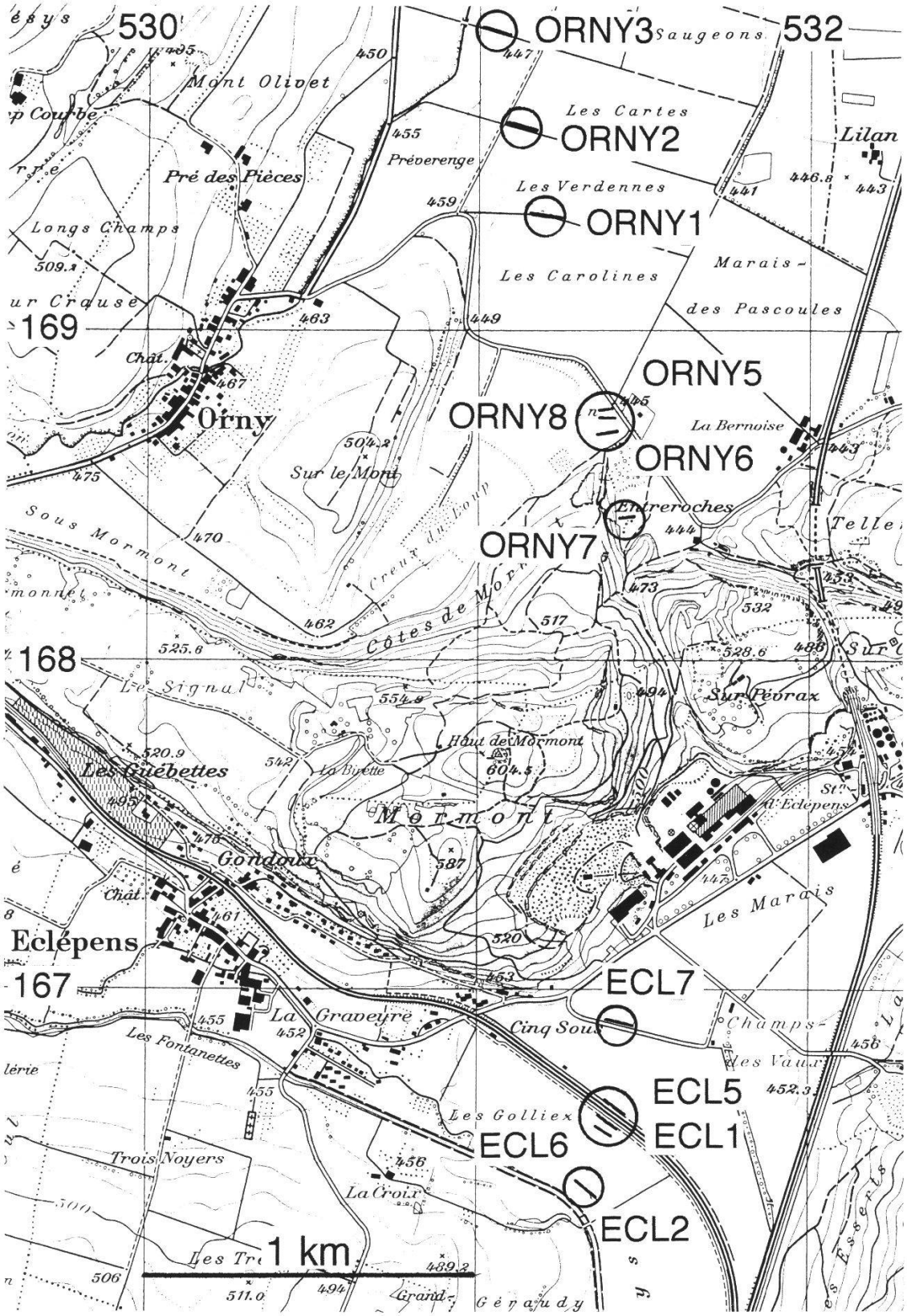

Figure 7.–Situation des profils de résistivités du site Orny-Entreroches-Eclépens. (Reproduit avec l'autorisation de l'Office fédéral de topographie du 14.01.1998).
N.B. Les profils manquants (ORNY4, ECL3 et ECL4) sont des profils sommaires d'exploration rapide qui n'ont pas été retenus pour l'étude.

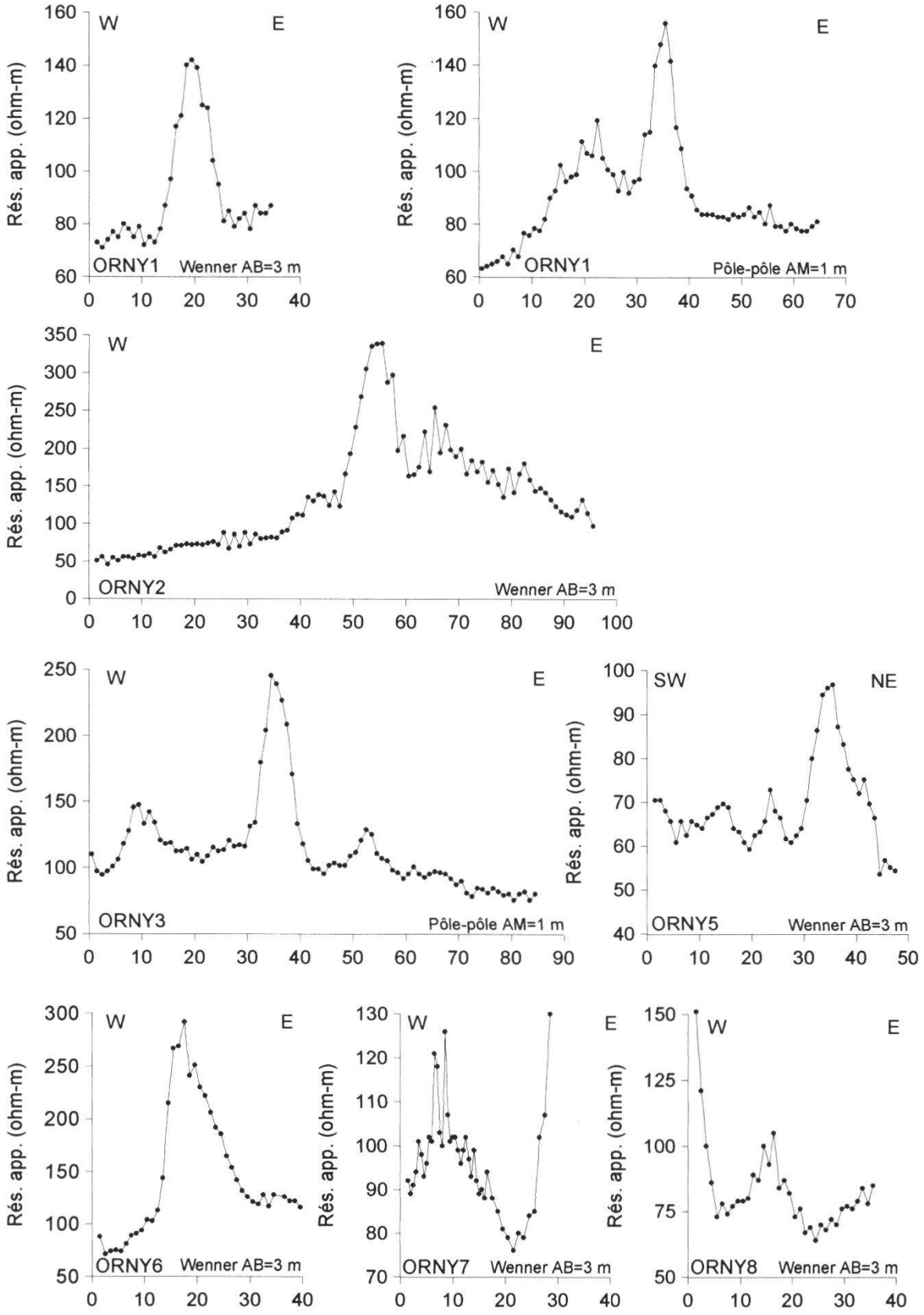

Figure 8.–Profils de résistivités apparentes (ORNY1 à ORNY8) du tronçon Orny-Entreroches-Eclépens. Distances en mètres.

L'emplacement du profil ORNY7 est particulier: situé à la sortie N de la cluse du Mormont, que semble-t-il la route antique devait emprunter, il a été exécuté dans une petite prairie bordée à l'E par un affleurement de calcaires. L'influence de ces derniers explique la rapide et forte remontée de la résistivité sur la fin du profil.

Le profil ORNY8 est moins clair, sa situation, également près d'une zone de gravier (résistivités élevées du côté W), est moins favorable.

Enfin, le profil ORNY3 a donné lieu à quelques expérimentations intéressantes. L'utilisation, le long d'un profil, d'une seule profondeur d'investigation excessive (distance AM trop grande) entraîne une diminution de l'amplitude de l'anomalie ainsi qu'une perte de résolution. La figure 9A illustre bien ce phénomène et notamment, sur le profil considéré, l'augmentation générale des résistivités de l'encaissant graveleux en profondeur . Par contre, une «pseudo-coupe» pôle-pôle a donné de bons résultats (fig. 10). Elle consiste à exécuter 5 longueurs AM différentes (1 à 5 m, correspondant à des profondeurs d'investigations croissantes) sur chaque station de mesure et l'ensemble des valeurs est représenté sous forme d'une coupe bidimensionnelle. Les résistivités apparentes sont ensuite interprétées à l'aide d'un logiciel d'inversion dont le résultat fournit une image approchée mais très parlante de la structure étudiée. Enfin, des mesures exécutées à l'aide du conductivimètre électromagnétique EM-31 (fig. 9B) montrent à l'aplomb de la route un pic net de faible conductivité apparente et l'ensemble du profil est une image-miroir assez fidèle des valeurs de résistivités en pôle-pôle.

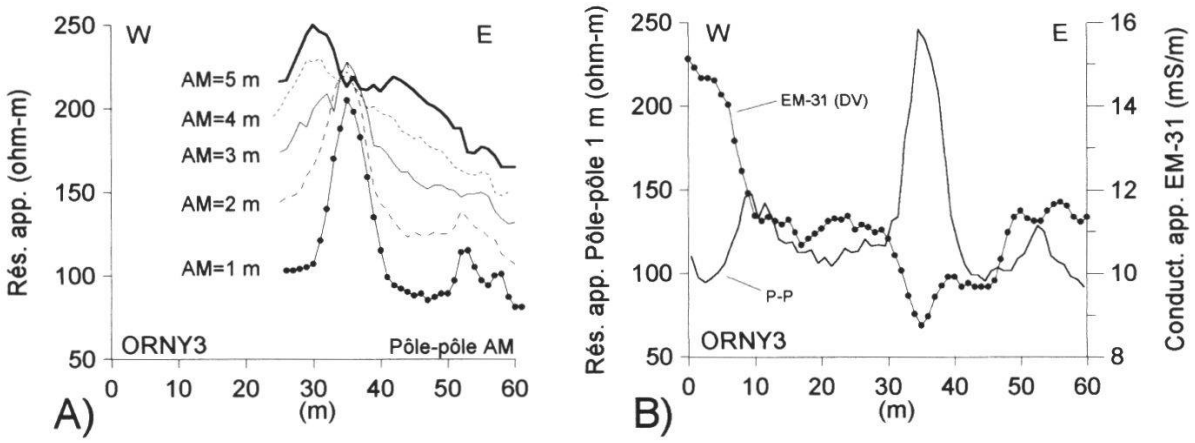

Figure 9.–A) Comparaison des anomalies obtenues à l'aide du dispositif pôle-pôle avec des profondeurs d'investigation croissantes (AM de 1 à 5 m) sur un segment du profil ORNY3.
B) Résultats des mesures de conductivités obtenues avec l'appareil EM-31 (dipôles magnétiques verticaux) et comparaison avec les résistivités apparentes mesurées en pôle-pôle AM=1 m. Distances en mètres.

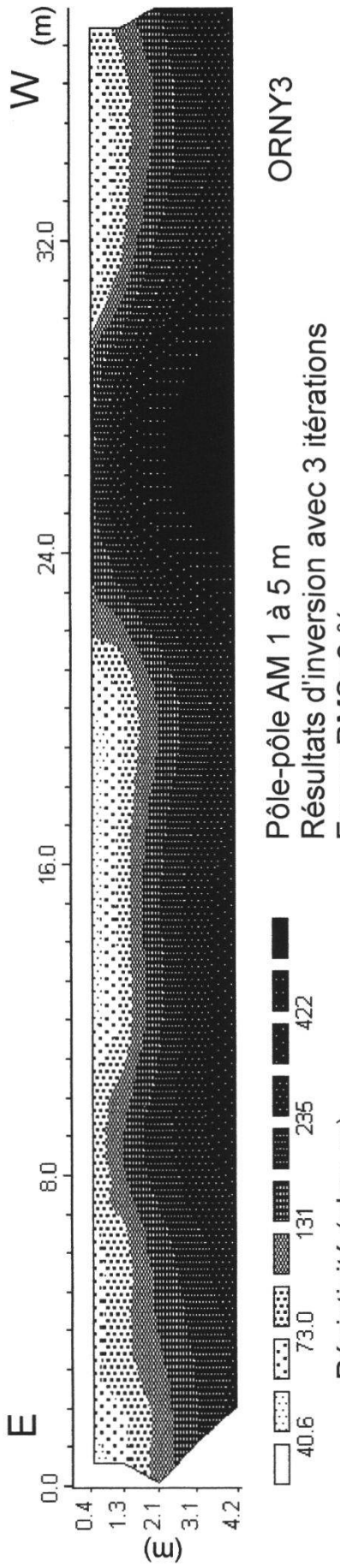

Figure 10.–Profil ORNY3 représenté en pseudo-coupe pôle-pôle interprétée. Les résultats ont été obtenus à l'aide du logiciel RES2DINV de M. H. Loke (LOKE et BARKER 1995).

Secteur d'Eclépens

Ce secteur a fourni également des anomalies très claires. Le profil ECL1 (fig. 11) a été levé aussi tous les mètres à l'aide d'un dispositif Schlumberger d'une longueur AB de 10 m comme comparaison. Sa profondeur d'investigation est plus grande et par conséquent son pouvoir de résolution plus faible pour la détection d'une structure limitée. L'anomalie relevée par ce dispositif est plus étalée et d'amplitude réduite (le rapport entre l'anomalie maximum et la norme vaut 2 contre presque 4 pour le dispositif Wenner avec AB=3 m).

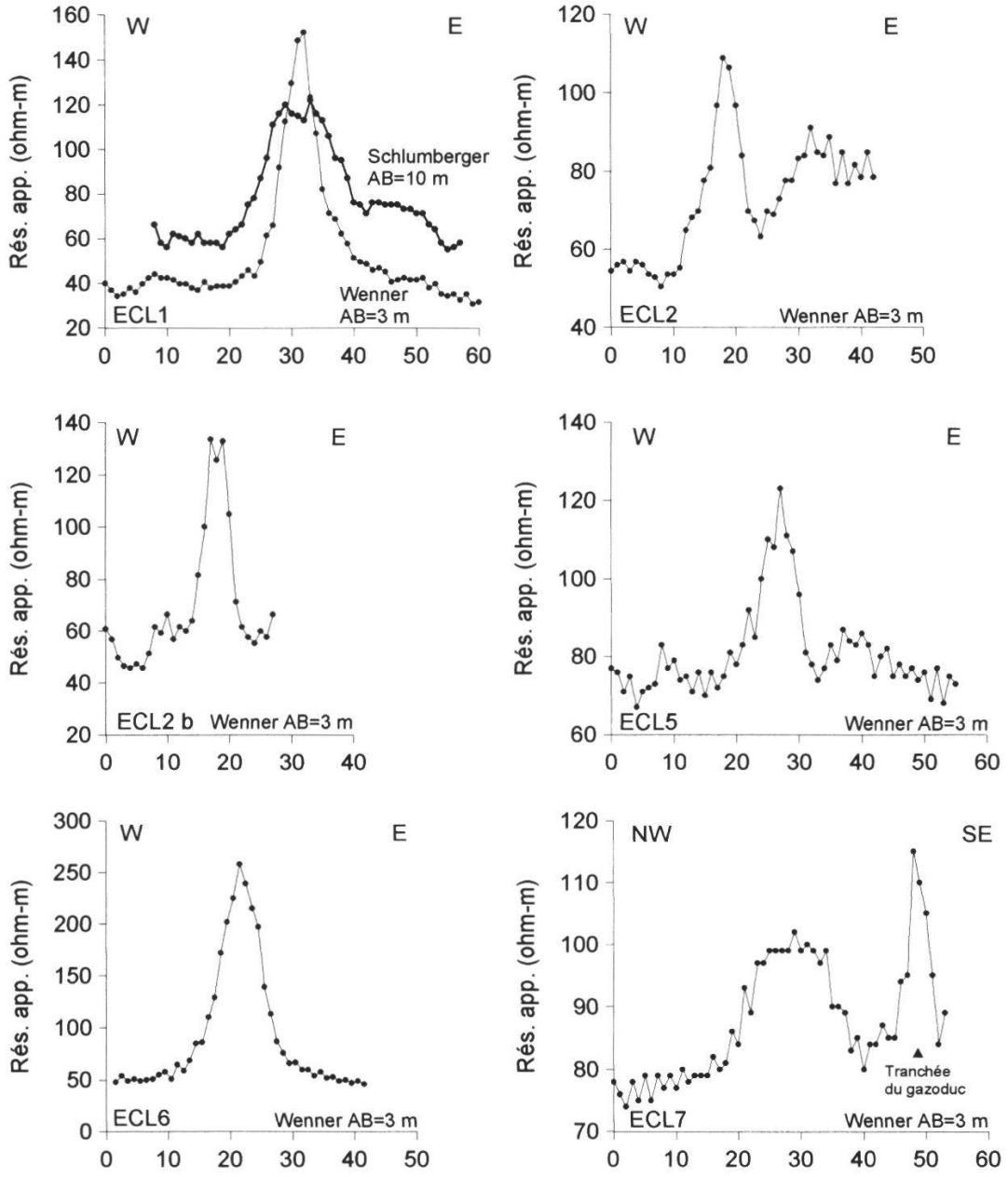

Figure 11.–Profils de résistivités apparentes du secteur d'Eclépens (ECL1 à ECL7). Distances en mètres.

Le profil ECL2 a été exécuté, en pleins champs, sur un segment du tracé préparé d'une fouille pour une conduite de chauffage à distance. Le terrain avait été décapé sur 30 cm et arasé sur une largeur d'environ 8 m, conditions idéales pour l'exécution des mesures. Pour contrôle, le profil a été doublé sur une partie de sa longueur, parallèlement à 6 m de distance (ECL2 b, fig. 11). Un mois après nos mesures, la fouille a été exécutée dans ce secteur à l'aide d'une trancheuse. Cette imposante machine ouvre une tranchée de 1 m de profondeur sur 1 m de largeur à la vitesse de 2 m à la minute. L'excavation restant libre quelques jours, il nous a été possible ainsi de vérifier *in situ* la cause de notre anomalie et confirmer le passage de notre route à une profondeur de 1 m à partir de la surface initiale du champ (fig. 12). La structure se présente sous la forme d'un lit de sable et de gravier d'une épaisseur de 30 à 40 cm, de section lenticulaire et convexe, d'environ 3 m de largeur, dans un terrain limoneux assez homogène.

Figure 12.–Coupe de route dans la tranchée de la conduite de chauffage à distance, à l'emplacement de l'anomalie du profil ECL2. L'E est à gauche de l'image. Graduations du jalon: 10 cm (photo P. Gex).

Exécutés 150 et 200 m plus au N et encadrant le profil ECL1, les mesures de ECL6 et ECL5 confirment pleinement cette anomalie (fig. 11). L'amplitude et la netteté des anomalies de ce secteur sont énigmatiques: comment une structure dont la profondeur avoisine le mètre peut-elle causer une telle «réponse» avec un dispositif présentant une profondeur d'investigation de

l'ordre du mètre au maximum? Une simulation numérique (1D) montre en effet qu'une structure de route graveleuse épaisse de 0.5 m d'épaisseur à 250 ohm-m, sous 1 m de terrain limoneux à 70 ohm-m, la troisième couche présentant la même résistivité que la première, donne lieu à une faible anomalie de résistivité apparente de 80 ohm-m avec un diposistif Wenner AB=3 m. Il faut donc admettre que l'anomalie mesurée résulte de la superposition d'un autre phénomène, qui pourrait être le suivant: les sables et graviers de la structure de la route jouent le rôle d'un drain qui assèche la partie supérieure de la structure. Nos mesures portent alors sur un secteur de sol désaturé sur une épaisseur appréciable et à faible profondeur. Un élément de preuve peut être apporté pour le profil ECL5, situé immédiatement au N de la voie CFF (situation à la figure 7). Au mois d'août dernier, le bord d'un champ de tournesols coïncidait avec le tracé du profil, et à l'endroit exact du pic de l'anomalie de résistivités, les plantes étaient d'une taille inférieure et chétives, sans fleur, sur une largeur de plusieurs mètres. Un examen plus attentif a montré que cette zone se marquait très nettement en long et coupait le coin du champ en direction du NNW selon l'axe présumé de la route. Ce phénomène de drainage est d'ailleurs l'un des fondements de la photographie aérienne appliquée à la prospection archéologique.

Le profil ECL7 présente deux anomalies: la plus étroite, au SE, correspond au passage de la tranchée du gazoduc. La présence de cet important tuyau d'acier se marque cependant par une montée de la résistivité: seul le remplissage de la tranchée se marque par une résistivité électrique plus élevée que les terrains environnants, due à une porosité plus élevée liée à une désaturation en eau; le tuyau lui-même, soigneusement isolé pour éviter la corrosion, ne joue électriquement aucun rôle. L'anomalie du côté NW, vraisemblablement due au passage de la route, est plus large et ne montre pas la même signature qu'habituellement. Là encore, il est possible que l'action perturbatrice de labourages successifs, perpendiculairement à l'axe, ait joué un rôle sur une structure ici peut-être moins profonde.

8. Comparaison avec d'autres études

Les études de tracé de routes anciennes par géophysique ne sont pas nombreuses dans la littérature. Chapellier (1970, p.101-102) a mis en évidence très clairement par une série de profils de résistivités, sur une distance de près de 400 m, la route antique menant au port d'Avenches. Comme exemple, deux anomalies mesurées à l'aide d'un dispositif Wenner (AB=3 m) ont été redessinées et mises à l'échelle de nos profils pour faciliter la comparaison (fig. 13). Le style des anomalies est parfaitement semblable à celui relevé sur nos sites.

Un autre exemple, d'après Hus *et al.* (1990), est tiré d'une étude menée en Belgique, aux environs d'Asse, à une vingtaine de km au NW de Bruxelles (fig. 13). Là encore, la signature de l'anomalie, également mesurée avec une ligne Wenner de 3 m, est très semblable à certains de nos pics de résistivité.

Mentionnons également, sans l'illustrer, le profil de résistivités mesuré par Clark (1996, p. 58) sur une rue romaine aux environs de Winchester. Bien que le dispositif de mesure ne soit pas précisé, il est vraisemblable que l'anomalie caractéristique détectée l'ait été avec une ligne courte de quelques mètres, semblable à celle que nous avons utilisée pour nos campagnes de prospection.

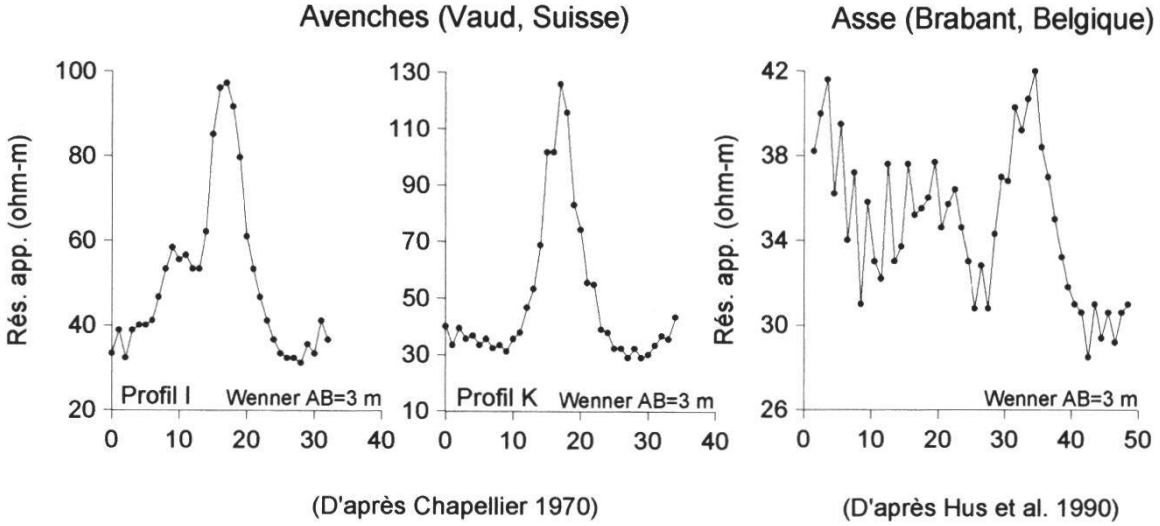

Figure 13.–Exemples de profils de résistivités mesurés sur d'autres sites archéologiques avec un dispositif Wenner AB=3 m. Distances en mètres.

Par contre, un exemple peu convaincant est donné par CHEVALLIER et ROGUET (1968), repris par CHEVALLIER (1997, p. 156). Sur le site d'Izernore, non loin de Nantua, des profils de résistivités ont été exécutés, avec un dispositif Schlumberger d'une longueur AB de 10 m, perpendiculairement au tracé présumé d'une voie romaine. Les anomalies, faibles et peu lisibles, n'apportent pas d'informations décisives sur le passage de la route. On peut s'étonner du choix d'un dispositif de mesure aussi long alors que, d'après les auteurs, les vestiges du site sont généralement peu profonds. En effet, une tranchée exécutée en travers de la route présumée l'a révélée à seulement 35 cm sous le sol actuel. Une profondeur d'investigation excessive, liée par conséquent à une faible résolution, explique vraisemblablement ces résultats médiocres.

9. MODÉLISATION EN CUVE ANALOGIQUE

Dans le domaine des méthodes de résistivité, la modélisation en cuve analogique permet à peu de frais d'obtenir des anomalies synthétiques sur des structures simplifiées qu'on peut comparer avec profit avec les résultats de terrain. Une forme simple (parallélépipède, cylindre, etc.) représentant le corps perturbateur étudié est plongée dans une cuve contenant de l'eau ordinaire simulant les terrains environnants. Le dispositif de mesure est semblable à celui utilisé sur le terrain, seules ses dimensions sont adaptées à l'échelle de la structure, de l'ordre de quelques centimètres. Habituellement, par commodité, les modèles de structures sont choisis infiniment isolants ou conducteurs, entraînant des contrastes de résistivités largement surévalués par rapport aux valeurs réelles. Ces conditions facilitent naturellement l'acquisition des mesures.

Pour notre part, nous avons préféré réaliser notre modèle de route, à l'échelle 1:100, au plus proche de la réalité: du sable fin, non classé, est contenu dans un fourreau plat de tissu de coton formant une structure de 0.5 cm d'épaisseur sur 4 cm de large, convexe et s'amincissant sur les bords. D'une longueur de 25 cm, l'ensemble est soutenu dans la cuve par une mince armature de bois poreux sans influence sur les mesures.

La cuve mesure 32 x 32 cm pour une profondeur de 16 cm. La «route» est immergée sous 0.5 cm d'eau du réseau d'une résistivité voisine de 33 ohm-m à la température ordinaire. La résistivité vraie du sable du modèle, compacté et saturé d'eau de la cuve, a été mesurée dans un tube de plastique munis d'électrodes appropriées et vaut 125 ohm–m. Le rapport entre la résistivité de la structure et celle de son milieu environnant est ainsi proche de 4. Il faut cependant noter que le modèle en situation, dans la cuve, présente peut-être une résistivité vraie plus basse par suite de la décompaction et d'une augmentation possible de la porosité, la saturation en eau restant complète. Ce contraste diminué donne lieu à des anomalies d'une amplitude plus faible mais probablement plus proche de la réalité du terrain.

Le dispositif de mesure est constitué par un quadripôle Wenner de 3 cm de longueur AB, muni de fines électrodes de cuivre, affleurant à la surface de l'eau, fixées sur un petit châssis coulissant le long d'une règle graduée pour le repérage des stations. Un profil à l'aide du pôle-pôle a également été réalisé avec une distance AM de 1 cm, les prises B et N «à l'infini» étant placées à deux angles opposés de la cuve. Pour éviter la polarisation des électrodes, nous avons travaillé en courant alternatif à 173 Hz, fourni par un générateur basse-fréquence. L'intensité I, mesurée par un multimètre digital, était de l'ordre de 0.3 mA seulement, pour rester dans un domaine de faible densité de courant. La différence de potentiel entre les électrodes M et N était également mesurée à l'aide d'un multimètre digital à haute impédance d'entrée, muni d'un filtre de réjection du 50 Hz.

Avant l'exécution des mesures avec structure en place, nous avons mesuré le profil en absence du modèle pour vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble et évaluer les effets perturbateurs des bords isolants de la cuve. Comme on peut le voir sur la partie gauche de la figure 14, ces effets de bord restent parfaitement tolérables.

Les anomalies mesurées (fig. 14), tant avec le dispositif Wenner qu'avec le pôle-pôle, montrent une similitude frappante avec les signatures obtenues sur le terrain. Le pic plus étroit donné par le pôle-pôle semble indiquer une résolution plus fine, due probablement à l'encombrement très réduit de la ligne de mesure (ici 1 cm) par rapport à la largeur de la route (4 cm), pour une profondeur d'investigation semblable au dispositif Wenner avec AB=3 cm.

10. Conclusions

L'application de la méthode de résistivité aux structures routières détectées par photo aérienne est un bon outil de vérification au sol, du moins dans les zones où le contraste de résistivité entre les matériaux de la voie et les terrains encaissants est favorable. Elle permet également de prolonger l'investigation dans les zones où le tracé devient flou ou disparaît par suite de divers bouleversements superficiels. La légèreté et la simplicité du matériel, sa rapidité de mise en œuvre sont des avantages non négligeables: par exemple, un profil de 60 m de longueur exécuté avec un dispositif Wenner de AB=3 m, avec une mesure chaque mètre, nécessite à peine plus d'une demi-heure, l'installation du matériel ne prenant que quelques minutes. L'exécution d'un profil sur un axe connu par photo aérienne permet également de localiser avec une précision meilleure que le mètre le passage d'une voie ancienne et faciliterait, le cas échéant, l'implantation d'une fouille de contrôle limitée au strict minimum. Notons en passant que la méthode magnétique, la plus rapide en prospection archéologique, n'est en général pas applicable dans le cas de nos routes, faute d'un contraste de susceptibilité magnétique suffisant entre les matériaux de la route et les terrains encaissants. Quelques essais ont montré

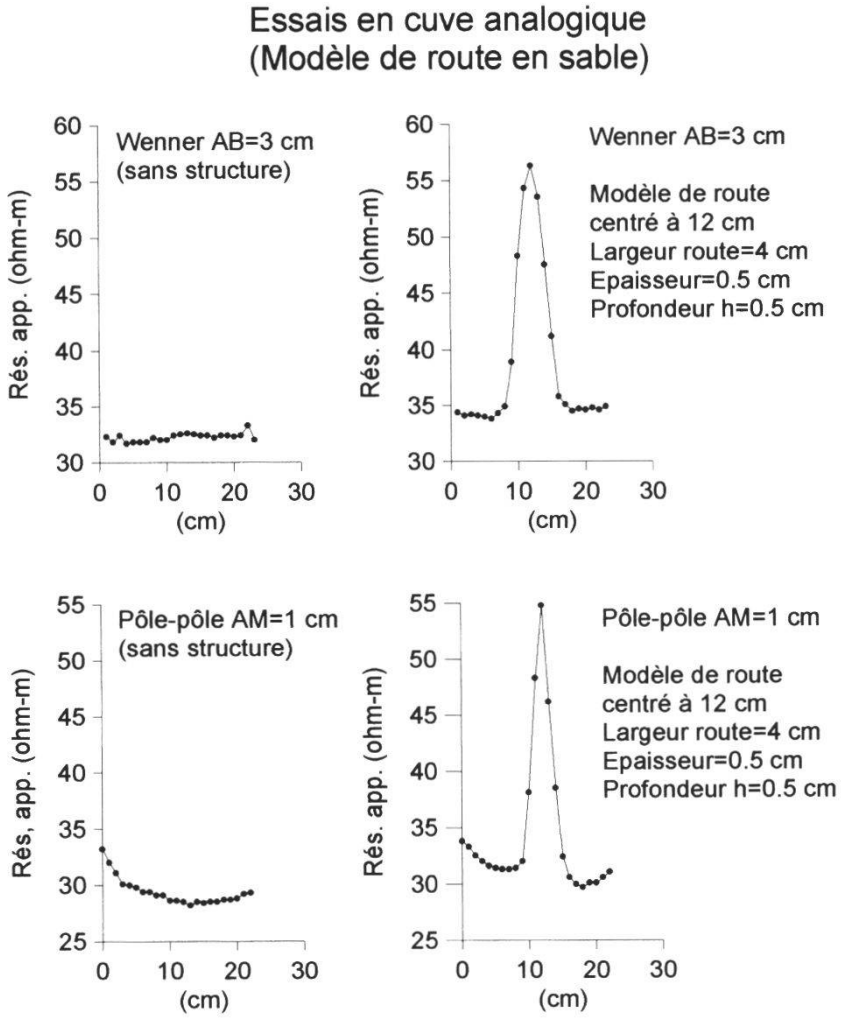

Figure 14.–Résultats d'une simulation en cuve analogique d'une route ancienne à l'échelle 1:100.

qu'une autre difficulté provient du «bruit magnétique» relativement élevé dû à la présence des nombreux galets de roches cristallines dans les moraines rhodaniennes du Plateau.

Notre secteur Marnand-Granges-sous-Trey mériterait d'être agrandi. Des profils supplémentaires vers le N et vers le S seraient d'un grand intérêt archéologique et permettraient peut-être de prouver la continuation de cet axe important. La zone au N de nos derniers profils de la région d'Orny est également prometteuse. Il est vraisemblable que la route se continue beaucoup plus au N, en direction du site d'Orbe.

Enfin, on pourrait également imaginer, lors d'une étude plus ambitieuse, explorer méthodiquement de proche en proche certains axes routiers importants dont on ne connaît plus le passage que par quelques petits segments ou encore par d'anciens témoignages ou hypothèses. En combinant systématiquement études de photos aériennes et hypothèses archéologiques avec une stratégie de suivi géophysique au sol, il semblerait possible d'apporter de nouveaux éléments, et peut-être des solutions nouvelles à de vieux problèmes.

Remerciements

Plusieurs personnes m'ont facilité le travail ou fourni des informations importantes. Je remercie notamment M. François Francillon, de la Section des monuments historiques et de l'archéologie (SMHA), pour les discussions très intéressantes que j'ai eues avec lui et pour les photos aériennes qu'il m'a fort aimablement montrées et commentées. Je remercie également M. Thierry Guignard, alors ingénieur chez CADCIME à Eclépens, pour les précieux documents qu'il m'a communiqués et pour m'avoir accordé toutes les facilités pour l'accès au chantier de la conduite de chauffage à distance. Il m'a été ainsi possible de faire une vérification matérielle de l'anomalie de deux de mes profils de résistivité. J'ai eu avec lui également de passionnantes et utiles discussions. Je remercie enfin M. Denis Weidmann, archéologue cantonal, pour sa lecture amicale et attentive de mon manuscrit et pour les deux photos aériennes originales qu'il m'a confiées pour illustrer cette étude.

Bibliographie

Apparao A., 1997. Developments in geoelectrical methods. Balkema, Rotterdam, Brookfield. 293 p.

Boisaubert J.-L., Agustoni C., Anderson T.J., Bouyer M., Mauvilly M., Murray C. et Vigneau H., 1998. Le Canton de Fribourg et les Grands Travaux: l'exemple de l'A1 dans la Broye. *Archéologie suisse 21/2*: 85-89.

Bourgeois V.-H., 1925. La voie romaine des gorges de Covatannaz. (Première partie). *Revue historique vaudoise 3*: 65-79.

Bourgeois V.-H., 1927. La voie romaine des gorges de Covatannaz. (Seconde partie). *Revue historique vaudoise 10*: 332-343.

Chapellier D., 1975. Géophysique et archéologie. *Cahiers d'archéologie romande 3*. 113 p.

Chevallier R., 1997. Les voies romaines. Ed. Picard, Paris. 341 p.

Chevallier R. et Roguet R., 1968. Prospections géophysiques à Izernore (Ain), France. *Prospezioni archeologiche 3*: 61-76.

Clark A., 1996. Seeing Beneath the Soil. Prospecting methods in archaeology. 2nd ed. B.T. Batsford Ltd, London. 192 p.

Francillon F., 1989. Prospection aérienne et archéologie. Paysages découverts, GREAT 1: 115-128.

Francillon F., Weidmann D., 1983. Photographie aérienne et archéologie vaudoise. *Archéologie suisse 6/1*: 2-14.

Hus J.J., Léva Ch., Munaut A.V., 1990. Recent research on Roman roads in Belgium. *In* Léva Ch. (Ed.). Aerial photography and geophysical prospection in archaeology. Proc. of 2nd Intern. Symp. Brussels, 8 XI 1986, p. 119-154. Centre Interdiscipl. de Rech. Aérienne, Bruxelles.

Kasser A., 1947. Où la voie romaine d'Yverdon traversait-elle le marais? *Revue historique vaudoise*: 99-103.

Klausener M., 1984. Voie romaine. *In* Chronique archéologique 1983. *Revue historique vaudoise*: 237.

Lerici M., 1960. I nuovi metodi di prospezione archeologica alla scoperta delle civiltà sepolte. Lerici Editori, Milano. 419 p.

Loke M.H. and Barker R.D., 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosection. *Geophysics 60/6*: 1682-1690.

Maillefer P., 1900. Les routes romaines en Suisse I, II et III. *Revue historique vaudoise 1*: 1-12, *2*: 33-48 et *5*: 129-172.

Martinaud M., 1990. Intérêts du dispositif bipôle C-P en prospection électrique non mécanisée. *Revue d'Archéométrie 14*: 5-16.

MOTTAS F., 1982. Les voies romaines en terre vaudoise. *Strasse und Verkehr 5:* 112-115.

MOTTAS F., 1986. De la plaine de l'Orbe en Franche-Comté: voie romaine et chemin saunier. *Archéologie suisse 3*: 124-134.

POGET S.W., 1950. Voies romaines de la contrée Orbe-Yverdon-Ste Croix. *Ur-Schweiz XIV, 1*: 11-15.

ROY K.K. and ELLIOT H.M., 1981. Some observations regarding depth of exploration in D.C. electrical methods. *Geoexploration 19*: 1-13.

VIOLLIER D., 1927. Carte archéologique du canton de Vaud. F. Rouge et Cie, Lausanne. 431 p.

VION E., 1989a. L'archéologie du territoire: étudier le passé pour gérer le présent. Paysages découverts, GREAT 1: 9-21.

VION E., 1989b. L'analyse archéologique des réseaux routiers: une rupture méthodologique, des réponses nouvelles. Paysages découverts, GREAT 1: 67-99.

VION E., 1995. Aubonne, Cossonay, Orbe et la Vy d'Etraz. *In* Les Villes de la région lémanique de l'Antiquité à nos jours. Rencontres régionales d'Histoire et d'Archéologie, Gex, 15 et 16 oct. 1993, p. 25-38. Office culturel municipal de Gex. 208 p.

WEIDMANN M., BRIEL A. et INGLIN H., 1996. Feuille «Romont» de l'Atlas géologique de la Suisse au 1:25 000. Serv. hydr. et géol. nat.

XEIDAKIS G.S. and VARAGOULI E.G., 1997. Design and construction of roman roads: the case of Via Egnatia in the Aegean Thrace, Northern Greece. *Environmental and Engineering Science 3.1*: 123-132.

YÜNGÜL S.H., 1996. Electrical methods in geophysical exploration of deep sedimentary basins. Chapman and Hall, London. 208 p.

Manuscrit reçu le 31 août 1998