

Zeitschrift: Cahiers d'archéologie romande
Herausgeber: Bibliothèque Historique Vaudoise
Band: 3 (1975)

Artikel: Géophysique et archéologie
Autor: Chapellier, Dominique
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-835398>

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: 22.07.2025

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

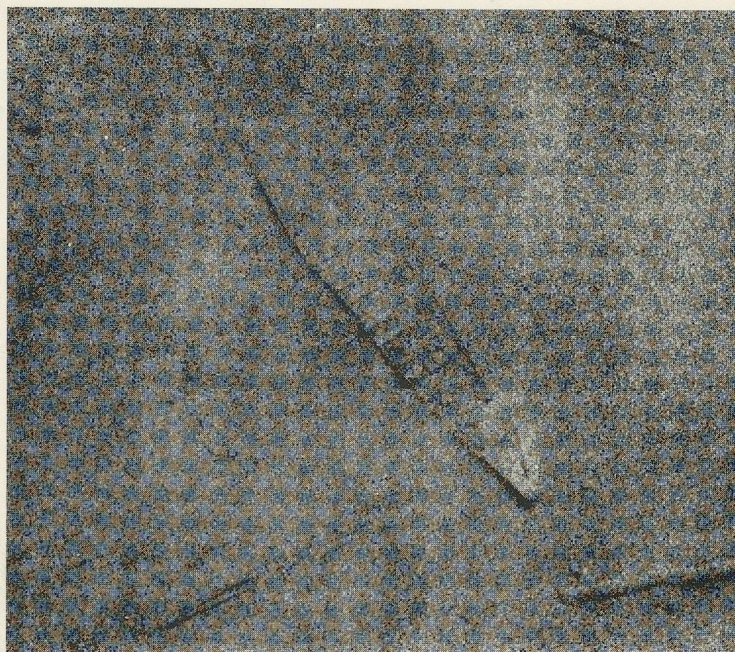
CAHIERS D'ARCHÉOLOGIE ROMANDE

de la Bibliothèque historique vaudoise
collection dirigée par Hans Bögli et Colin Martin

N° 3

DOMINIQUE CHAPELLIER

GÉOPHYSIQUE ET ARCHÉOLOGIE



LAUSANNE

1975

Photographie prise d'avion peu après la découverte de la barque de Bevaix, épave gallo-romaine du Lac de Neuchâtel. On reconnaît la forme effilée du bateau et quelques membrures. Alentour, troncs d'arbres et fragment de bordé latéral arraché par les vagues. Profondeur de l'eau: 2 m.

* * *

Notice et photo de Michel Egloff,
parues dans *Helvetia Archaeologica* N° 19-20, mai 1974.
Cliché reproduit ici avec l'aimable autorisation de
MM. Rudolf Degen et Michel Egloff.

CAHIERS D'ARCHÉOLOGIE ROMANDE

de la Bibliothèque historique vaudoise

collection dirigée par Hans Bögli et Colin Martin

N° 3

DOMINIQUE CHAPELLIER

GÉOPHYSIQUE
ET
ARCHÉOLOGIE

LAUSANNE

1975

Cahiers d'Archéologie romande
de la Bibliothèque historique vaudoise

A mes chers parents

Ont paru :

N° 1. Gilbert KAENEL. AVENTICUM I — Céramiques gallo-romaines découvertes.

N° 2. Jean-Pierre JÉquier. Le Miroir de Saint-Étienne, révision critique.

N° 3. Dominique CHAPILLIER. Géographie et Archéologie.

À paraître :

Gilbert KAENEL, Max CLAUSER. AVENTICUM II — Les céramiques — Nouvelles recherches.

D. WEIDMANN. AVENTICUM III. Classification des sépultures d'Avenches.

H. R. ZSINGER. AVENTICUM IV. Typologie de la céramique commune d'Avenches.

Cahiers d'Archéologie romande de la Bibliothèque historique vaudoise

Ont paru :

N° 1: Gilbert KAENEL: AVENTICUM I — Céramiques gallo-romaines décorées.

N° 2: Jean-Pierre JÉQUIER: Le Moustérien alpin; révision critique.

N° 3: Dominique CHAPPELLIER: Géophysique et Archéologie.

A paraître :

Gilbert KAENEL, Max KLAUSENER — Lousonna — Nouvelles recherches.

D. WEIDMANN: AVENTICUM II: Classification des amphores d'Avenches

H. R. ZBINDEN: AVENTICUM III: Typologie de la céramique commune d'Avenches

Code de citation préconisé:

D. CHAPELLIER, Géophysique et archéologie (Bibliothèque historique vaudoise, Cahiers d'archéologie romande 3, Lausanne, 1975).

Les commandes et les demandes d'échange
pour le présent fascicule doivent être adressées
à la Bibliothèque historique vaudoise,
M^e Colin Martin, rue Pépinet 1, CH-1002 Lausanne.

Tous droits, etc., traduction, de reproduction et d'adaptation
réservés pour tous les pays.

© 1975 by Bibliothèque historique vaudoise, Lausanne.

Avant-propos

Depuis plus de quatre ans, je me suis efforcée de mieux adapter les méthodes géophysiques à la prospection archéologique. C'est au professeur C. Meyer de Stadelhofen que revient le mérite d'avoir inspiré ces recherches, c'est donc à lui que vont tout d'abord mes remerciements.

Je tiens à manifester aussi une reconnaissance toute particulière au professeur H. Bögli qui, m'accueillant sur son domaine d'Aventicum, n'a pas ménagé ses avis et son aide.

Je prie tous les archéologues qui m'ont aimablement conseillée de trouver ici l'expression de ma gratitude.

Enfin je tiens à remercier mes collègues de l'Institut de géophysique de l'Université de Lausanne, et parmi eux tout spécialement MM. Francis Perret et Paul Braissant, de leur gentillesse et de leur aide très précieuse.

Table des matières

CHAPITRE I INTRODUCTION		Page
1.1	Introduction	13
1.2	Recherche et choix du site	13
1.3	Norme et anomalie	14
1.4	Les différentes structures à prospector	17
CHAPITRE II LA PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE		
2.1	Introduction	21
2.2	Principe de la méthode	21
2.3	Interprétation	22
2.4	Conclusions	25
CHAPITRE III LES MÉTHODES MAGNÉTIQUES		
3.1	Introduction	27
3.2	Principe de la méthode	27
3.2.1	Le champ magnétique terrestre	27
3.2.2	Nature des corps aimantables	29
3.3	Nature et forme des anomalies	31
3.4	L'interprétation	32
3.5	Exemple de prospection	36
3.6	Conclusions	36
CHAPITRE IV LA PROSPECTION SISMIQUE		
4.1	Introduction	39
4.2	Principe de la méthode	39
4.3	Applications à l'archéologie	42
4.4	Exemples de prospection	45
4.5	Conclusions	49
CHAPITRE V LA MÉTHODE GRAVIMÉTRIQUE		
5.1	Introduction	51
5.2	Principe de la méthode	51
5.3	Applications archéologiques	52
5.4	Conclusions	55
CHAPITRE VI LES MÉTHODES ÉLECTRIQUES		
6.1	Introduction	57
6.2	Principe général	57
6.3	Cartes et profils de potentiel	60
6.4	Profils et cartes de résistivités	60
6.5	Les sondages électriques	69

6.6	Effets de quelques structures archéologiques simples sur les résistivités apparentes	71
6.7	Essais en cuve	72
6.8	Le pénétrromètre-électrode	81
6.9	Les méthodes électromagnétiques	84
6.10	Exemples de prospection	86
CONCLUSIONS GÉNÉRALES		109
BIBLIOGRAPHIE		110

CHAPITRE I INTRODUCTION		
1.1	Introduction	13
1.2	Recherche et choix du site	13
1.3	Plans et graphes	14
1.4	Les différents structures à prospection	17
CHAPITRE II LA PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE		
2.1	Introduction	21
2.2	Principe de la méthode	21
2.3	Interprétation	22
2.4	Conclusions	25
CHAPITRE III LES MÉTHODES MAGNÉTIQUES		
3.1	Introduction	27
3.2	Principe de la méthode	27
3.2.1	Le champ magnétique terrestre	27
3.2.2	Nature des corps magnétiques	29
3.3	Nature et forme des anomalies	31
3.4	Interprétation	32
3.5	Exemple de prospection	36
3.6	Conclusions	38
CHAPITRE IV LA PROSPECTION SISMIQUE		
4.1	Introduction	40
4.2	Principe de la méthode	40
4.3	Applications à l'archéologie	42
4.4	Exemples de prospection	45
4.5	Conclusions	49
CHAPITRE V LA MÉTHODE GRAVIMÉTRIQUE		
5.1	Introduction	51
5.2	Principe de la méthode	51
5.3	Applications archéologiques	52
5.4	Conclusions	55
CHAPITRE VI LES MÉTHODES ÉLECTRIQUES		
6.1	Introduction	57
6.2	Principe général	57
6.3	Cartes et profils de potentiel	60
6.4	Profils et cartes de résistivité	60
6.5	Les sondages électriques	69

Chapitre 1 — Introduction

1.1 Introduction

L'archéologie comme l'histoire a pour but la connaissance de l'homme à travers l'étude de son passé. Pour parvenir à cette connaissance, l'archéologie recherche, exhume, conserve et parfois restaure des témoins matériels des civilisations anciennes.

Les archéologues, pour faciliter leur tâche, ont su mettre à profit les progrès réalisés par des sciences et des techniques qui, à première vue, sont totalement étrangères à l'archéologie. C'est ainsi, par exemple, que de nombreux vestiges intéressants ont été mis en évidence grâce à l'examen de photographies aériennes ou grâce aux méthodes géophysiques.

L'emploi, en archéologie, des techniques modernes permettant une prospection rapide a été stimulé, en particulier, par la nécessité de sauver à la hâte des sites menacés par l'expansion urbaine ou routière.

D'autre part, l'engouement d'un public toujours plus large pour les vestiges du passé n'est pas étranger à l'accélération des recherches et à la mise en œuvre de techniques nouvelles.

Les nouvelles méthodes à disposition des archéologues ne sont ni simples ni parfaites; bien que déjà fort utiles, elles sont susceptibles de nombreux perfectionnements. Cette constatation nous a poussés, d'une part à travailler à l'adaptation des méthodes géophysiques à l'archéologie et, d'autre part, à décrire ces méthodes de façon à en rendre l'emploi moins hasardeux, plus rationnel.

1.2 Recherche et choix du site

Les raisons qui président au choix d'un site sont complexes et avant tout d'ordre historique et géographique. Ce n'est qu'après ce premier choix, qui est du ressort de l'archéologue, que peuvent intervenir les méthodes géophysiques. Trois cas peuvent alors se présenter:

La région choisie ne montre à première vue aucun vestige archéologique.

Il faut alors délimiter les zones d'intérêt. Dans ce cas l'étude des photographies aériennes et certaines méthodes géophysiques interviennent au stade de la reconnaissance préliminaire. Ces méthodes peuvent être rapides, peu coûteuses et efficaces.

La région choisie montre des structures très recouvertes dont on aimerait savoir si elles sont d'origine humaine ou naturelle.

Ici encore certaines méthodes géophysiques peuvent être utiles, elles permettent souvent de discerner les formations géologiques des formations archéologiques.

Enfin la région choisie est parsemée de vestiges apparents.

Il peut s'agir de fragments de poteries, de tuiles, de mosaïques, de tessons de céramique, etc., fortuitement ramenés à la surface par des travaux agricoles par exemple. Dans ce cas certaines méthodes géophysiques peuvent faciliter le choix des points les plus dignes d'être fouillés, en fournissant des indications quant aux dimensions, aux formes ou à l'état de conservation des vestiges enterrés.

Plus avant dans ce travail, nous décrivons les méthodes qui s'appliquent à chacune des trois situations brièvement mentionnées ci-dessus. Complétant la description des méthodes, une série d'exemples fera mieux saisir ce que peuvent être : une prospection préliminaire, une prospection de contrôle et une prospection de détail.

1.3 Norme et anomalie

Toutes les méthodes de prospection tendent à la mise en évidence de structures anormales ; c'est-à-dire de structures différant de leur milieu par l'une ou l'autre caractéristique.

Sur une photographie aérienne, par exemple, une ligne droite ou une circonférence parfaite indique, le plus souvent, une intervention humaine. De même un brusque changement des résistivités électriques mesurées sur le terrain peut être considéré comme anormal.

L'anomalie, malheureusement, ne peut être définie que s'il existe une norme ; or, dans les problèmes qui nous intéressent, la norme est rien moins qu'une constante. Elle peut présenter d'importantes variations dues soit à la géologie, soit aux interventions humaines, soit tout simplement aux erreurs qui entachent toujours les mesures.

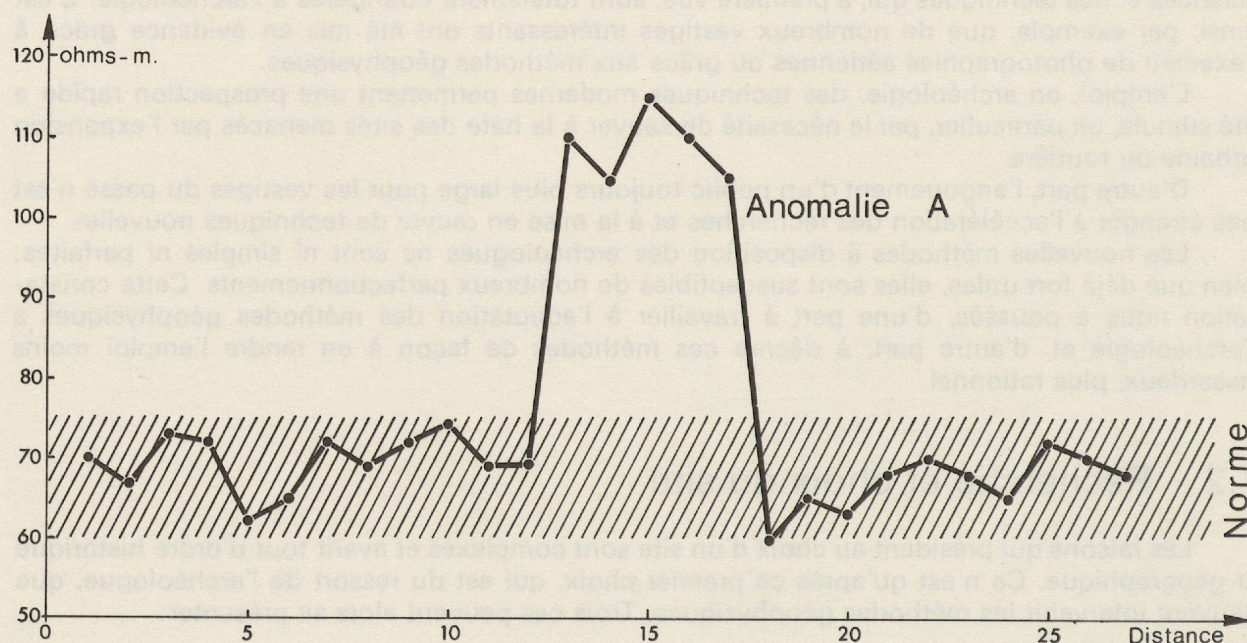


Figure 1

En fait la notion de norme et, par conséquent, celle d'anomalie n'ont qu'une signification statistique, c'est ce qu'illustre l'exemple de Bavois (fig. 2).

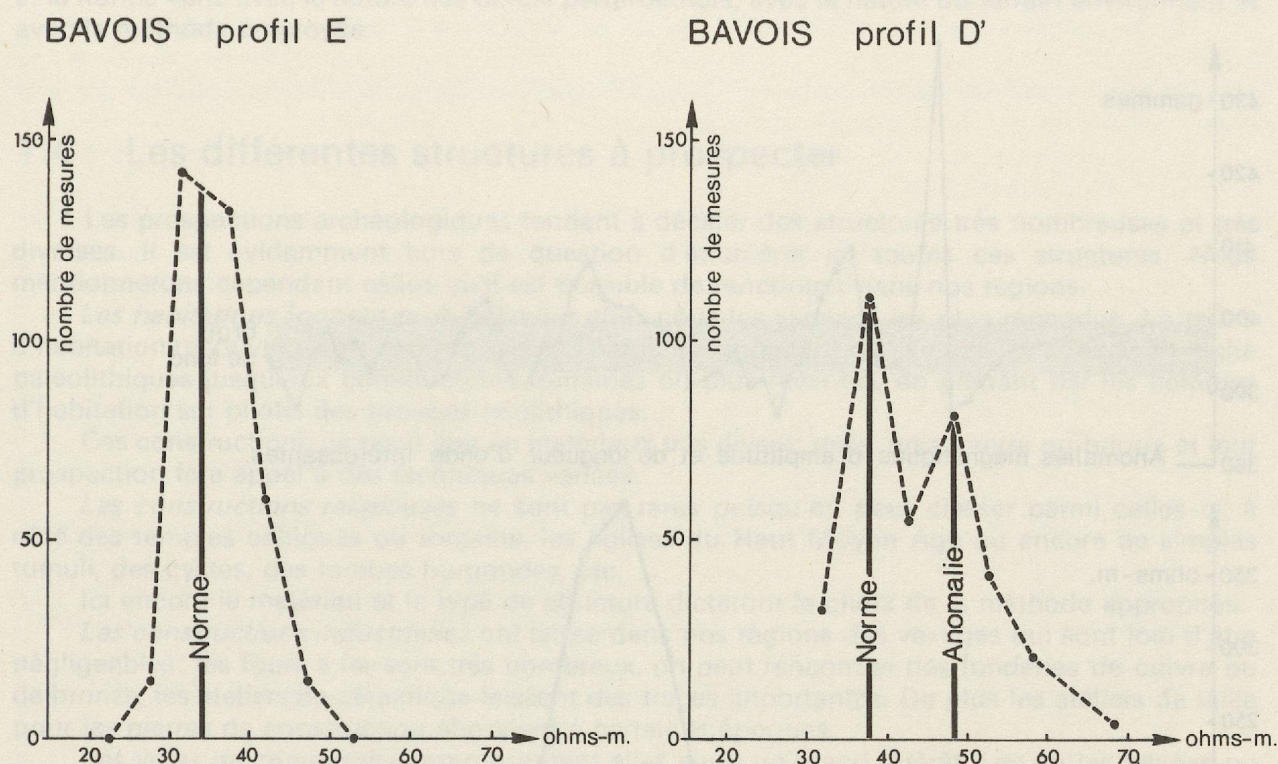


Figure 2

La représentation graphique des valeurs de résistivité mesurées sur le profil *E* constitue une ogive simple, indice d'une population statistiquement homogène.

Par contre, les valeurs obtenues sur le profil *D'* forment une population bimodale.

L'examen des courbes statistiques permet de définir une aire recouvrant les valeurs normales et une aire recouvrant l'anomalie. Constatons dès maintenant que ces deux aires peuvent se chevaucher, ce qui n'est pas pour faciliter l'interprétation.

Les notions de norme et d'anomalie nous conduisent tout naturellement au problème du choix des méthodes.

LA CHAUX (villa romaine) Profil U'

Echelle : 0 5 10m.

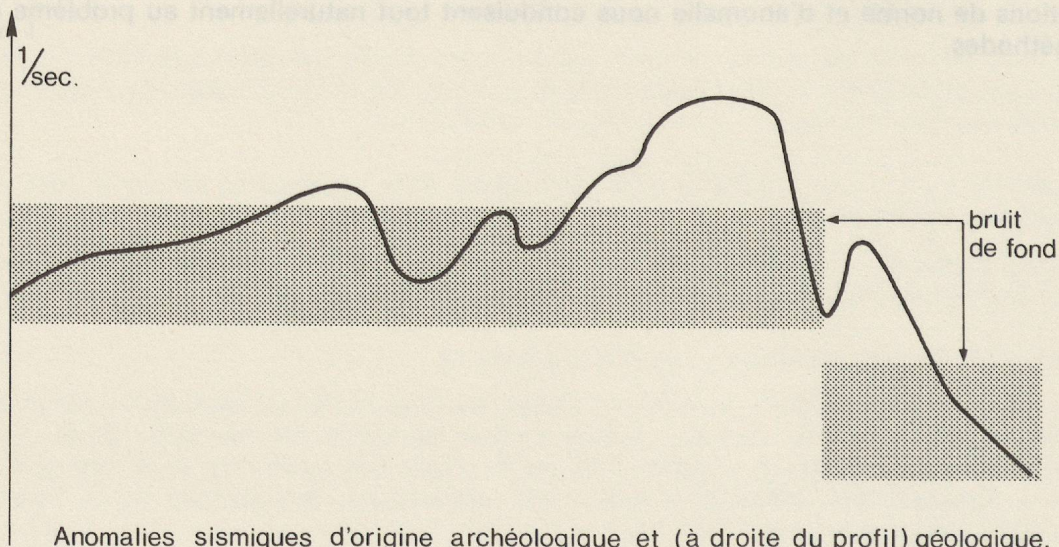
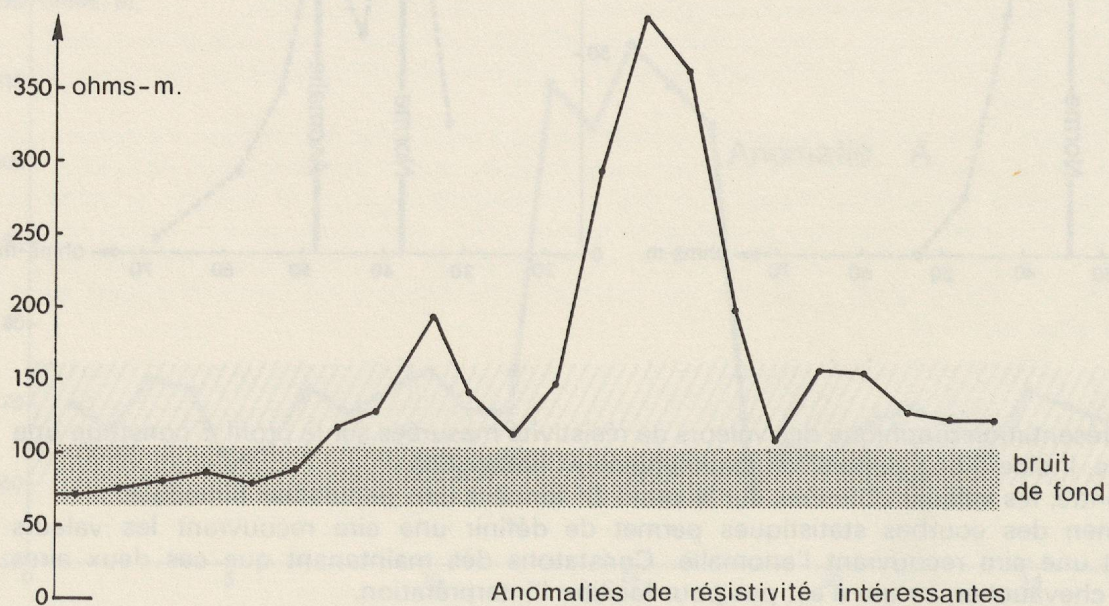
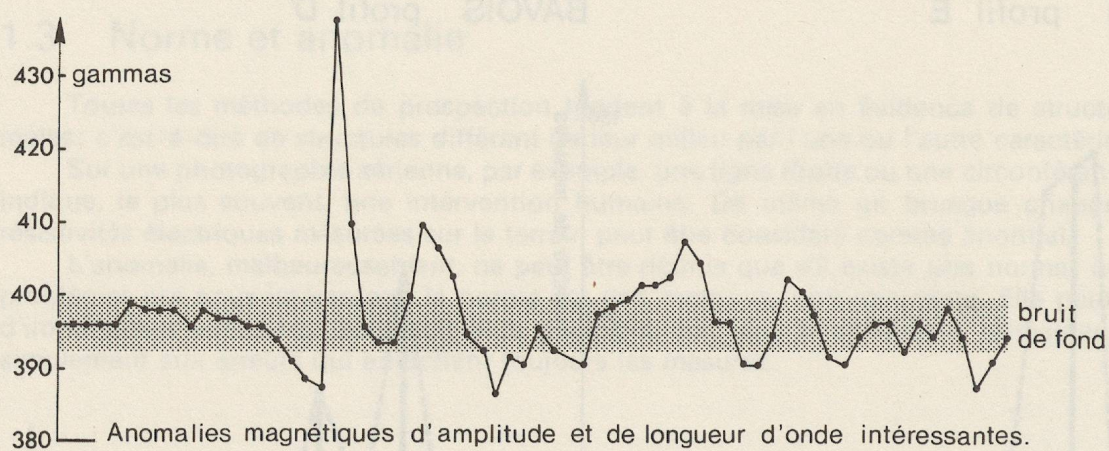


Figure 3

Il est évident que, dans un cas donné, la meilleure méthode est celle qui fait apparaître une norme aussi stable que possible et, sur les structures archéologiques, une anomalie aussi différente de la norme que possible.

Il va sans dire, et l'exemple ci-dessus le prouve, que la qualité du contraste entre l'anomalie et la norme varie avec la nature des objets perturbateurs, avec la nature du terrain environnant et avec la méthode employée.

1.4 Les différentes structures à prospector

Les prospections archéologiques tendent à déceler des structures très nombreuses et très diverses. Il est évidemment hors de question d'énumérer ici toutes ces structures. Nous mentionnerons cependant celles qu'il est possible de rencontrer dans nos régions.

Les habitations forment probablement chez nous les vestiges les plus répandus. Le terme d'habitation recouvre tout ce qui concerne l'habitat proprement dit; depuis les abris sous roche paléolithiques jusqu'aux constructions romaines ou plus récentes, en passant par les colonies d'habitation sur pilotis des groupes néolithiques.

Ces constructions peuvent être en matériaux très divers: terre, bois, pierre ou brique et leur prospection fera appel à des techniques variées.

Les constructions religieuses ne sont pas rares puisqu'on peut classer parmi celles-ci, à côté des temples celtes ou romains, les églises du Haut Moyen Age ou encore de simples tumuli, des cystes, des tombes burgondes, etc.

Ici encore le matériau et le type de structure dicteront le choix de la méthode appropriée.

Les constructions industrielles ont laissé dans nos régions des vestiges qui sont loin d'être négligeables: les fours à fer sont très nombreux, on peut rencontrer des fonderies de cuivre ou de bronze, les ateliers de céramique laissent des traces importantes. De plus les ateliers de taille pour les pierres de construction abondent à certaines époques.

Les voies de communication présentent elles aussi un grand intérêt. Les routes pavées ou non, les canaux, les ports sont autant de témoins précieux.

Les constructions militaires jalonnent souvent les voies de communication; il peut s'agir de camps entourés de fossés et de remblais, il peut s'agir de véritables forts aux enceintes de pierres, etc.

Pour le géophysicien qui cherche à «voir» à travers le sol, ces constructions se réduisent à un petit nombre de corps simples aux formes géométriques élémentaires. Le géophysicien, en effet, est incapable de discerner si la structure enfouie qui provoque une anomalie est une mosaïque ou une dalle de grès, si elle est d'époque romaine ou non. Pour lui les différents vestiges se répartissent en quatre grands groupes:

I. *Les plans horizontaux*, c'est-à-dire tout ce qui peut se schématiser par une surface horizontale plane d'assez grande dimension. Dans cette catégorie entrent les foyers, les fonds de cabane, les dallages, les hypocaustes, les routes, etc.

II. *Les plans verticaux* ou tout ce que l'on peut assimiler à une paroi verticale, tels que murs en brique, en pierre, etc.

III. *Les amas*; ce terme un peu vague recouvre toutes les structures n'ayant pas un contour bien défini ou du moins ne pouvant pas se réduire à une structure géométrique simple. Ainsi les fours de potiers, les fonderies, les tumuli, les dépotoirs, etc., appartiennent à cette catégorie.

IV. *Les cavités*. Ce groupe comporte aussi bien les excavations actuellement comblées que celles demeurées en partie vides, comme par exemple les fossés, les tombes, les cystes, les souterrains, etc.

A côté de ces quatre groupes principaux on peut mentionner les objets métalliques, bien qu'ils soient assez rares.

Cette subdivision des vestiges archéologiques en groupes, imposée au géophysicien par les limites de ses méthodes, facilitera quelque peu le choix des techniques efficaces dans chaque cas. Mais avant de pouvoir choisir judicieusement le mode de prospection le mieux adapté, il est indispensable de connaître, fût-ce sommairement, pour chaque méthode, la nature des grandeurs mesurées.

Ces indications préliminaires figurent sur le tableau I. Ce tableau montre d'autre part les principaux domaines d'efficacité des diverses méthodes.

La photographie aérienne enregistre surtout des anomalies de la couverture végétale, liées en général à des drainages différentiels; d'autre part elle fait apparaître des variations du relief associées aux structures enfouies.

Le magnétisme met en évidence des variations locales de la teneur en éléments ferromagnétiques.

La résistivité électrique permet de distinguer des structures différant du sous-sol par leur teneur en eau, et par la qualité de cette eau.

La sismique est sensible aux variations locales d'élasticité, ou si l'on préfère, à première vue, de la cohésion dans le sous-sol.

La gravimétrie devrait permettre de déceler certaines cavités importantes dont la densité est très différente de celle du terrain environnant.

Le détecteur de mines est sensible à la présence, dans le sous-sol, de métaux bons conducteurs d'électricité ou possédant une forte aimantation.

Le tableau I, répétons-le, n'offre pas une liste exhaustive des cas possibles, et n'a qu'une valeur régionale; cependant, tout schématique qu'il est, il fait apparaître une subdivision des méthodes en trois groupes principaux qui correspondent aux trois types d'études mentionnés dans notre introduction. Ces trois types sont:

- Les prospections préliminaires utilisées lorsque la région choisie ne montre, à première vue, aucun vestige archéologique.
- Les prospections de vérification qui interviennent lorsque la région choisie montre des structures très recouvertes dont on aimerait savoir si elles sont d'origine humaine ou naturelle.
- Les prospections de détail qui permettent de localiser parmi des vestiges apparents ceux qui sont les plus dignes d'intérêt.

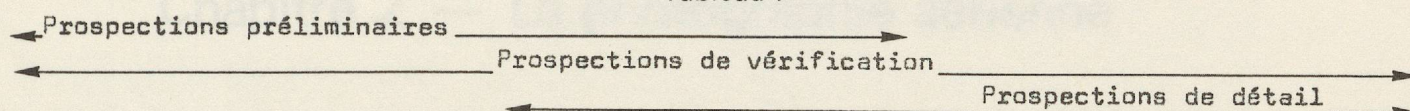
Il faut insister sur le fait que les différentes méthodes de prospection sont complémentaires et il est souvent intéressant d'en utiliser plusieurs conjointement.

En résumé, le choix de la méthode dépend de divers facteurs qui sont:

1. Le but des travaux de prospection.
2. La nature présumée des structures archéologiques.
3. La nature du sol à prospecter.
4. La superficie de l'aire à explorer.

Quelle que soit la ou les méthodes choisies, il faudra tenir compte de l'épaisseur des terrains recouvrant les vestiges archéologiques.

Tableau I



	Photographie aérienne	Magnétisme	Résistivité électrique	Sismique	Gravimétrie	Détecteur de mines
<u>Plans</u>						
<u>Horizontaux</u>						
Dallage	◄►	◄	►	►	○	○
Hypocauste	◄►	◄	►	►	○	○
Fond de cabane	◄	◄	◄	○	○	○
Foyer	○	►	◄	○	○	◄
Route	◄►	◄	►	◄►	○	○
Toit effondré etc...	◄	◄►	◄►	◄►	○	○
<u>Plans</u>						
<u>Verticaux</u>						
Mur en pierre	◄►	◄	◄►	◄►	○	○
Mur en brique	◄►	◄►	◄►	◄►	○	◄►
Levée de terre	◄►	◄►	◄	○	○	○
Parois en bois	◄►	○	○	◄	○	○
Pieux etc...	◄	○	○	○	○	○
<u>Amas</u>						
Fours à fer	◄►	►	◄►	◄	○	◄►
Fonderie	◄►	►	◄►	◄	○	◄►
Four de potier	◄►	►	◄►	◄	○	◄
Tumulus	◄►	◄►	►	◄►	○	○
Dépotoir etc...	◄	◄	►	○	○	○
<u>Cavités</u>						
Fossés	◄►	►	◄	○	○	○
Tombes	◄	►	◄►	◄►	◄	○
Cystes	◄	►	◄►	◄►	◄	○
Souterrains etc...	◄	◄	◄►	◄	◄	○
<u>Objets</u>						
<u>métalliques</u>						
Fer	○	►	○	○	○	◄►
Or	○	○	○	○	○	◄►
Argent	○	○	○	○	○	◄►
Cuivre	○	○	○	○	○	◄►
Etain	○	○	○	○	○	◄►
Bronze etc...	○	○	○	○	○	◄►

► souvent efficace, ◄► assez souvent efficace, ◄ rarement efficace, ○ inefficace

Chapitre 2 — La photographie aérienne

2.1 Introduction

Cette méthode, liée à la conquête de l'air par l'homme, est relativement jeune.

Avant la première guerre mondiale, quelques sites avaient été observés d'un ballon (zone d'Ostie en Italie, Stonehenge en Angleterre). L'application de la photographie aérienne à l'archéologie devient réellement une méthode usuelle dès la première guerre mondiale. On peut citer, de 1916 à 1919, les études de Rey en Macédoine et, dès 1925, les travaux du Père Poidebard en Syrie. Pendant la deuxième guerre mondiale, du fait de l'utilisation intensive de l'aviation, la photographie aérienne prend une importance toujours plus grande. Peu à peu, les méthodes d'enregistrement et d'interprétation se perfectionnent, permettant une meilleure exploitation de la couverture aérienne; à l'heure actuelle, les photographies prises d'avion sont utilisées de façon systématique. Elles ont une importance toute particulière dans les opérations de sauvetage où il faut agir vite et réaliser rapidement un inventaire du patrimoine archéologique.

2.2 Principe de la méthode

Le premier but de la photographie aérienne est de rendre accessible rapidement une image planimétrique et altimétrique d'une vaste zone; de plus, grâce aux photographies de détail, prises à basse altitude et enregistrant les anomalies de la couverture végétale, la photographie aérienne peut devenir une véritable méthode de prospection.

Le principe est le suivant: un site archéologique, enfoui sous terre, constitue une hétérogénéité du milieu dans lequel il se trouve. Cette hétérogénéité peut se traduire par des traces en surface, traces qui seront différentes selon la nature du sol, la nature du site, la végétation, la saison...

Ce sont ces traces qui vont apparaître sur les photographies aériennes comme des anomalies pédologiques, phytologiques, morphologiques, etc.

Malheureusement, n'importe quelle photographie aérienne n'est pas utilisable pour l'archéologue; il est rare, en effet, que ces traces se révèlent bien du premier coup. Les prises de vue devront être nombreuses, exécutées en diverses saisons, à des heures et sous des éclairages variés, échelonnées parfois sur des années, ce qui rend la méthode assez coûteuse.

Les photographies peuvent être prises à la verticale ou bien obliques; il semble que, dans nos régions, les clichés obliques soient les meilleurs (quand l'observateur est placé entre la source de lumière et la zone à étudier).

En général, la prospection à basse altitude s'effectue entre 300 et 600 m et l'enregistrement se fait au cours d'un virage pouvant descendre jusqu'à 50 m.

Jusqu'à ces dernières années, la plupart des photographies aériennes étaient en noir et blanc. Diverses possibilités apparaissent depuis peu, ce sont d'une part différentes émulsions (infra-rouge, infra-couleur, thermographie) et d'autre part de nouveaux procédés de restitution qui permettent d'améliorer l'interprétation (filtrage laser, méthode des équidensités colorées).

2.3 L'interprétation

L'interprétation des photographies aériennes offre certaines difficultés qui ne peuvent être surmontées qu'au prix d'une connaissance poussée des problèmes archéologiques et de la topographie de la région.

A première vue deux éléments sont importants dans l'interprétation : la forme des traces qui apparaissent sur les photographies et leur teinte.

La forme

Dans de bonnes conditions, certaines traces dessinant des formes géométriques, on voit apparaître des structures linéaires, des droites, des cercles, des rectangles, etc.

Quand les conditions ne sont pas parfaites, on voit alors seulement des taches, claires ou sombres, diffuses ou régulières, selon les cas. Il est souvent très difficile d'interpréter ces formes complexes, il faut essayer de « reconnaître » un ensemble de taches, de le dégager de son environnement, de le replacer dans le contexte archéologique.

La teinte

C'est aussi un indice important, mais très capricieux, car pour un même site les teintes peuvent varier énormément avec différents facteurs.

Les principaux facteurs qui influencent forme et teinte sont les suivants :

La nature du terrain est un élément primordial puisque les traces que l'on voit apparaître sur les photographies sont étroitement liées aux drainages différentiels existant dans le terrain. Elles peuvent changer d'un terrain à l'autre et présenter des aspects très divers selon la géologie.

Ainsi des fossés plus ou moins comblés se marquent sur *sol nu* par des taches dues à l'humidité relative. Ces taches *seront claires sur fond sombre* dans des terrains alluviaux ou argileux car l'argile est imperméable et l'eau s'évapore plus vite dans la zone du fossé ; par contre, ce même fossé apparaîtra en *sombre sur fond clair* pour des sols crayeux.

Pour les mêmes raisons, un mur arasé enfoui dans un terrain limoneux donnera une *trace claire* du fait du drainage plus poussé dans la zone du mur.

La végétation. La croissance des cultures est fonction de la quantité d'humus dans le terrain. Cette quantité se trouve augmentée sur un fossé qui a été comblé par de la terre superficielle ; par contre elle diminue au-dessus d'un mur arasé.

Il s'en suit que la végétation sera plus fournie et plus verte au-dessus du fossé, ce qui, sur la photographie aérienne, donnera une *tache sombre* ; inversement, au-dessus du mur, la végétation plus clairsemée se traduira par des *traces plus claires*.

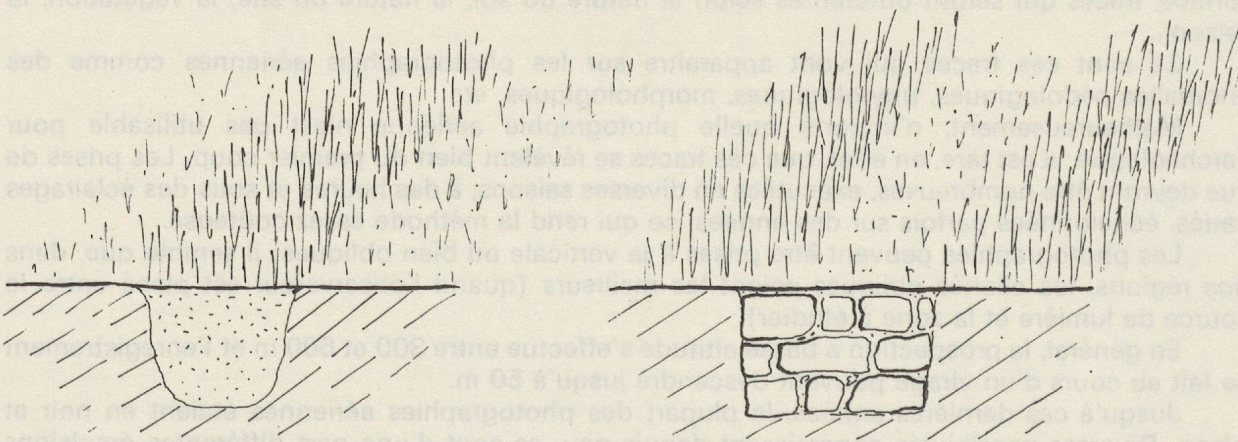


Figure 4

Ces différences sont nettes surtout dans les cultures de céréales, les prairies sont peu propices, sauf par temps très sec, et les traces deviennent indiscernables dans un champ de pommes de terre ou de betteraves.

Le facteur saisonnier est lui aussi important car il conditionne l'état des cultures; il ne faut pas négliger les photographies prises en hiver. Lors d'un dégel rapide, il peut se produire une fusion irrégulière de la neige, fusion plus hâtive au-dessus des fossés et par contre plus lente au-dessus des murs.

En dehors des effets dus à la nature du terrain, de la végétation ou de la saison, il existe des traces que l'on peut attribuer à un microrelief.

Il arrive que certains sites n'aient pas été entièrement nivelés, ou qu'ils réapparaissent en creux ou en bosses du fait de la compaction différentielle; ces petites anomalies du relief ne sont pas perceptibles au sol, mais un avion volant à faible altitude peut enregistrer des ombres portées.

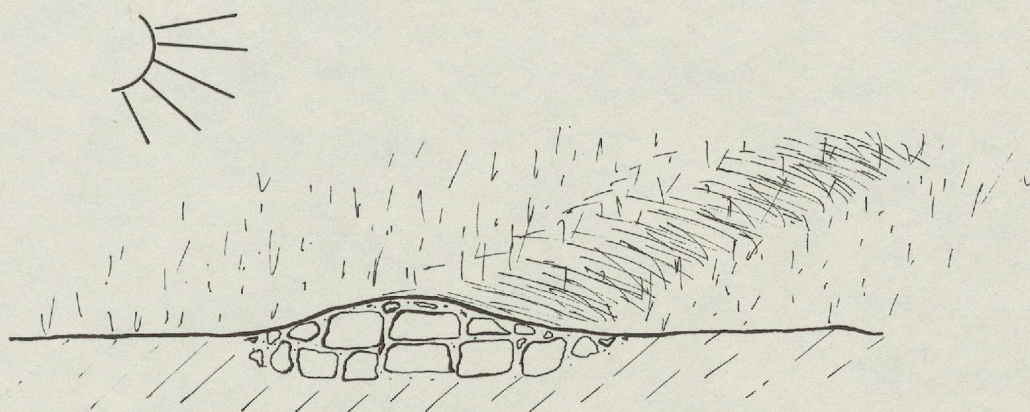


Figure 5

Ce phénomène est surtout utilisé dans les zones dépourvues de végétation, les zones désertiques, etc.

On ne peut dans ce cas obtenir une grande précision, mais il est possible de dégager la forme et les lignes générales du site.

Il faut rappeler que beaucoup de ces indices révélateurs ne se manifestent que rarement et sont très fugitifs. De plus, certaines conditions peuvent parfois inverser les contrastes de teinte; il est donc nécessaire de prendre de nombreuses précautions pour interpréter et utiliser les photographies aériennes de manière efficace.

Malgré ces restrictions, les clichés pris d'avion ont fourni un bon nombre de résultats positifs dont l'image ci-dessous constitue une illustration.

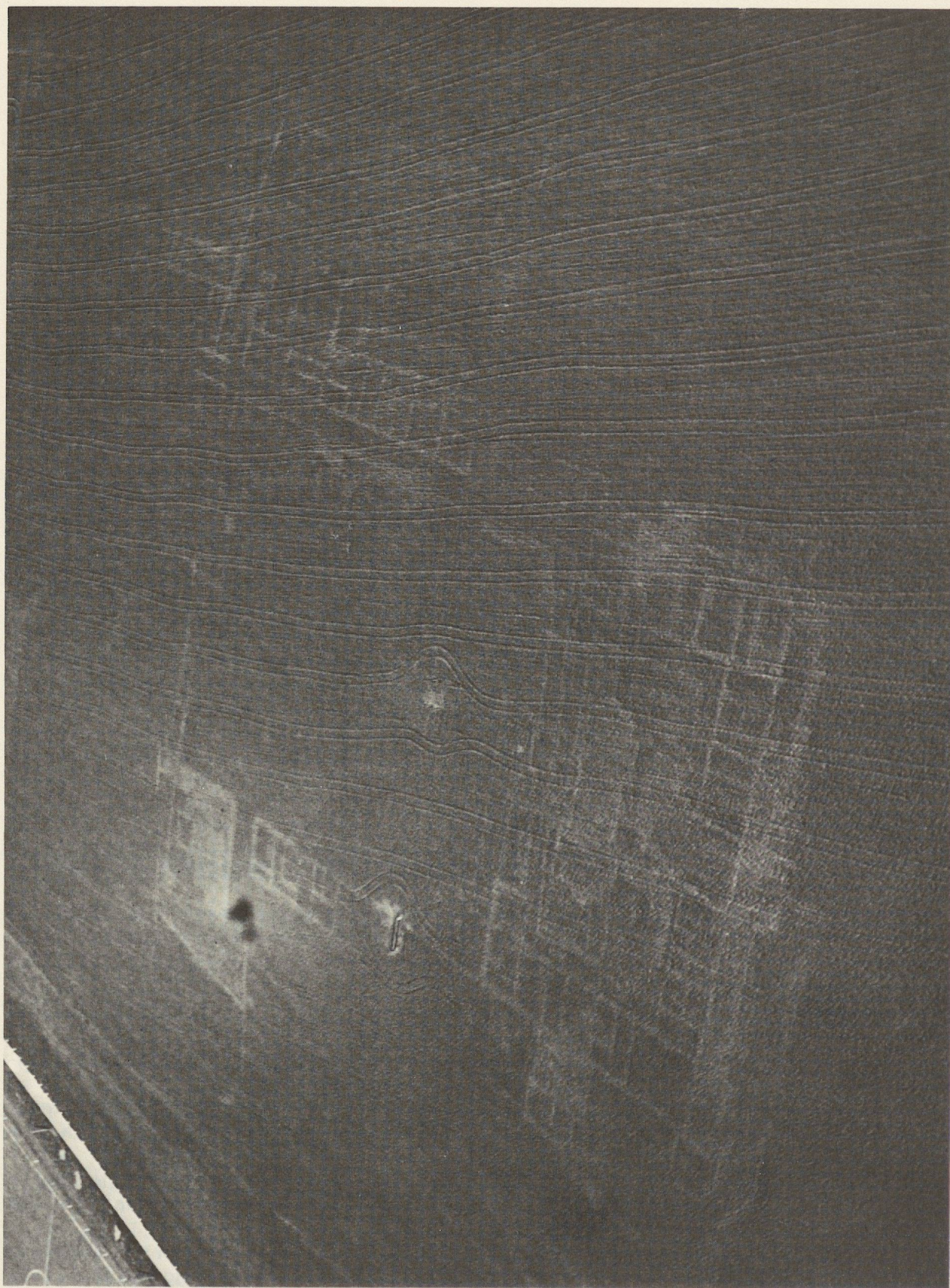
En fait chacun des grands groupes de structures archéologiques que nous avons mentionnés peut fournir des exemples de prospection par la photographie aérienne.

Les plans horizontaux se marquent par des taches en général claires et régulières à l'emplacement des mosaïques ou des dallages. Une route, elle, est reconnaissable par une trace claire en général linéaire.

Les plans verticaux, les murs en particulier, ont fourni les clichés les plus spectaculaires: leurs traces permettent parfois d'établir le plan des bâtiments avec grande précision. Les villas gallo-romaines sont souvent de bons exemples.

Les parois en bois sont moins facilement décelables; il faut citer cependant une photographie prise en 1964, à Genlis (France), qui permet de voir une fortification à double fossé avec palissade, où chaque touffe de luzerne indique l'emplacement d'un pieu.

Les amas, les tumuli plus particulièrement, peuvent faire l'objet de photographies révélatrices.



«Villa gallo-romaine du Vieux Rouen-sur-Bresles», — cliché Roger Agache, paru dans le N° 65 d'*Archéologia*, page 66.

Les cavités, dont les fossés et les caves, ont fourni une bonne part des exemples les plus frappants. Les habitats néolithiques, les camps et les enceintes repérés par photographie aérienne sont aujourd'hui extrêmement nombreux. De même les fossés circulaires des hommes de la protohistoire marquent le sol de façon souvent très perceptible.

2.4 Conclusions

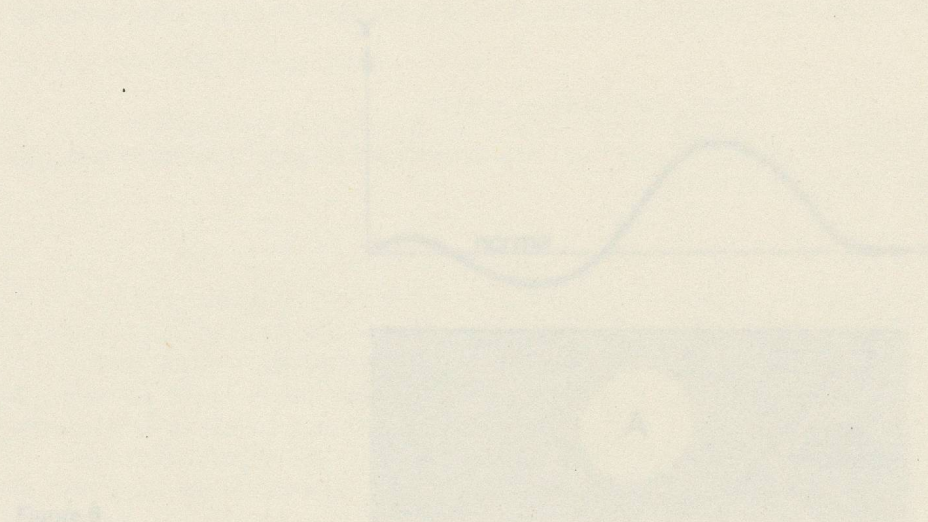
La photographie aérienne offre de grandes possibilités à l'archéologue. Cependant, il faut insister sur le fait qu'on ne doit pas demander à la photographie aérienne trop de détails. Elle reste une méthode de prospection générale qui permet parfois de situer un site et d'en définir l'extension.

En outre, depuis peu, on a utilisé la photographie aérienne pour étudier la typologie des structures, leur mode de groupement et d'association; ceci dans le but d'établir un inventaire archéologique complet, base nécessaire aux études comparatives et de synthèse qui sont la clef de la connaissance de l'homme.

Il est rare en effet que les vestiges archéologiques soient uniques en leur genre. Certains sites présentent des caractéristiques propres à une région, à une époque, et dont la compréhension générale peut être facilitée par l'étude d'un ensemble de photographies.

3.2 Principe de la méthode

En étudiant des sites ou des profils de terrain, on mesure les variations du champ magnétique terrestre. Perturbations en se produisant, quand on creuse, par exemple, un fossé, une fosse ou non, les anomalies ou le champ magnétique s'altèrent.



Pour comprendre la signification de ces anomalies, il faut de priorité mesurer soigneusement d'une part le champ terrestre, et d'autre part, la nature des corps enterrés.

3.2.1 Le champ magnétique terrestre

En un point C, à un point donné, le champ magnétique terrestre peut être représenté par un vecteur $\vec{F}$ que l'on définit ordinairement par rapport aux axes géographiques du lieu.

Chapitre 3 — Les méthodes magnétiques

3.1 Introduction

Les méthodes magnétiques sont souvent employées en archéologie, surtout depuis l'apparition d'appareils très précis mis au point ces dernières années.

Ce sont des méthodes rapides, de coût modéré et de mise en œuvre facile. Malheureusement, le paramètre mesuré est influencé par de nombreux facteurs, ce qui rend l'interprétation souvent délicate.

3.2 Principe de la méthode

En exécutant des cartes ou des profils de mesures, on localise des perturbations du champ magnétique terrestre. Perturbations qui se produisent quand un corps aimantable A , archéologique ou non, est soumis ou a été soumis à l'action du champ magnétique terrestre T .

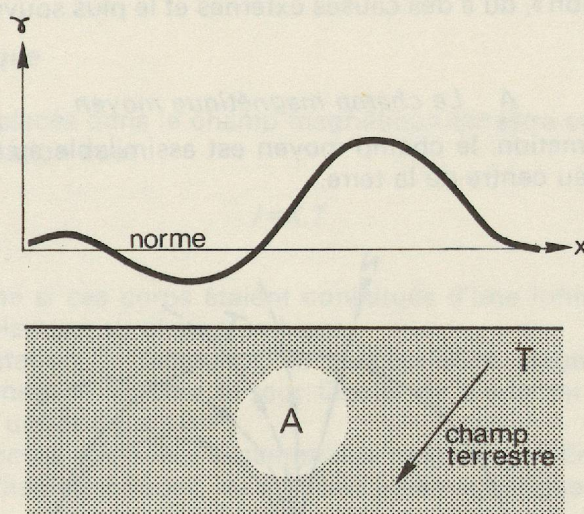


Figure 6

Pour comprendre la signification de ces anomalies, il faut au préalable étudier brièvement, d'une part le champ terrestre, et, d'autre part, la nature des corps aimantables.

3.2.1 Le champ magnétique terrestre

En un point O , à un instant donné, le champ magnétique terrestre peut être représenté par un vecteur T que l'on définit ordinairement par rapport aux axes géographiques du lieu.

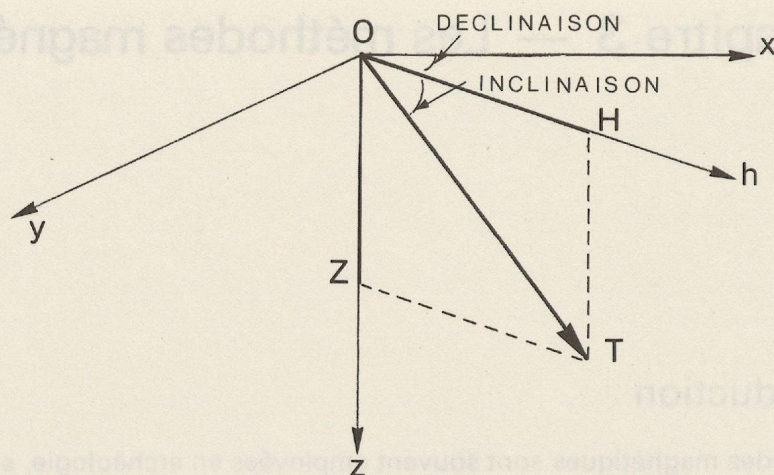


Figure 7

La longueur du vecteur T est proportionnelle à l'intensité du champ. Cette intensité s'exprime en œersteds ou en gammas, et vaut pour nos régions environ 46 000 gammas.

Avec les appareils très précis que sont les magnétomètres à protons, on peut atteindre à l'heure actuelle une précision d'un centième de gamma, mais plus couramment on mesure T au gamma près.

Tous les éléments du champ (grandeur, direction, composantes) peuvent être mesurés mais, pour la prospection, on se contente de mesurer un seul élément, en général le champ total (T).

Le champ magnétique terrestre peut être considéré comme la résultante de :

- A Le champ moyen, dû à des causes internes du globe terrestre.
- B « Le champ de variation », dû à des causes externes et le plus souvent lié à des phénomènes solaires.

A Le champ magnétique moyen

En première approximation, le champ moyen est assimilable au champ que fournirait un dipôle magnétique placé au centre de la terre.

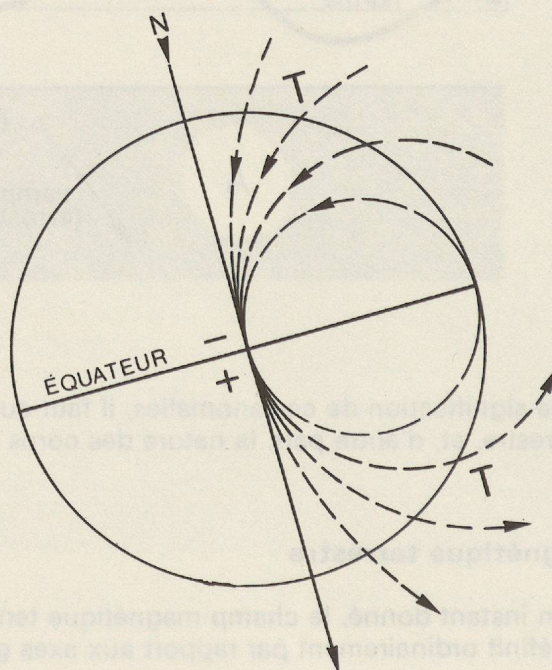


Figure 8

En fait, à ce champ dipôle s'ajoute une série de champs secondaires régionaux. L'ensemble constitue le champ moyen qui, bien qu'il varie lentement, peut, à l'échelle de nos études, être considéré comme stable.

B « Le champ de variation »

Ce champ supplémentaire instantané est dû à des causes externes au globe terrestre. Il est à l'origine de variations rapides du champ mesuré. Nous reviendrons sur ce point plus loin.

3.2.2 Nature des corps aimantables

L'aimantation des solides

Nous avons vu que les anomalies sont dues à la présence de corps aimantables dans le champ magnétique terrestre.

L'aimantation d'un corps placé dans un champ T peut s'exprimer par la relation suivante :

$$I = K.T + I_p$$

I = Intensité d'aimantation, c'est une grandeur vectorielle exprimée en gammas. Cette intensité est proportionnelle au champ T , le facteur de proportionnalité est K , la susceptibilité magnétique du corps. I_p représente la part d'aimantation qui peut avoir été acquise par le corps à un certain moment de son histoire. C'est l'aimantation rémanente qui peut être oblique par rapport à la direction actuelle du champ inducteur.

La susceptibilité magnétique

Nous avons vu que placés dans le champ magnétique terrestre certains corps s'aimantent, et que l'intensité d'aimantation vaut :

$$I = K.T$$

Tout se passe comme si ces corps étaient constitués d'une infinité de petits dipôles qui tendent à s'aligner parallèlement au champ ambiant.

Dans cette représentation, le facteur K , la susceptibilité magnétique, caractériserait le nombre de dipôles par unité de volume et leur faculté de s'orienter sous l'action du champ extérieur. K se mesure en unités c.g.s 10^{-6} .

On peut classer les corps selon leur susceptibilité magnétique. En se bornant à l'essentiel, on distingue les matières diamagnétiques, les matières paramagnétiques et les matières ferromagnétiques.

Ces dernières sont les plus importantes pour la prospection. Elles sont caractérisées par une très forte susceptibilité.

Dans le groupe ferromagnétique, pris au sens large, on peut citer :

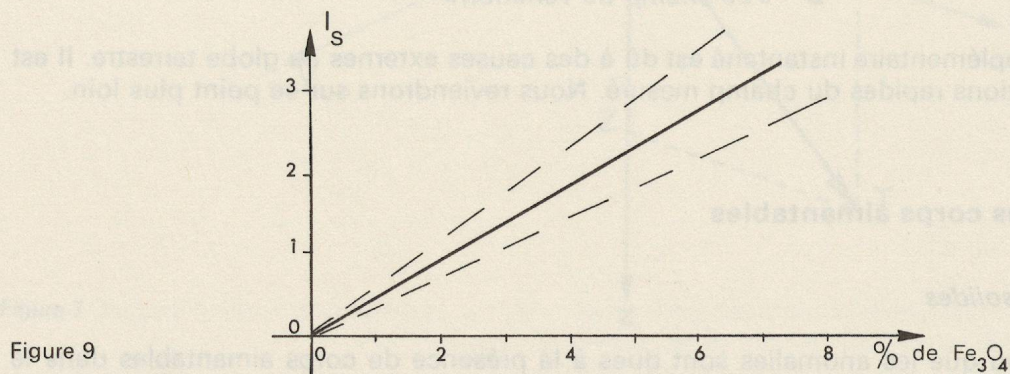
Le fer	$K = 10^7 \text{ à } 10^9 \cdot 10^{-6}$
La magnétite	$K = 100.000 \cdot 10^{-6}$
L'ilménite	$K = 30.000 \cdot 10^{-6}$
L'hématite	$K = 150 \cdot 10^{-6}$

Ces valeurs sont des valeurs moyennes.

La présence de ces minéraux ferromagnétiques, et en particulier la présence de magnétite, a une influence prépondérante sur la susceptibilité des roches, comme le montre la figure 9.

Relation entre l'intensité d'aimantation et la teneur en magnétite

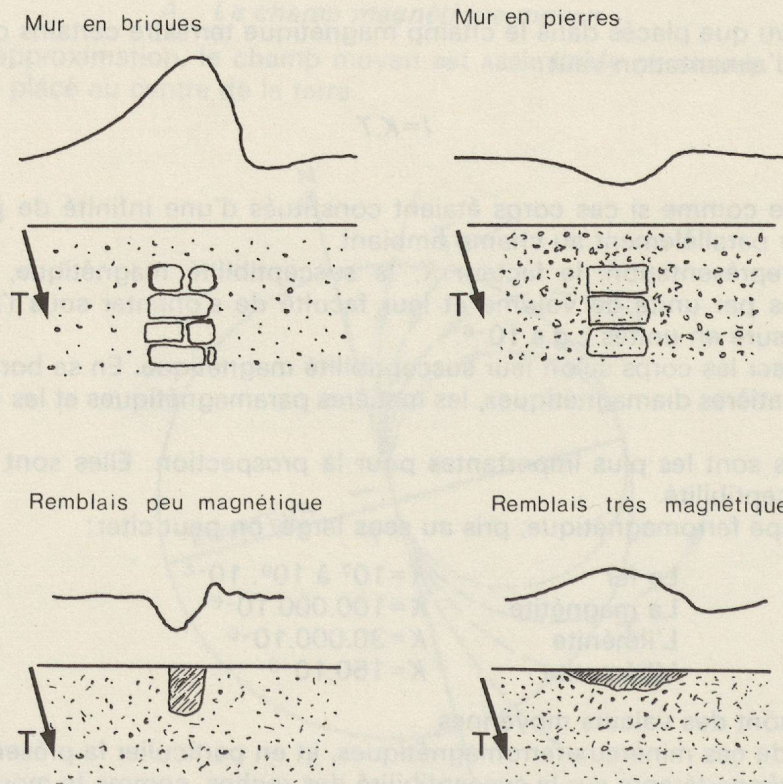
D'après T. Nagata



Conséquences archéologiques

D'après ce que nous venons de voir, des anomalies intéressantes pourront apparaître lorsque les structures archéologiques présentent des susceptibilités magnétiques nettement plus fortes ou nettement plus faibles que le milieu ambiant.

Anomalies magnétiques sur diverses structures archéologiques



Dans nos régions et dans les terrains superficiels qui intéressent l'archéologue, les susceptibilités magnétiques relativement élevées sont associées à un nombre restreint d'objets.

Parmi ceux-ci, il faut mentionner tout d'abord les objets en fer qui peuvent aller du couteau aux scories accompagnant les fonderies. Les briques et les tuiles cuites sont elles aussi souvent aimantables et aimantées. Certains blocs erratiques (roches vertes, ...) présentent des susceptibilités magnétiques assez fortes. Enfin, et ceci est très important pour l'archéologue, les sols superficiels acquièrent parfois des susceptibilités magnétiques élevées, sous l'effet d'oxydo-réductions dues à l'humidité, à des fermentations organiques et surtout au feu (effet Le Borgne).

A la longue, par le jeu des travaux agricoles, se forme une couche superficielle de 20 à 30 centimètres d'épaisseur, présentant une forte susceptibilité. Cette dernière est d'autant plus forte que le sol a été très occupé et soumis à des feux répétés. Les valeurs de K peuvent varier dans ces sols de 10 à $1000 \cdot 10^{-6}$.

La figure 10 souligne l'importance pour la prospection de la susceptibilité magnétique non négligeable des terres superficielles. Ce sont les irrégularités dans la répartition de ces terres qui, souvent, servent à déceler des structures archéologiques.

L'aimantation rémanente — I_p

L'aimantation rémanente est une aimantation qui subsiste après la disparition de tout champ magnétique extérieur. Il existe plusieurs aimantations de ce type, celle qui nous intéresse plus particulièrement est l'aimantation thermorémanente *A.T.R.*

Les chercheurs ont observé que les corps contenant des éléments ferromagnétiques s'aimantent progressivement lorsqu'ils sont refroidis à partir d'une haute température, supérieure au point de Curie, en présence d'un champ magnétique. L'aimantation ainsi figée est dite thermorémanente, elle peut être représentée par un vecteur dont la direction est celle du champ lors du refroidissement.

Le matériel ainsi affecté, les terres cuites en particulier, semble avoir en quelque sorte acquis une « mémoire magnétique ».

Conséquences archéologiques

Le magnétisme rémanent de certains corps est intéressant à deux points de vue : d'une part, cette aimantation « fossile » peut, sous certaines conditions, perturber le champ et provoquer des anomalies repérables en prospection. D'autre part, elle peut être utilisée comme moyen de datation. Nous avons vu que les éléments du champ moyen sont affectés d'une lente variation. Si, pour une région donnée et une période historique donnée on connaît la variation de ces éléments, on peut par comparaison situer dans le temps le matériel archéologique étudié. Ceci en déterminant sur les échantillons la direction et l'intensité de l'aimantation rémanente qui correspond à celle du champ terrestre au moment du dernier refroidissement.

Il est clair que cette méthode ne peut s'appliquer qu'à des objets qui n'ont pas été déplacés depuis l'époque de leur cuisson ; il peut s'agir, par exemple, de foyers, de parois de fours, de fours contenant des pots, des briques ou des tuiles. Les fragments isolés, les tessons ne sauraient se prêter à ce type d'étude.

D'autre part, pour plus de sûreté, il faut disposer d'un grand nombre d'échantillons et il est indispensable d'éliminer d'éventuelles aimantations parasites.

3.3 Nature et forme des anomalies

Après avoir examiné, dans leurs grandes lignes, les interactions dans le sous-sol du champ terrestre et du corps aimantable, il convient d'étudier l'influence de ces interactions sur des mesures faites en surface.

En prospection archéologique, on utilise généralement des magnétomètres à protons qui permettent de mesurer l'intensité du champ total F .

Ce dernier peut être représenté par un vecteur qui résulte de l'addition du vecteur champ terrestre T et d'un ou de plusieurs vecteurs anomaux A dus à la présence du corps perturbateur (figure 11).

Lorsque F mesuré sur le terrain est plus long que le vecteur champ terrestre normal, l'anomalie est dite positive, alors qu'elle est négative lorsque F est plus court que T .

De nombreux facteurs influencent la longueur et l'orientation du vecteur anormal et en définitive l'allure de l'anomalie repérée en surface. Parmi ces facteurs, il faut mentionner en premier lieu l'orientation, surtout l'inclinaison, du champ magnétique terrestre dans la région étudiée. Le contraste des susceptibilités et un éventuel magnétisme rémanent jouent aussi un rôle important. Enfin, la forme et les dimensions du corps perturbateur affectent notablement l'allure de l'anomalie.

Il est indispensable lors d'une prospection de prévoir, du moins grossièrement, l'allure des anomalies d'origine archéologique pour pouvoir les distinguer de celles d'origine géologique.

Fort heureusement, on a presque toujours une idée de la forme des structures recherchées, fossés, remblais, ... si bien que toutes les anomalies repérées ne présentent pas à priori un intérêt égal.

D'autre part l'expérience a montré que les anomalies d'origine archéologique présentent généralement des amplitudes variant entre quelques gammas et une centaine de gammas.

Enfin, dans les cas difficiles, il est toujours possible de construire des modèles, dont un exemple figure ci-dessous, qui permettent de prévoir l'anomalie susceptible de prendre naissance sur une structure donnée.

Si une certaine connaissance préliminaire approximative de l'effet magnétique des corps recherchés est indispensable, une bonne connaissance des variations de la norme (bruit de fond) ne l'est pas moins.

Les variations de la norme, le bruit de fond.

Perturbations dans l'espace.

A côté des bruits d'origine géologique, il existe dans nos régions fortement habitées, de très nombreuses causes de perturbations. On peut mentionner tous les objets de fer tels que tuyaux, clôtures et débris divers.

En outre, les lignes électriques, principalement celles porteuses de courant continu, sont une grave source de perturbations.

Dans certains cas, le bruit est tel qu'il faut abandonner toute prospection magnétique.

Perturbations dans le temps

La principale de ces perturbations est la variation diurne. Due à des causes extra-terrestres elle est heureusement assez régulière et son effet peut être soustrait des mesures de terrain.

Divers procédés permettent cette élimination, tous appliquent le même principe et nécessitent la mesure simultanée ou presque simultanée du champ en deux points. D'une part le point de référence où seule la variation diurne affecte les mesures successives, d'autre part les points de prospection affectés à la fois par la variation diurne et les variations spatiales.

3.4 L'interprétation

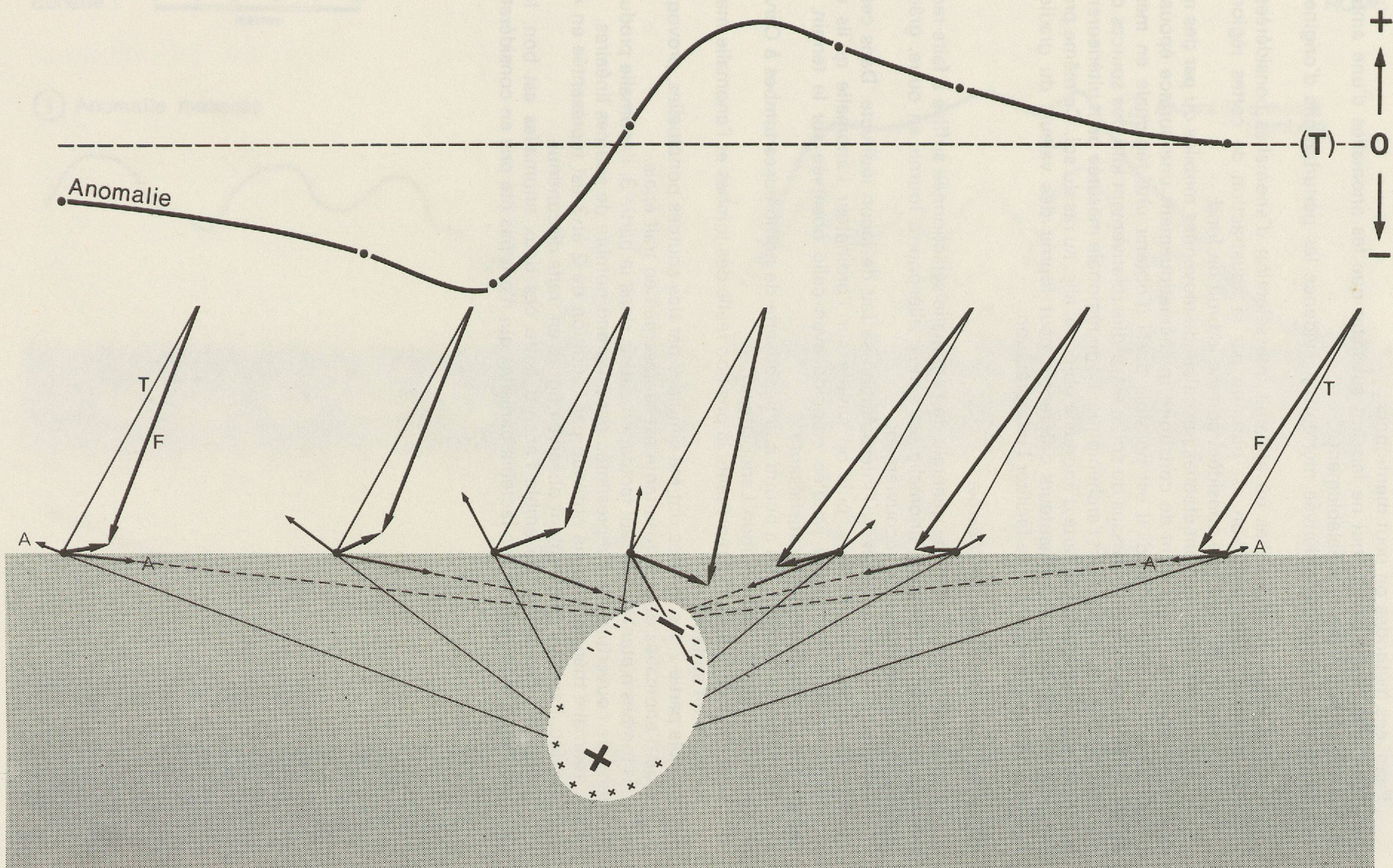
La mise en évidence des anomalies significatives

Lorsque l'on a obtenu une carte ou des profils magnétiques, il est indispensable de les débarrasser de toutes les variations du champ dont l'allure et les dimensions ne sont pas compatibles avec celles des anomalies causées par des vestiges archéologiques.

Pour obtenir ce résultat, il faut filtrer les données recueillies lors de la prospection.

Il existe de très nombreuses méthodes de filtrage, certaines nécessitant l'emploi de l'ordinateur, mais toutes doivent laisser une large place au sens critique et à l'expérience de l'interprète.

Figure 11 Champ terrestre normal (T) et champ perturbé (F) en présence d'un corps magnétique



Parmi ces méthodes on peut mentionner :

- Les filtres passe-bande, qui ne laissent subsister que les anomalies d'une amplitude et d'une largeur choisies préalablement.
- La première et seconde dérivée mettent en évidence les perturbations d'origine superficielle.
- La production de résiduelles où apparaît une sélection d'anomalies considérées comme intéressantes; cette sélection est obtenue par la soustraction de cartes régionales qui englobent ce qui peut être considéré comme le bruit de fond.

Ces régionales sont souvent établies par calcul de moyennes mobiles ou par des méthodes dites analytiques qui permettent de construire mathématiquement une surface épousant celle constituée par le bruit de fond. Il est possible aussi d'obtenir une régionale en mesurant le champ à quelques mètres au-dessus du sol ; c'est-à-dire relativement loin des sources d'anomalies superficielles qui intéressent l'archéologue. Cette régionale mesurée peut ultérieurement être soustraite point par point à la carte d'anomalie obtenue, elle, au ras du sol. Ce même procédé de mesures simultanées à deux hauteurs différentes peut fournir des valeurs du gradient ($T_{h1} - T_{h2} / \Delta h$) parfois susceptibles de faciliter l'interprétation.

L'analyse d'une anomalie significative

Il n'est pas rare que la forme générale de l'anomalie sélectionnée suffise à faire reconnaître le corps perturbateur. Si cette anomalie est simple elle pourra fournir en outre, grâce à une analyse rapide, l'épaisseur du recouvrement.

Dans les cas plus complexes, l'interprétation se fait de façon indirecte. Dans ces cas, on imagine les corps perturbateurs, puis on simule sur l'ordinateur l'anomalie qu'ils devraient provoquer. Lorsque l'anomalie simulée coïncide avec celle observée sur le terrain, on peut penser que l'interprétation est satisfaisante.

L'exemple ci-dessous, qui a abouti à la découverte de nombreuses tombes à Cerveteri, est dû aux chercheurs de la Fondation Lerici (Italie).

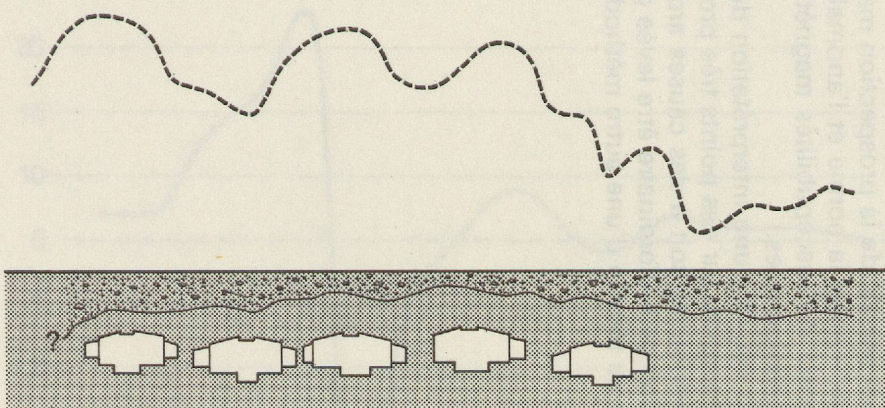
- La partie 1 de la figure 12 représente la position réelle des tombes et l'anomalie magnétique mesurée en surface.
- Dans la partie 2, les tombes ont été simulées par des sources ponctuelles, provoquant une série d'anomalies dont la résultante est représentée en trait épais.
- Les tombes n'étant pas le seul facteur en cause, dans la partie 3, l'anomalie produite par la terre de couverture a été représentée par un grand nombre de sources linéaires.
- L'anomalie théorique finale obtenue par l'addition de 2 et 3 est représentée en 4 en trait continu, l'anomalie réellement observée figure en traits discontinus.
- Il apparaît que dans l'ensemble l'accord entre ces deux anomalies est bon, les écarts pouvant être imputés à des facteurs parasites qui n'ont pas été pris en considération.

Anomalies magnétiques sur des tombes étrusques à Cerveteri.

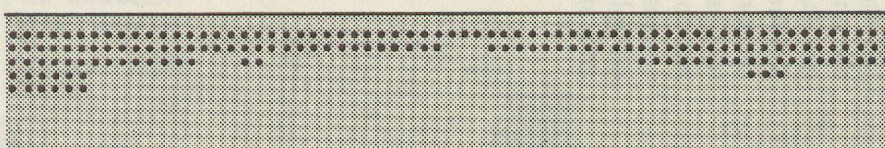
D'après R.E. Linington
Fondation LERICI
ROME

Echelle : 0 2 4 6 8 10
mètres

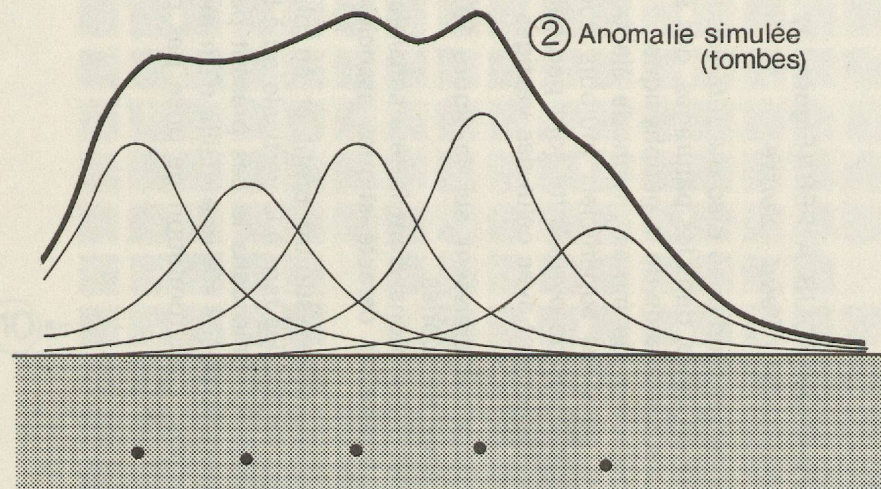
① Anomalie mesurée



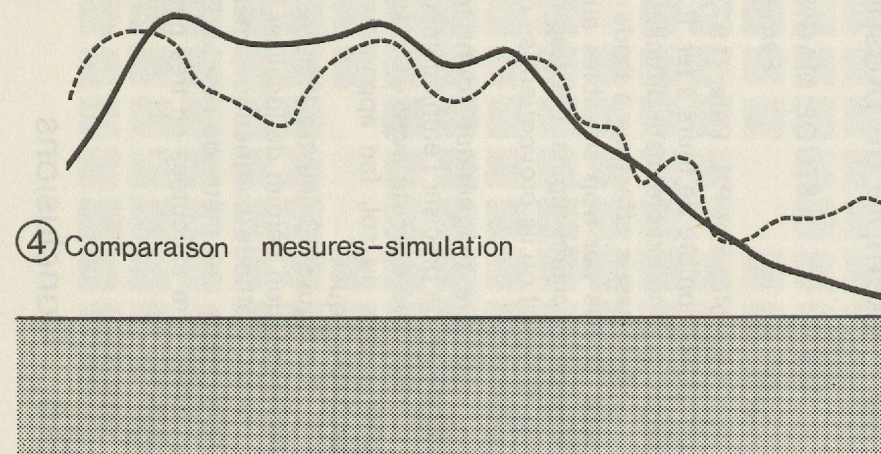
③ Anomalie simulée (sol)



② Anomalie simulée (tombes)



④ Comparaison mesures-simulation



3.5 Exemple de prospection

ÉTUDE MAGNÉTIQUE D'UN FOUR À FER (Figure 13)

Ferreyres - Morandin - Vaud - Suisse

Le professeur P. L. Pelet (1973), lors de ses études au pied du Jura vaudois, a pu localiser un grand nombre de fours à fer. Il a repéré en outre, dans les pâturages, des scories dispersées dont l'origine exacte reste difficile à préciser sans l'aide de la géophysique.

Des essais effectués à l'aide d'un détecteur de mines (méthode électro-magnétique) se sont révélés par trop sensibles aux effets parasites superficiels toujours abondants dans les terrains glaciaires alpins. Les fragments erratiques de pyroxénite sont particulièrement gênants car le signal qu'ils provoquent se confond facilement avec celui des vestiges d'une métallurgie ancienne.

Le levé magnétique, dont les résultats apparaissent sur la figure 13, permet, lui, au contraire, de préciser l'emplacement des amas de scories.

Ce levé exécuté avec un magnétomètre à protons, dont la tête sensible était tenue à 50 centimètres du sol, fait apparaître deux anomalies caractéristiques associées à des vestiges archéologiques.

La figure 13 illustre l'allure de ces anomalies sur un profil et en plan. Cette double représentation permet de localiser les amas de scories tant à la verticale qu'à l'horizontale.

La méthode magnétique, même utilisée comme dans le cas présent pour une étude de détail, reste une méthode rapide. Les mesures placées sur une maille d'un mètre par un mètre peuvent être exécutées en très peu de temps. L'interprétation ne pose pas de problème bien ardu.

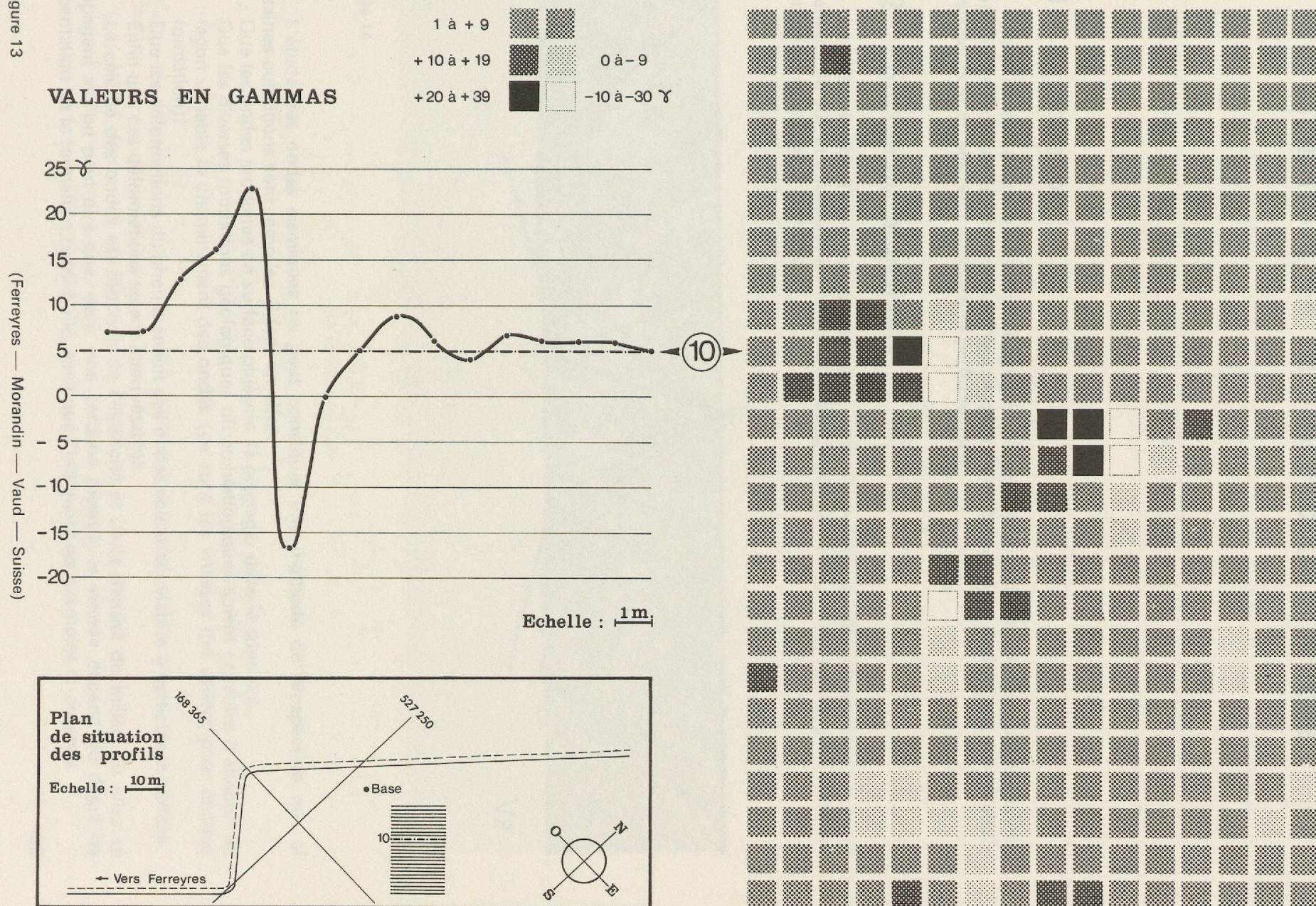
3.6 Conclusions

L'examen de ces quelques exemples nous conduit à rappeler divers faits essentiels :

- Les résultats des prospections géophysiques, de la prospection magnétique en particulier, dépendent principalement du contraste entre la norme et l'anomalie; c'est-à-dire, dans le cas du magnétisme, du contraste entre les susceptibilités magnétiques des terrains environnants et celles des structures archéologiques.
- La complexité des anomalies interdit souvent une interprétation détaillée. Dans ce cas, le rôle de la prospection est d'attirer l'attention sur des points très probablement intéressants.
- Nombre d'anomalies peuvent être attribuées soit à des causes archéologiques, soit à des causes parasites; cette indétermination peut d'ordinaire être levée grâce à une prospection complémentaire restreinte effectuée au moyen d'une autre méthode géophysique (électricité, sismique, ...).

FERREYRES ~ MORANDIN (Four à fer) ETUDE MAGNETIQUE

Figure 13



Chapitre 4 — La prospection sismique

4.1 Introduction

Jusqu'ici la sismique n'a pas été très utilisée pour le repérage de structures archéologiques. Toutefois, de récentes expériences ont montré que cette méthode peut déjà fournir des résultats satisfaisants et qu'elle peut encore être perfectionnée.

4.2 Principe de la méthode

La méthode sismique consiste essentiellement à provoquer un ébranlement en un point déterminé du sol, et à mesurer les temps de propagation des ondes, ainsi créées, pour traverser le sous-sol et revenir à la surface.

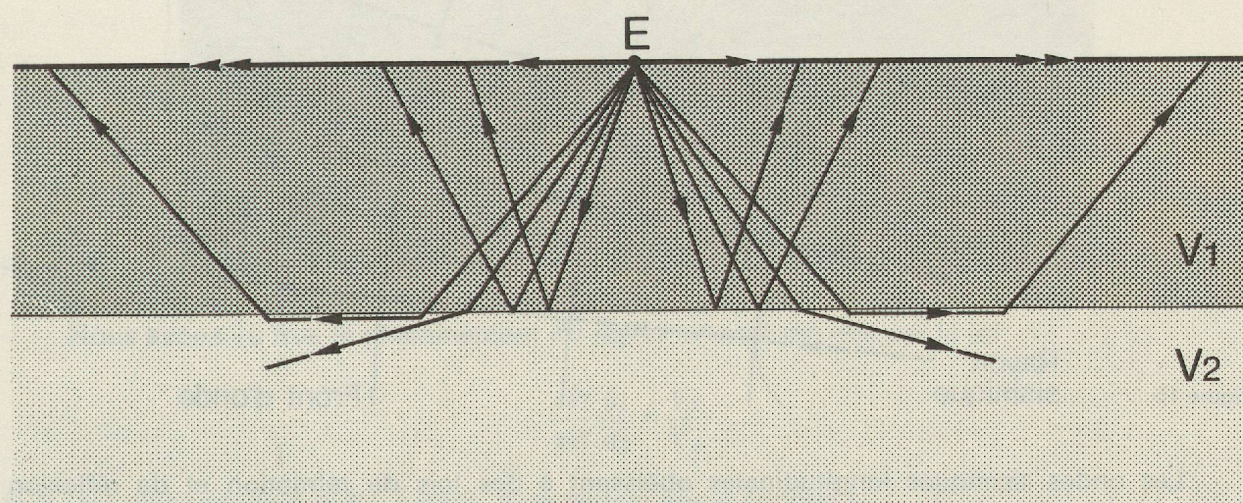


Figure 14

L'étude des ondes sismiques ne peut constituer une méthode de prospection que si certaines conditions sont remplies. Il faut en effet :

- Que les ondes produites en surface puissent se propager dans le sous-sol.
- Que les diverses formations géologiques ou archéologiques soient capables d'affecter de façon variable le cheminement des ondes (ce sont les vitesses qui varient pour chaque formation).
- Que les déformations du cheminement des ondes soient décelables à partir de la surface.
- Enfin que ces déformations soient interprétables.

La célérité des ondes est fonction de l'élasticité et de la densité du milieu où elles se propagent et l'on peut dire que, dans une certaine mesure, la vitesse dépend du degré de cimentation de la formation considérée, ainsi que l'indiquent les exemples ci-dessous.

Terrains meubles de surface	400 à 800 m/s
Argiles	1800 m/s
Calcaires	3000 à 6000 m/s
Roches volcaniques	3000 à 7000 m/s
Air	330 m/s
Eau	1450 m/s

Ces chiffres montrent que souvent une formation donnée se caractérise par une vitesse qui lui est propre. Ces différences de vitesse affectent le cheminement des ondes en leur faisant subir divers avatars (ondes réfléchies, réfractées,...)

Les ondes sismiques artificielles

Nature et forme

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques qui, dans un milieu homogène, se propagent dans toutes les directions à la même vitesse. Les plus rapides de ces ondes sont les longitudinales qui seules nous intéressent ici.

La surface qui en un instant t délimite le volume déjà soumis à l'ébranlement sismique et le sépare de la zone non ébranlée est appelée le front d'ondes. C'est la limite bruit-silence au temps t .

Le rayon sismique est par définition perpendiculaire au front d'ondes en tout point.

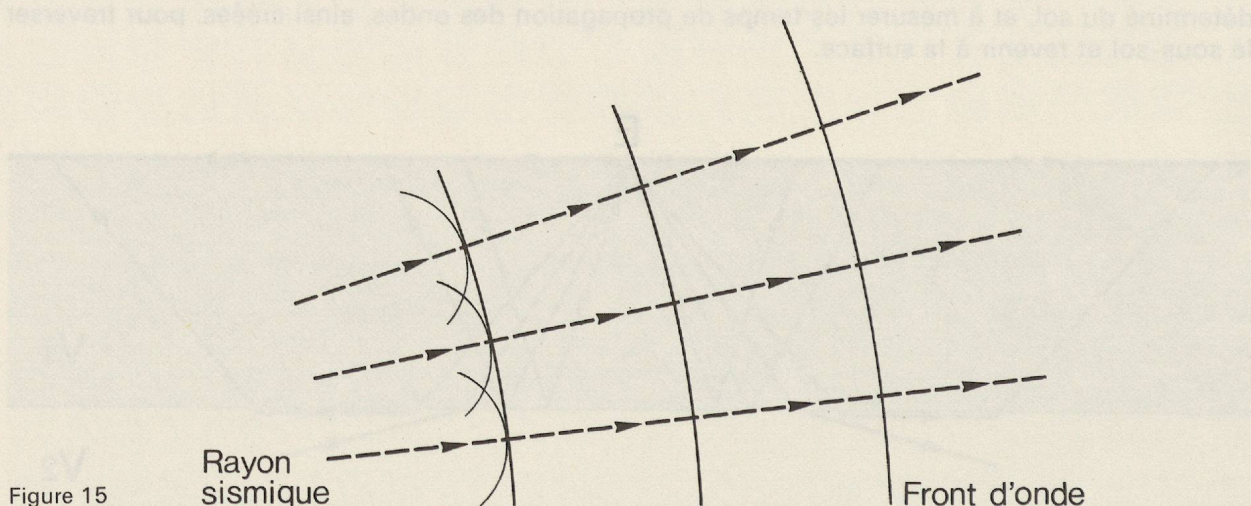


Figure 15

Les ondes sismiques longitudinales obéissent à des lois de réfraction et de réflexion semblables à celles de l'optique, il est commode de les étudier en utilisant la notion de rayon sismique qui est l'analogue du rayon lumineux.

Lorsqu'un tel rayon atteint l'interface qui sépare deux milieux de vitesses différentes, il donne naissance à un rayon réfléchi et à un rayon réfracté.

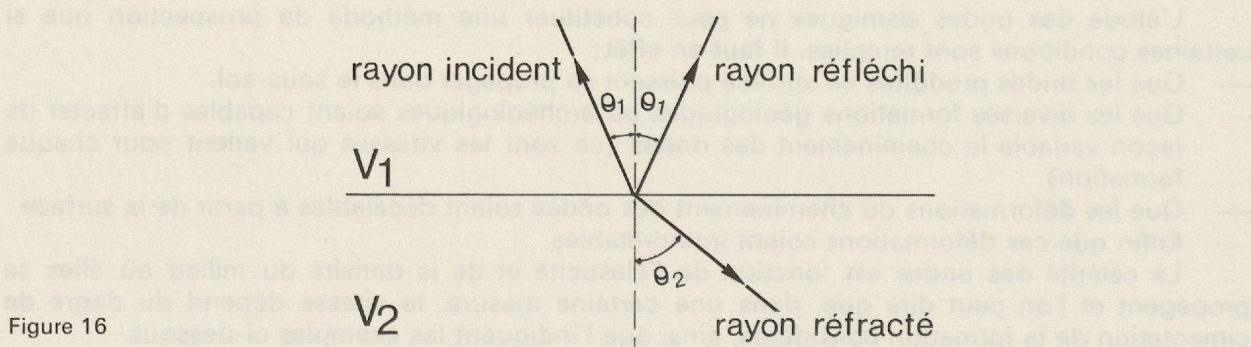


Figure 16

On montre que $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{V_1}{V_2}$

La sismique appliquée étudie d'une part les rayons réfractés et d'autre part les rayons réfléchis, ces études constituent respectivement: la sismique réfraction et la sismique réflexion.

Pour l'investigation des terrains de surface, la sismique réfraction est la méthode la plus appropriée, aussi nous nous en tiendrons à l'examen de cette méthode particulière.

La sismique réfraction

Certains rayons réfractés après un parcours dans le sous-sol réapparaissent à la surface. Etudions le trajet d'un de ces rayons.

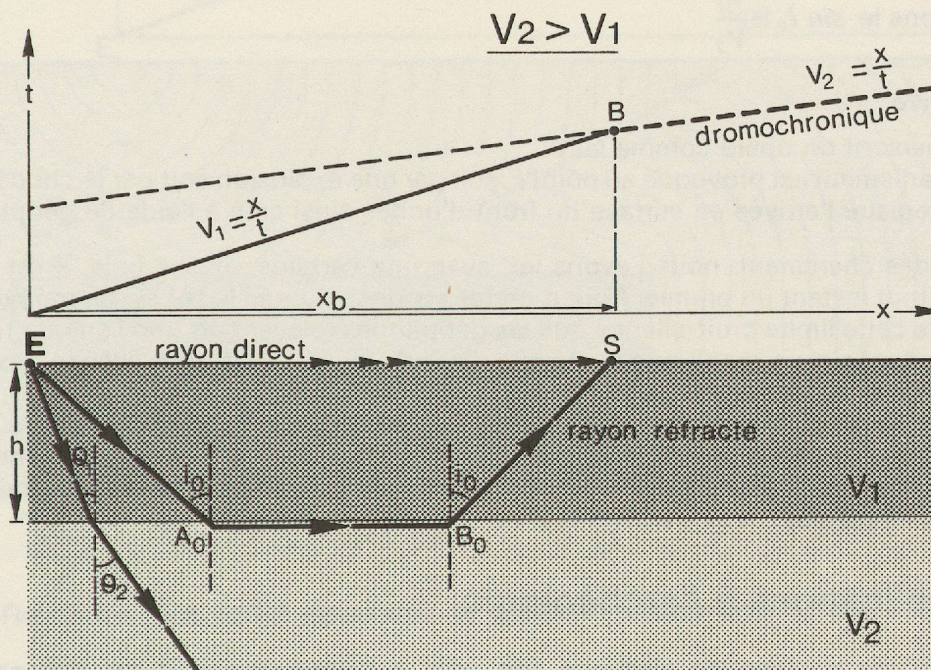


Figure 17

Nous avons vu que le cheminement du rayon réfracté est régi par la loi:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Si V_2 est plus grande que V_1 , à partir d'un certain angle critique I_0

$$\sin I_0 = \frac{V_1}{V_2}$$

le rayon réfracté se propage le long de l'interface avec la vitesse V_2 .

En tous points de la surface situés au-delà de S, les rayons réfractés arrivent avant le rayon direct issu de E, car dans la partie A_0B_0 de leur trajet ils se propagent à la vitesse $V_2 > V_1$.

En mesurant les temps d'arrivée en une succession de points sur la surface, on établit le graphique distance-temps, la dromochronique. Sur ce graphique les temps sont portés en ordonnée et les distances en abscisse.

La pente du premier bras de la dromochronique, image des temps d'arrivée de l'onde directe, fournit la vitesse V_1 , la pente du second bras, correspondant à l'arrivée des ondes réfractées, fournit, pour des couches horizontales, la vitesse V_2 .

On peut obtenir la profondeur de la discontinuité, h , en utilisant le point de brisure qui est un point particulier de la dromochronique. On montre que

$$h = \frac{X_b}{2} \cdot \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

X_b = abscisse du point de brisure.

Pour le calcul de h , on peut aussi faire intervenir l'intercept time, t_i , qui est le point où le deuxième bras de la dromochronique coupe l'axe des temps. On arrive à la relation suivante:

$$h = \frac{t_i}{2} \cdot \frac{V_1}{\cos I_0}$$

avec rappelons le $\sin I_0 = \frac{V_1}{V_2}$

Mise en œuvre

Pratiquement on opère comme suit:

- Un ébranlement est provoqué au point E , soit par une explosion soit par le choc d'une masse.
- On enregistre l'arrivée en surface du front d'ondes ainsi créé à l'aide de géophones.

Les ondes cheminant, nous l'avons vu, avec une certaine vitesse finie, il est possible de distinguer à tout instant un premier front d'ondes en deçà duquel le sol est en mouvement. C'est la position de cette limite bruit-silence que les géophones relèvent en une série de temps $t_1, t_2...$

En reportant sur un graphique les temps d'arrivée de la limite bruit-silence aux géophones successifs, placés sur le terrain, on obtient la dromochronique.

Presque toute l'interprétation se fait sur cette dromochronique, qu'on utilise pour établir soit la profondeur de la discontinuité h , soit des cartes de vitesses (vitesse pour une profondeur donnée, par exemple), ou encore des cartes des temps (temps d'arrivée à une distance x choisie...).

4.3 Applications à l'archéologie

Pour qu'une prospection sismique soit utile à l'archéologue, il est indispensable que certaines conditions soient remplies. Il faut d'une part que la vitesse de la structure archéologique V_2 soit bien différenciée de celle des terrains environnants V_1 , et, d'autre part, que la déformation des ondes soit mesurable en surface.

Examinons ces conditions:

La vitesse des terrains de couverture varie généralement de 400 à 800 m/s. Par contre, un mur ou un dallage ont des vitesses de l'ordre de 1000 à 2000 m/s, qui dépendent de leur état de conservation. Ces structures pourront donc être décelées par la méthode sismique.

Des amas assez compacts de débris divers, tuiles, pierres, etc. peuvent encore montrer des vitesses sensiblement différentes de celle du milieu, par contre la sismique sera inefficace pour le repérage de fossés, de levées de terre, de fonds de cabane, etc.

Pour que notre deuxième condition soit satisfaite, c'est-à-dire pour que la déformation des ondes soit décelable en surface, il faut que le rapport entre les dimensions de l'objet recherché et la profondeur où il se trouve reste supérieur à certaines limites.

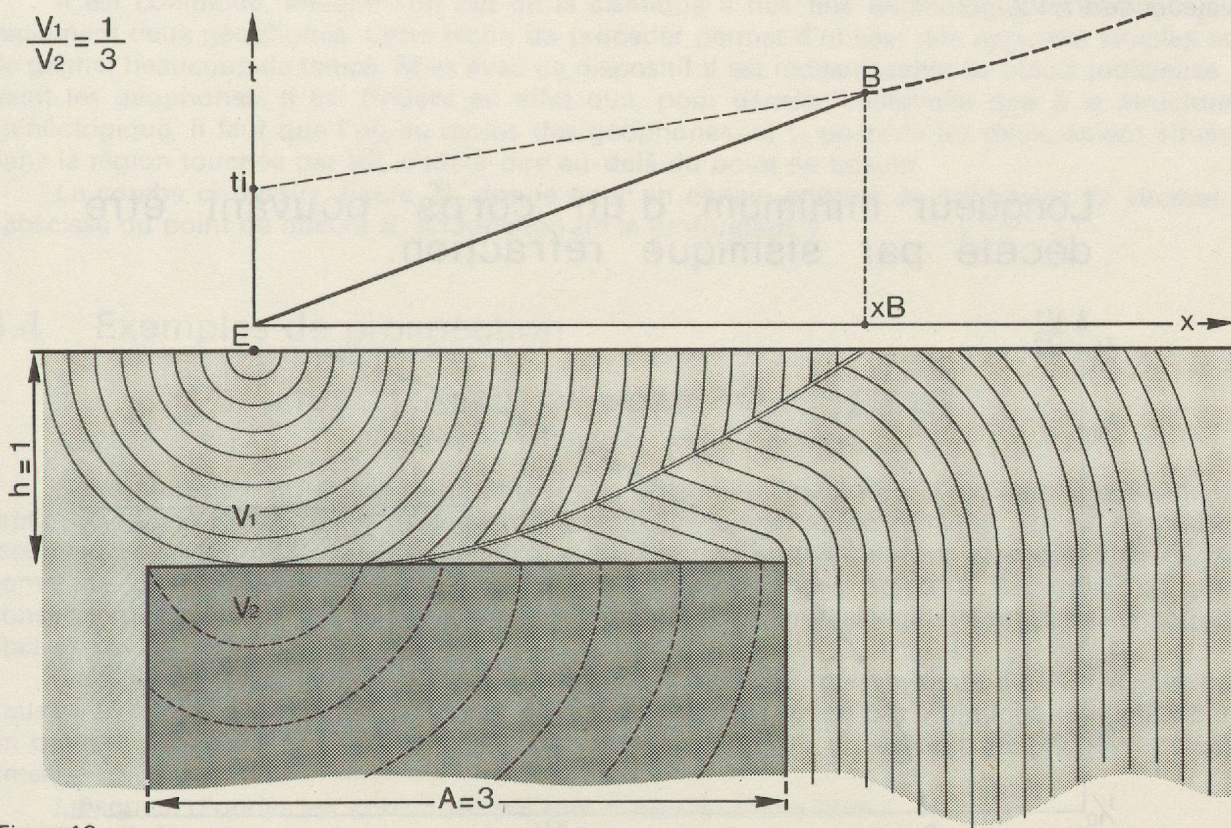
Les exemples qui suivent illustrent ce principe.

La figure 18 représente le cheminement des ondes affectées par la présence dans le sous-sol d'un corps long de 3 mètres, situé sous 1 mètre de couverture.

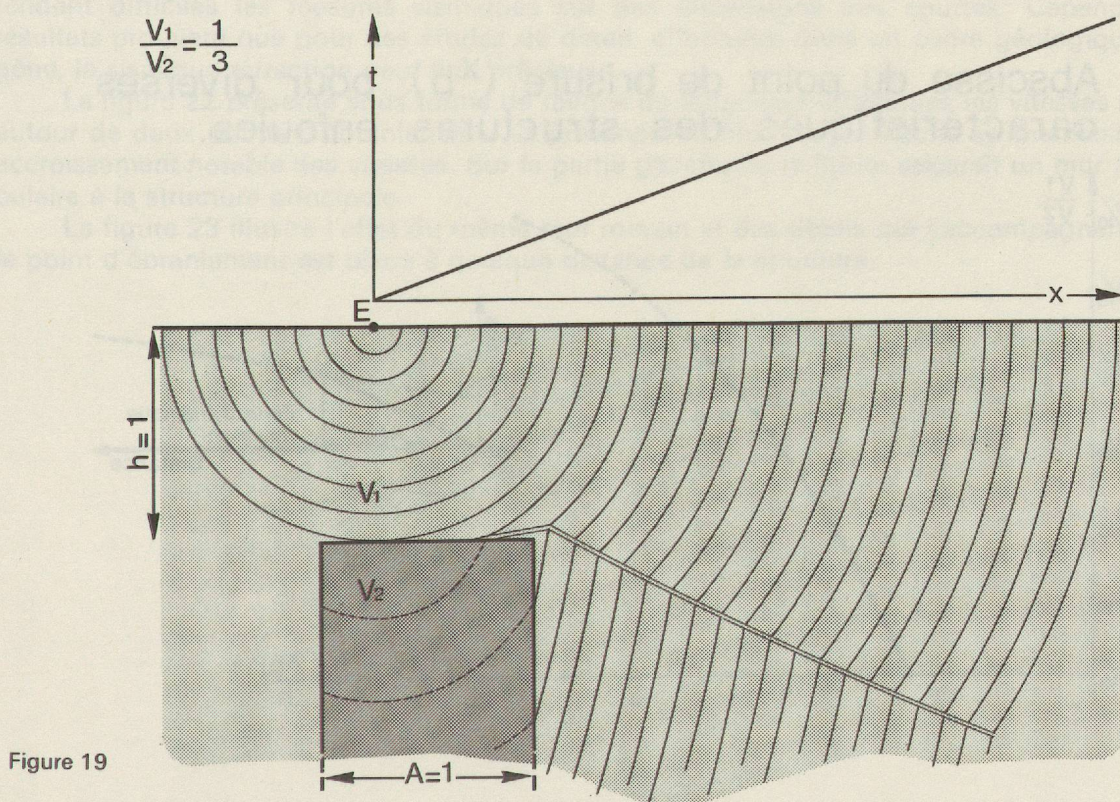
Nous voyons que dans ce cas, il est possible d'enregistrer en surface une altération du cheminement des ondes. La dromochronique montre au-delà du point de brisure B, une deuxième vitesse V_{2a} , due à la présence du corps.

Par contre, la figure 19, représentant un corps long de 1 mètre, situé sous 1 mètre de couverture, permet de se rendre compte que la déformation des ondes n'est pas décelable en surface. La dromochronique est ici une droite de vitesse V_1 .

Réfraction des ondes sismiques et dromochronique pour le cas $A = 3h$



Réfraction des ondes sismiques et dromochronique pour le cas $A = h$



Pour qu'il soit possible de détecter en surface l'effet de la structure enfouie, il faut que le rapport a/h soit compris, au minimum, entre 2 et 3. La figure 20 montre quels sont les rapports de a/h pour lesquels la déformation des ondes reste perceptible en surface et ceci pour diverses valeurs de $V1/V2$.

Longueur minimum d'un corps pouvant être décelé par sismique réfraction.

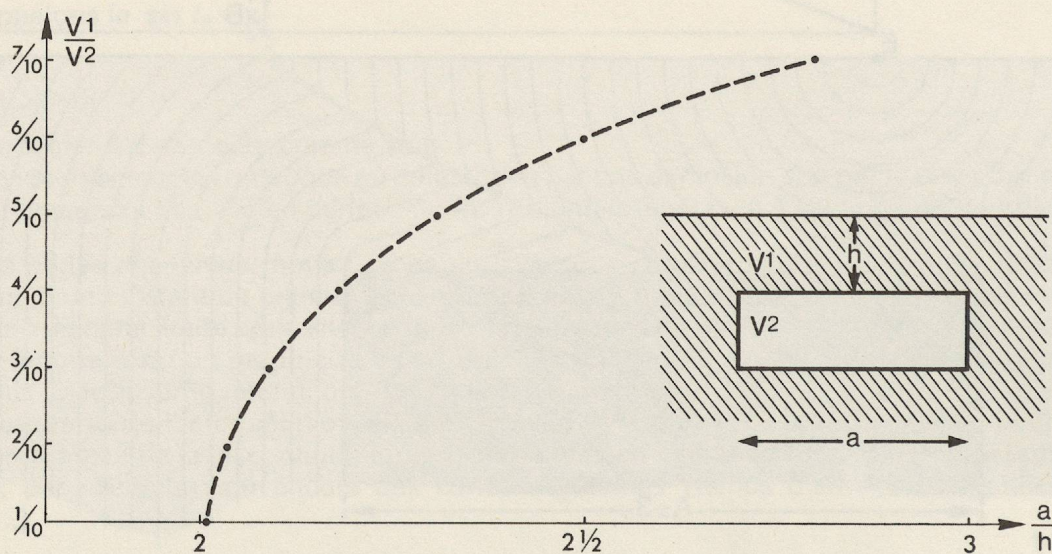


Figure 20

Abscisse du point de brisure (x_b) pour diverses caractéristiques des structures enfouies.

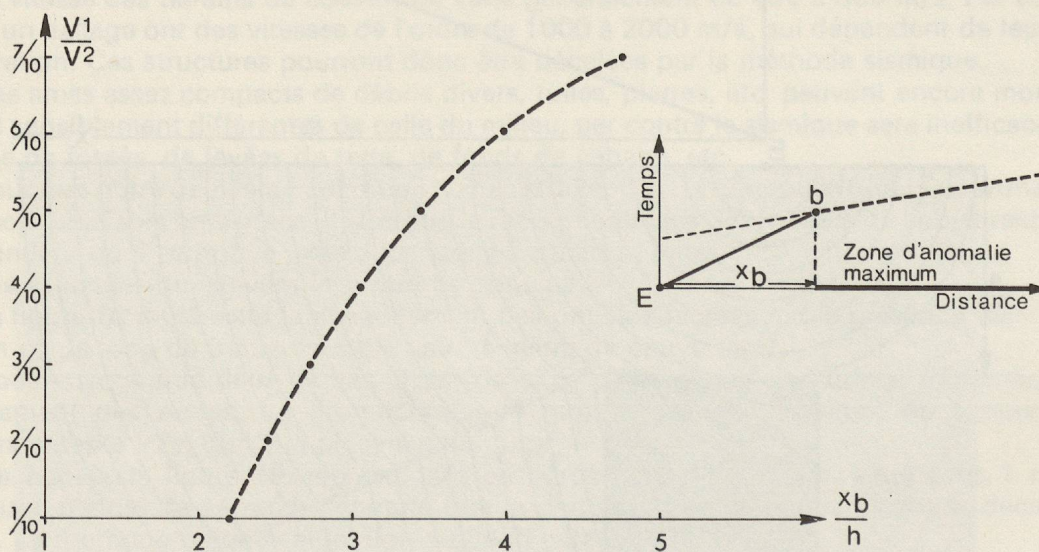


Figure 21

Avant d'envisager une prospection sismique à des fins archéologiques, il faut donc estimer le contraste des vitesses et les dimensions de la structure. Si cette dernière est susceptible d'être repérée par la sismique, divers problèmes de mise en œuvre se posent.

Il est commode, lorsque l'on fait de la sismique à des fins archéologiques, d'employer seulement deux géophones. Cette façon de procéder permet d'utiliser des appareils simples et de gagner beaucoup de temps. Mais avec ce dispositif il est indispensable de placer judicieusement les géophones. Il est évident en effet que, pour déceler l'anomalie due à la structure archéologique, il faut que l'un au moins des géophones, et si possible les deux, soient situés dans la région touchée par V_2 , c'est-à-dire au-delà du point de brisure.

La courbe ci-dessus, figure 21, donne pour un certain nombre de contrastes de vitesses, l'abscisse du point de brisure B , en fonction de la profondeur h .

4.4 Exemples de prospection

ÉTUDE SISMIQUE DE DÉTAIL (Figures 22 et 23).

Capitole d'Avenches - Vaud - Suisse.

Cette étude de fin détail avait pour objet d'estimer l'extension d'un mur partiellement repéré dans une fouille. Le mur recherché, une solide construction romaine, est en moyenne recouvert d'un mètre de terrains meubles. A priori, nous pouvions nous attendre à de bons contrastes de vitesses. Cependant, du fait de la petitesse des objets à rechercher et, par conséquent, des temps très courts à mesurer, l'emploi d'un appareillage classique de réfraction était exclu.

Nous avons utilisé un instrument construit à l'Institut de géophysique de l'Université de Lausanne. Il s'agit d'un chronomètre qui est enclenché par l'action des vibrations ressenties par un premier géophone et déclenché par cette même action sur un second géophone (interval timer).

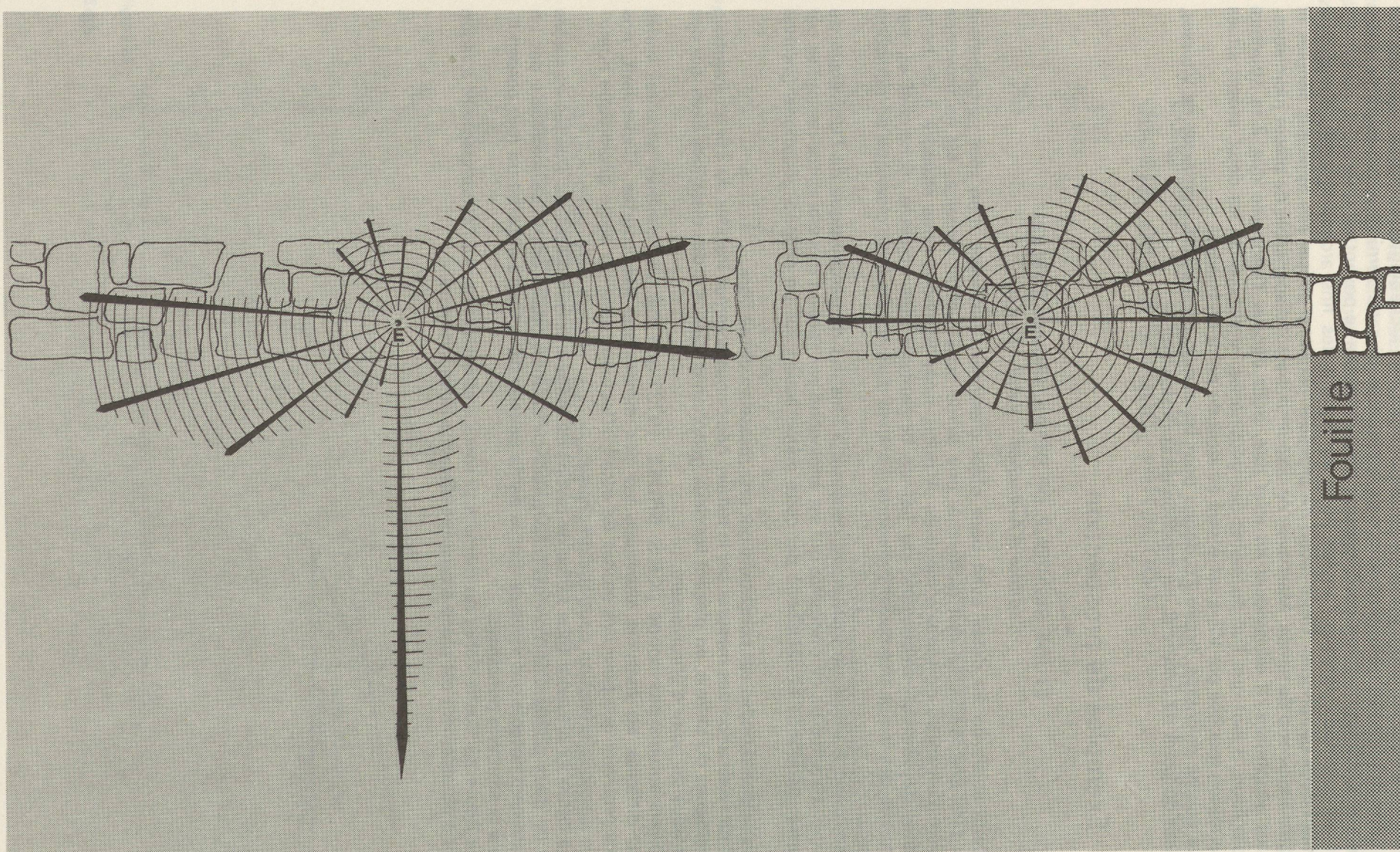
La source d'ondes est constituée par une masse en chute libre.

Pour l'exécution des mesures sur le terrain, nous nous sommes inspirés du «tir en éventail» des géologues du pétrole, en plaçant les deux géophones alignés à des distances fixes, sur des rayons issus du point d'ébranlement.

Divers auteurs ont montré (K.B.S. BRUKE, 1973) que des phénomènes parasites variés rendent difficiles les mesures sismiques sur des dimensions très courtes. Cependant, nos résultats prouvent que pour des études de détail, effectuées dans un cadre géologique homogène, la sismique réfraction peut être précieuse.

La figure 22 présente sous forme de rayons de longueurs différentes les vitesses mesurées autour de deux points d'ébranlement. La présence du mur romain caché se manifeste par un accroissement notable des vitesses. Sur la partie gauche de la figure apparaît un mur perpendiculaire à la structure principale.

La figure 23 illustre l'effet du même mur romain et des débris qui l'accompagnent lorsque le point d'ébranlement est placé à quelque distance de la structure.



AVENCHES (Capitole)

Sismique réfraction représentation des vitesses relatives

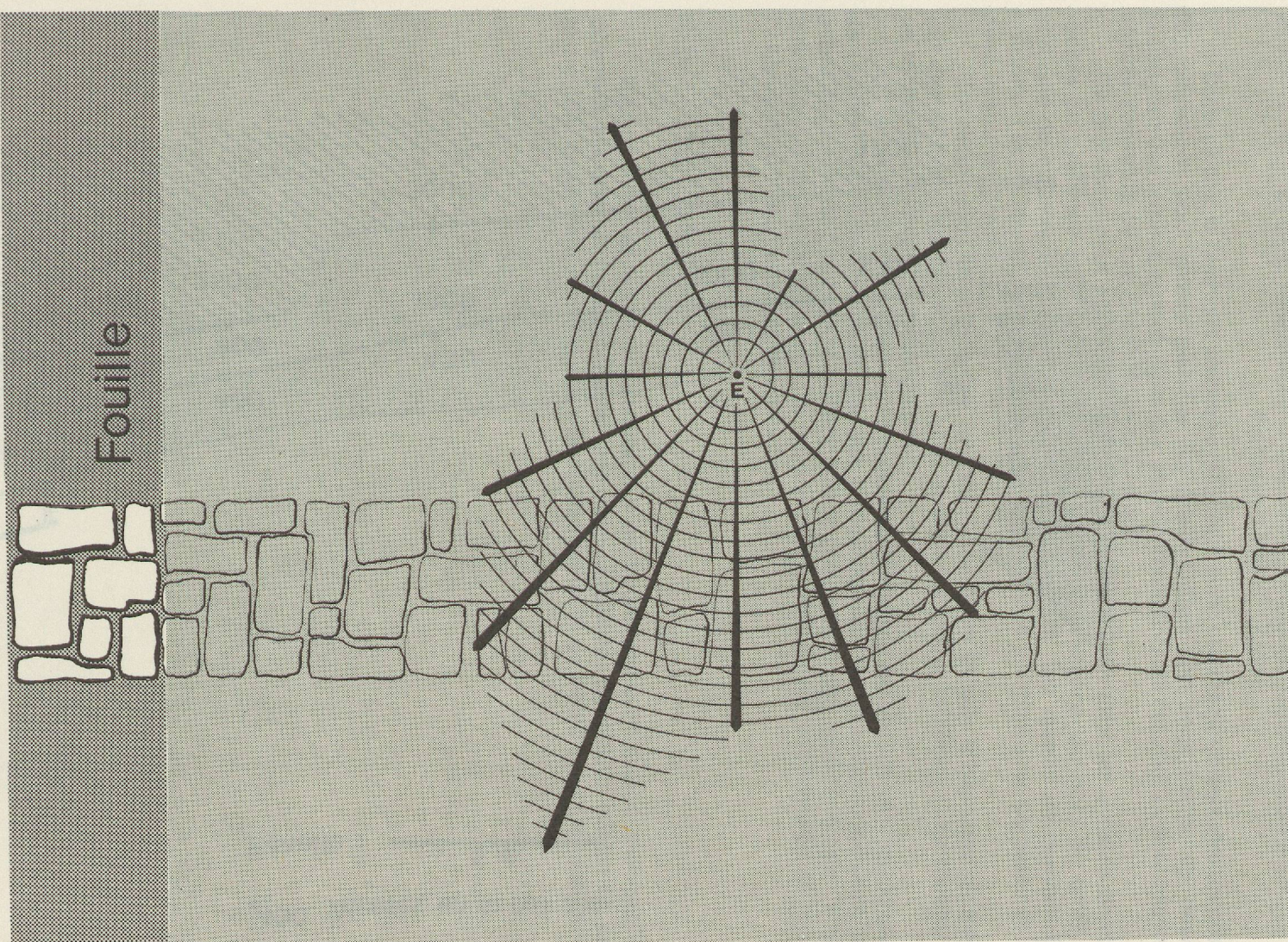


Figure 23

Etude de détail

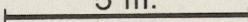
AVENCHES Capitole

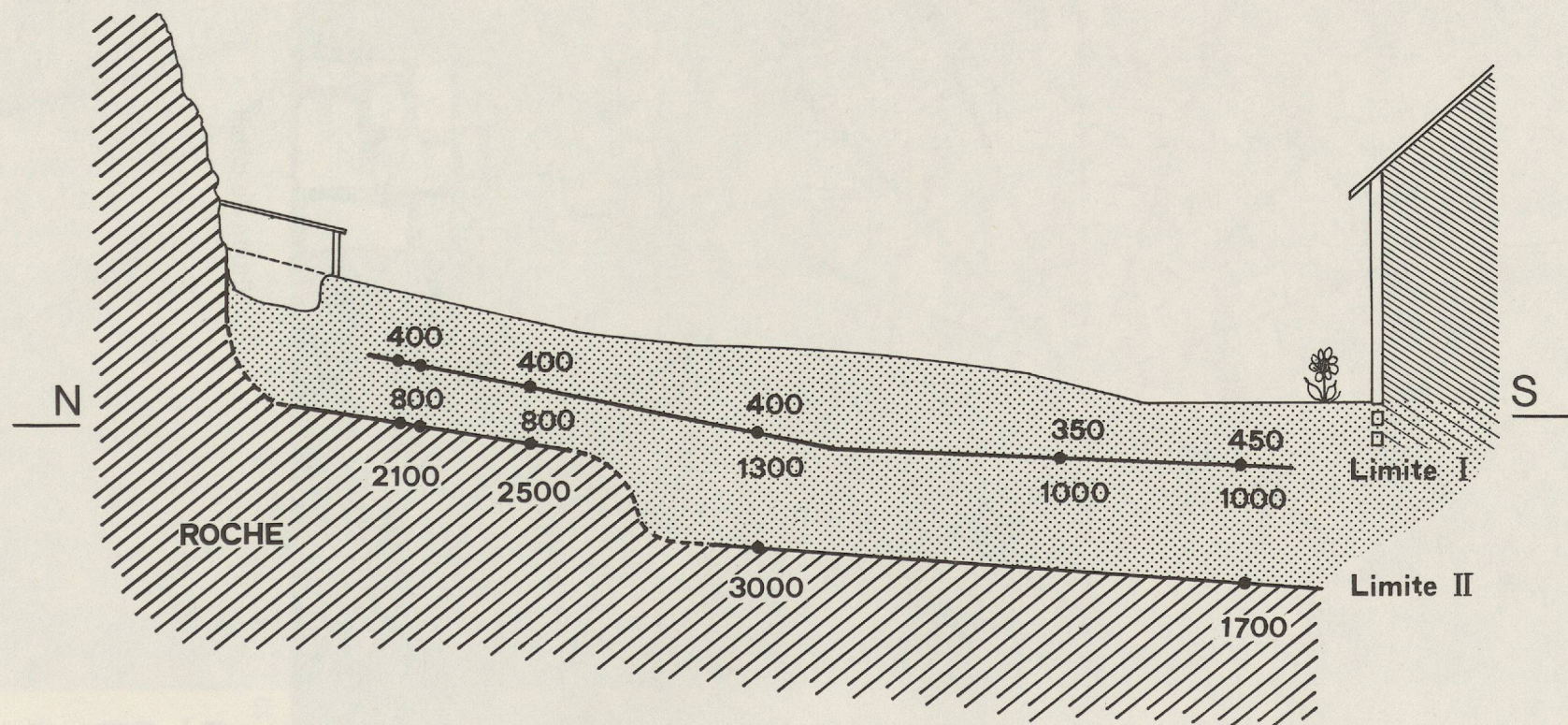
Sismique réfraction
Représentation des vitesses
relatives.

BAULMES

Etude sismique

● 400 Vitesses en m. par sec.

Echelle :  5 m.



ÉTUDE SISMIQUE D'UN SITE PRÉHISTORIQUE (Figure 24).

Baulmes - Vaud - Suisse.

Dans ce cas, la méthode sismique réfraction a été utilisée pour résoudre un problème tout à fait classique: pour mieux planifier les fouilles d'un abri sous roche, on désire connaître l'épaisseur des terrains quaternaires aux abords immédiats de cet abri. Le soubassement rocheux semble constitué de calcaire massif du Crétacé.

Ce problème peut être résolu grâce à la sismique; en effet les vitesses dans les diverses roches en présence sont nettement différenciées. L'existence, au nord du profil, d'une paroi verticale de calcaire introduit cependant une difficulté. Les rayons ne pouvant être dirigés à volonté, il est évident que cette paroi peut agir comme un marqueur sismique et se confondre avec le soubassement.

Ces restrictions étant admises, on voit sur la figure 24 que la sismique permet de situer le toit des roches crétacées et permet ainsi de fixer les limites inférieures des terrains susceptibles de receler des vestiges archéologiques.

Dans un cas comme celui-ci, le problème théorique est simple: il s'agit d'une application de la sismique réfraction classique; les difficultés proviennent des conditions locales. Nous avons déjà signalé l'ambiguïté qu'introduit la présence d'une paroi verticale; il faut remarquer aussi que l'exiguïté du terrain et l'existence d'une fouille déjà commencée ne facilitent en rien l'exécution et l'interprétation des mesures.

4.5 Conclusions

Nos premiers essais et des recherches en cours prouvent que la sismique réfraction est propre à apporter aux archéologues une aide précieuse. La nature même de cette méthode restreindra cependant son usage à des études précises de détail et fort localisées.

Chapitre 5 — La méthode gravimétrique

5.1 Introduction

Comme toutes les méthodes géophysiques, la gravimétrie permet, à partir de mesures effectuées en surface, de tirer des conclusions sur la constitution du sous-sol.

Pour le gravimétricien, le sous-sol se subdivise en éléments de volume égaux et juxtaposés, caractérisés par leur densité et par conséquent leur masse. Si l'un de ces volumes diffère nettement de ses voisins par sa densité, il provoque une anomalie gravimétrique.

5.2 Principe de la méthode

La gravimétrie repose entièrement sur la loi de l'attraction universelle formulée par Newton :

$$F = G \cdot \frac{m \cdot m'}{d^2}$$

Deux corps s'attirent en raison directe de leur masse et en raison inverse du carré de leur distance.

Les deux corps qu'envisage la loi de Newton peuvent être : l'un une structure enfouie dans le sous-sol, l'autre la masselotte suspendue à un ressort qui constitue l'essentiel du gravimètre. La figure ci-dessous illustre cette situation.

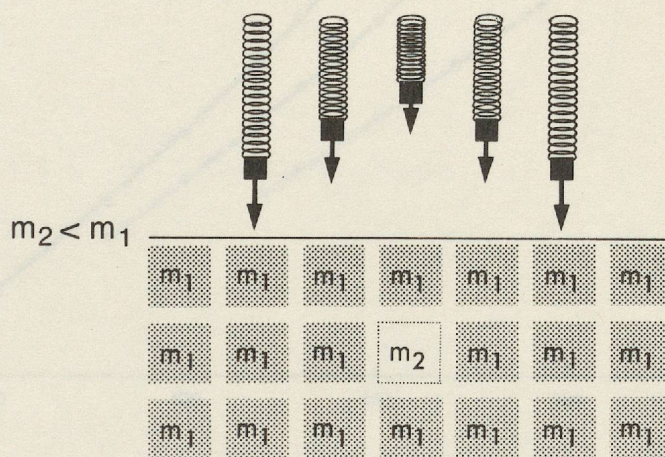


Figure 25

On peut considérer que l'attraction « normale » du globe terrestre, qui vaut environ 980 gals, est due à l'ensemble des masses m_1 . La présence en divers points d'éléments m_2 provoque des anomalies qui intéressent le géophysicien. Si la structure perturbatrice m_2 est plus dense que les terrains environnants, l'attraction gravifique est plus forte que la normale, l'anomalie est dite positive. Pour une structure moins dense (figure 25) que le milieu environnant, l'anomalie devient négative.

5.3 Applications archéologiques

Dans le cas de l'archéologie, quelles peuvent être les causes d'anomalies? Ce sont évidemment ici encore les différences de densités qui jouent un rôle primordial.

La densité des terrains superficiels varie généralement de 1,8 à 2.

Une cavité telle qu'une tombe ou au contraire un dallage construit en gros blocs de calcaire peuvent montrer des densités respectivement plus basses ou plus élevées que celle du milieu environnant. Ces structures seront donc susceptibles de provoquer des anomalies gravimétriques. Par contre, un fossé comblé, un fond de cabane, etc. ne pourront être décelés par la méthode gravimétrique.

Amplitude de l'anomalie

Avant d'envisager une prospection archéologique par la méthode gravimétrique, il importe de considérer l'ordre de grandeur des perturbations auxquelles on peut s'attendre.

On sait que les valeurs « normales » de l'attraction du globe sont proches de 980 gals.

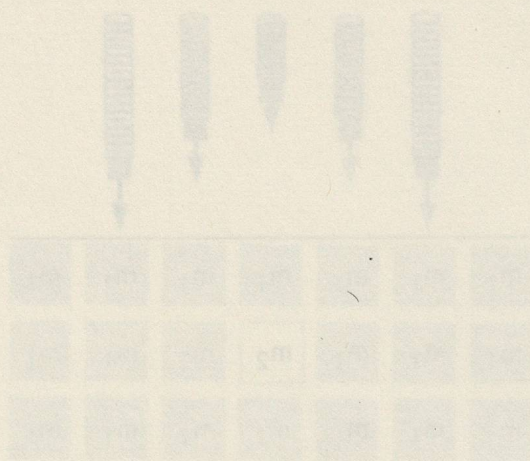
Les variations provoquées par les hétérogénéités géologiques sont infimes par rapport à cette attraction, elles dépassent rarement quelques dizaines de milligals.

Les anomalies dues à des corps archéologiques seront encore plus faibles, de l'ordre de quelques centièmes de milligals.

On admet généralement que l'anomalie mesurable grâce aux appareils couramment utilisés est de 0,03 milligal, ce qui limite singulièrement les cas où la méthode gravimétrique peut s'appliquer.

Nous avons représenté sur la figure 26, les dimensions requises pour qu'une sphère de rayon R placée à la profondeur h provoque en surface une anomalie de 0,03 milligal.

Il faut noter que dans cet exemple la valeur limite de 0,03 milligal est celle de l'anomalie maximum provoquée par la sphère et mesurée à l'aplomb de la structure. De part et d'autre de ce maximum, la valeur de l'anomalie décroît très rapidement.



Rayons des sphères situées à diverses profondeurs et produisant en surface une anomalie de 0,03 milligals.

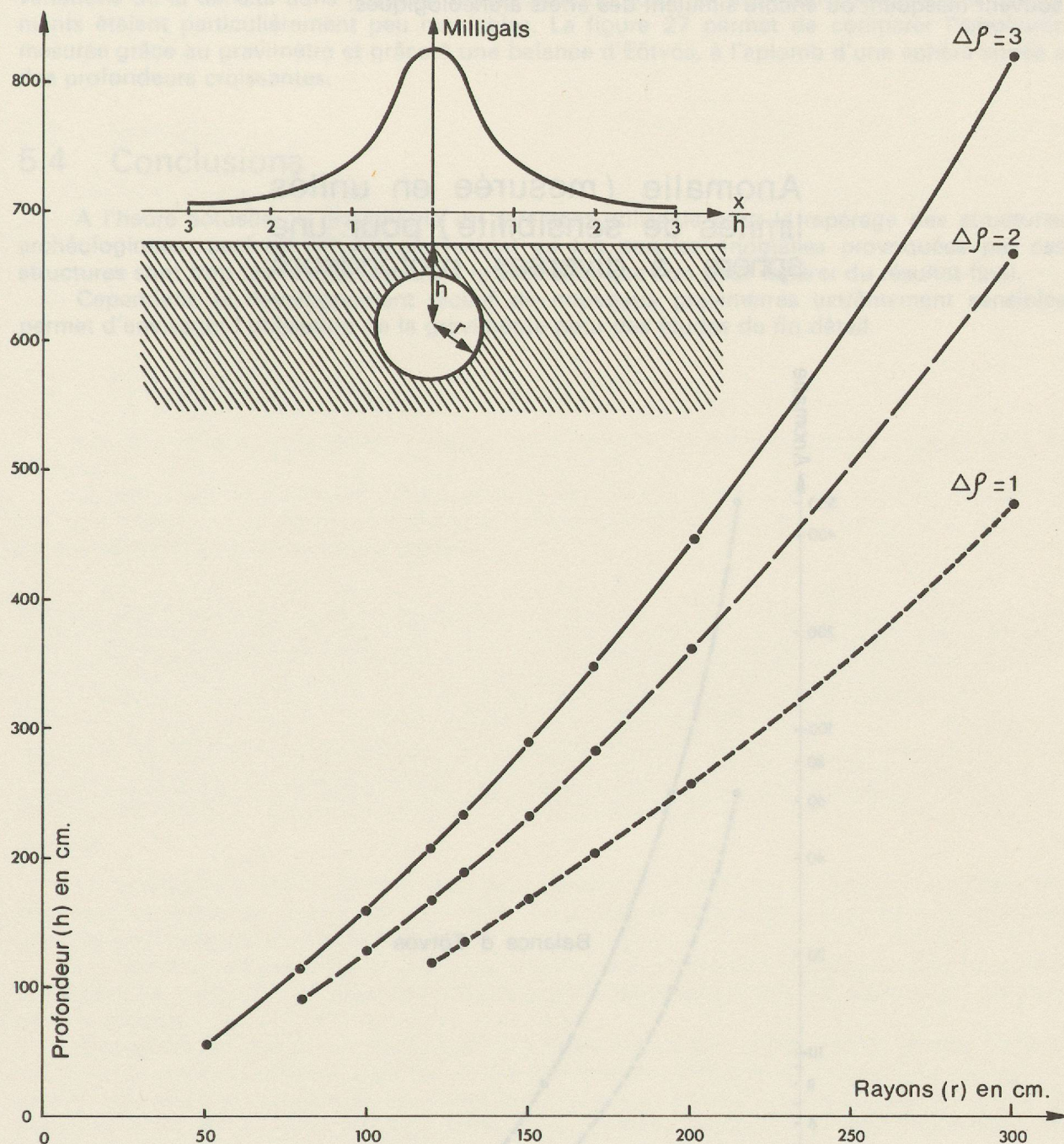


Figure 26

A ces limitations liées à la précision des gravimètres s'ajoutent les difficultés de la mise en œuvre de la méthode sur le terrain.

En effet, la réalisation des mesures n'est pas simple. Un certain nombre de facteurs, tels que l'imprécision de l'altitude attribuée à la station, les irrégularités de la topographie, la dérive de l'appareil, etc., peuvent être des causes d'erreur et introduire des anomalies parasites qui bien souvent masquent ou encore simulent des effets archéologiques.

Anomalie (mesurée en unités limites de sensibilité) pour une sphère à diverses profondeurs.

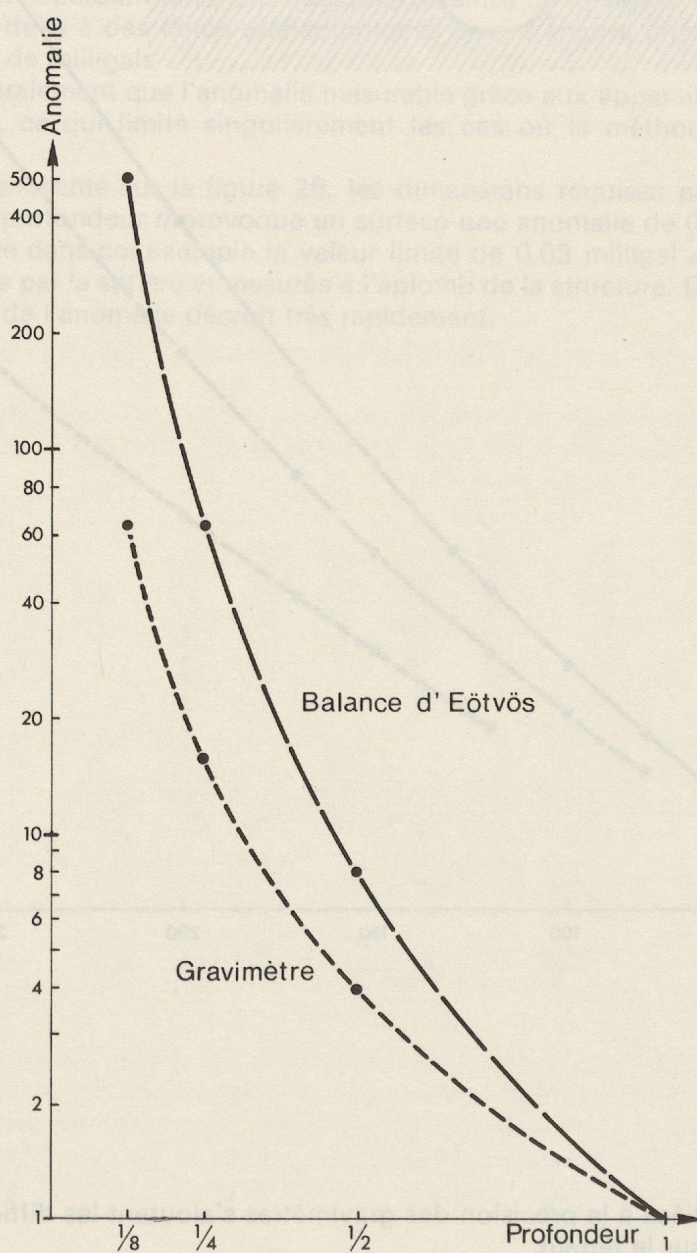


Figure 27

Il faut mentionner pour mémoire des instruments, actuellement tombés en désuétude, qui conviendraient fort bien, par leur précision, aux recherches archéologiques. Ces appareils, les balances de torsion, la balance d'Eötvös par exemple, étaient extrêmement sensibles aux variations de la densité dans la partie superficielle du sous-sol. Malheureusement, ces instruments étaient particulièrement peu maniables. La figure 27 permet de comparer l'amplitude mesurée grâce au gravimètre et grâce à une balance d'Eötvös, à l'aplomb d'une sphère située à des profondeurs croissantes.

5.4 Conclusions

A l'heure actuelle, la gravimétrie est rarement utilisable pour le repérage des structures archéologiques; ceci est dû essentiellement au fait que les anomalies provoquées par ces structures sont trop faibles par rapport à la précision que l'on peut espérer du résultat final.

Cependant, le développement récent de nouveaux gravimètres extrêmement sensibles permet d'envisager l'utilisation de la gravimétrie pour des études de fin détail.

6.2 Principe général

Les méthodes classiques de prospection reposent sur l'étude de la propagation du courant dans le sous-sol.

La possibilité de détecter les structures du sous-sol repose sur le fait que celles-ci possèdent des résistivités différentes, c'est-à-dire une amplitude différente à l'endroit de l'émission du courant.

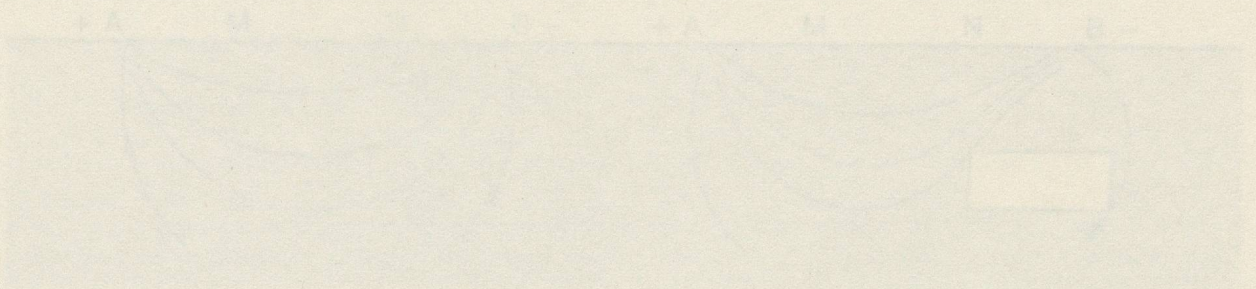


Figure 28

Les méthodes classiques de prospection reposent sur l'étude de la propagation du courant dans le sous-sol. Les structures qui dévient le courant sont détectées et ainsi localisées, par exemple, les anomalies de résistivité.

Les techniques classiques de prospection reposent sur l'étude de la propagation du courant dans le sous-sol. Les structures qui dévient le courant sont détectées et ainsi localisées, par exemple, les anomalies de résistivité.

Supposons que l'on dispose d'un courant qui passe à l'aplomb d'une sphère située à une certaine profondeur dans le sous-sol. La figure 27 permet de comparer l'amplitude mesurée grâce au gravimètre et grâce à une balance d'Eötvös, à l'aplomb d'une sphère située à des profondeurs croissantes.

Par définition, la gravimétrie est l'étude de la variation de la pesanteur. L'information de cette nature est la plus précieuse des données géophysiques.

La figure 28 illustre le principe général de la prospection géophysique. Le diagramme est divisé en deux parties, A et B. La partie A montre une section transversale du sol avec une surface de terrain en relief et une ligne de courant (courbe) qui s'écarte vers la droite en passant sous une zone hachurée (structure). La partie B montre une section transversale du sol avec une surface de terrain en relief et une ligne de courant (courbe) qui s'écarte vers la gauche en passant sous une zone hachurée (structure).

Si l'on considère une section transversale du sol, la figure 28 illustre le principe général de la prospection géophysique. Le diagramme est divisé en deux parties, A et B. La partie A montre une section transversale du sol avec une surface de terrain en relief et une ligne de courant (courbe) qui s'écarte vers la droite en passant sous une zone hachurée (structure). La partie B montre une section transversale du sol avec une surface de terrain en relief et une ligne de courant (courbe) qui s'écarte vers la gauche en passant sous une zone hachurée (structure).

La figure 28 illustre le principe général de la prospection géophysique. Le diagramme est divisé en deux parties, A et B. La partie A montre une section transversale du sol avec une surface de terrain en relief et une ligne de courant (courbe) qui s'écarte vers la droite en passant sous une zone hachurée (structure). La partie B montre une section transversale du sol avec une surface de terrain en relief et une ligne de courant (courbe) qui s'écarte vers la gauche en passant sous une zone hachurée (structure).

Chapitre 6 — Les méthodes électriques

6.1 Introduction

Les méthodes électriques ont été parmi les premières méthodes géophysiques utilisées en prospection archéologique.

Il semble qu'actuellement elles soient quelque peu reléguées au profit des méthodes magnétiques; ceci provient sans doute du fait que l'interprétation des mesures géoélectriques n'est pas toujours aussi simple qu'elle pourrait le paraître à première vue.

6.2 Principe général

Les méthodes électriques sont basées sur l'étude de la propagation du courant dans le sous-sol.

La possibilité de distinguer électriquement les diverses formations du sous-sol résulte du fait que celles-ci possèdent souvent des résistivités différentes, c'est-à-dire une aptitude différente à conduire le courant électrique.

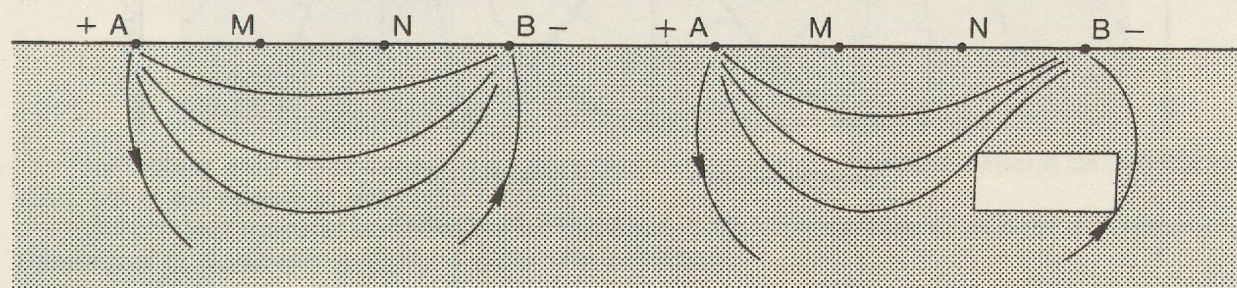


Figure 28

Les méthodes électriques de prospection permettent d'identifier à partir de la surface les structures qui diffèrent de la norme par leurs résistivités et ainsi de localiser, par exemple, des vestiges archéologiques enfouis.

Les techniques employées en prospection électrique sont nombreuses. Elles étudient, pour la plupart, les variations de potentiel produites par effet ohmique lors du passage du courant dans le sous-sol.

Supposons qu'une source de courant soit reliée à deux électrodes *A* et *B*, fichées dans le sol. Celui-ci étant conducteur, il s'y forme des lignes de courant fermant le circuit et allant de *A* vers *B*. Une chute de tension se manifeste le long du conducteur à large section formé par le sous-sol. Il en résulte une certaine distribution du potentiel que l'on peut représenter en dessinant les surfaces équipotentiellles.

Par définition en tous points d'une telle surface, le potentiel conserve une valeur constante. L'intersection de cette surface avec le sol constitue une courbe équipotentielle.

La figure 29 montre, pour un milieu homogène et isotrope, le tracé des lignes de courant et des courbes équipotentiellles.

Si l'on considère l'évolution du potentiel et de son gradient (le champ), le long de la ligne *AB*, on voit que la chute de tension est très rapide au voisinage des électrodes *A* et *B* et qu'elle devient très faible dans la partie centrale de la courbe.

Lorsque le sous-sol n'est pas électriquement homogène, la forme des courbes équipotentiellles est altérée.

EQUIPOTENTIELLES ET LIGNES DE COURANT DANS UN SOL HOMOGENE

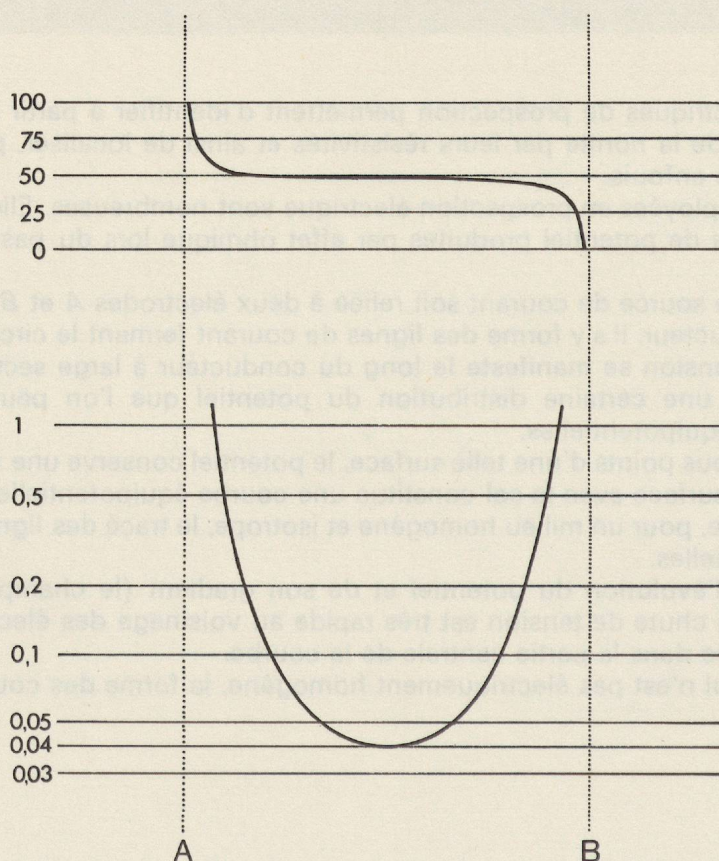
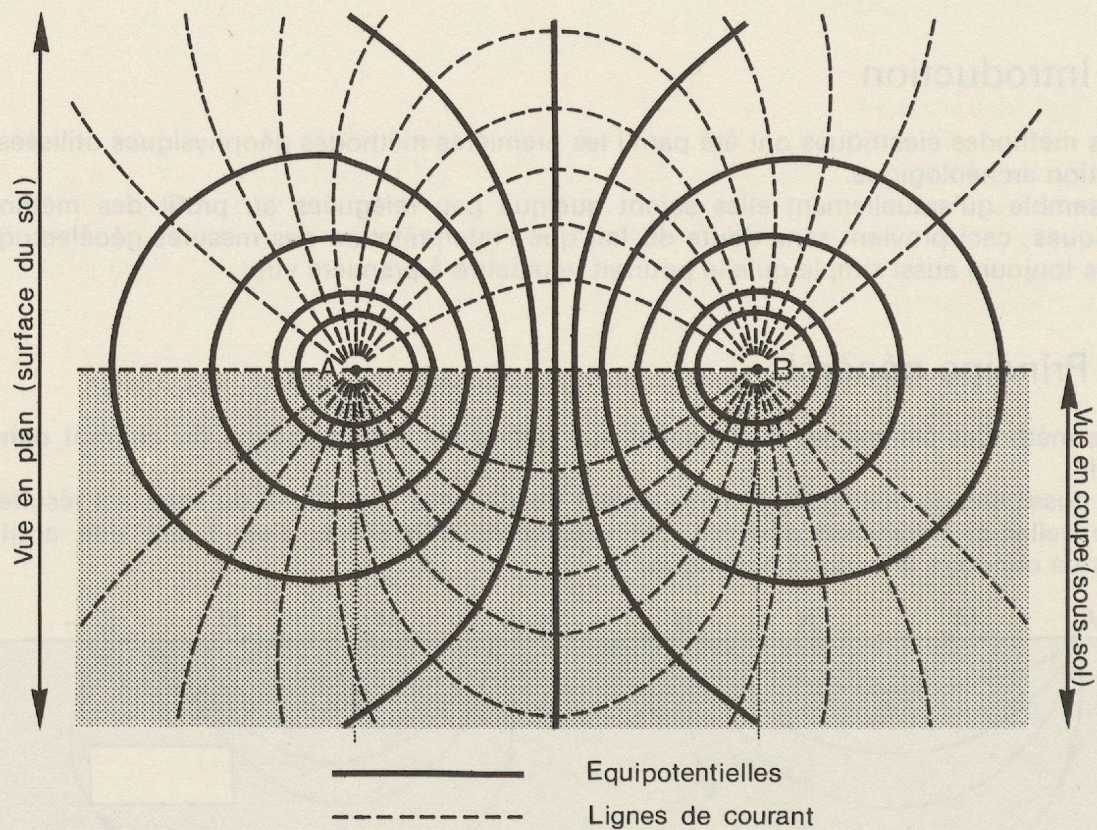


Figure 29

Une première méthode de prospection consiste à repérer en surface l'allure des courbes équipotentiellles et, par comparaison avec ce qu'elles devraient être en milieu homogène, à essayer d'en tirer des conclusions sur la structure du sous-sol.

La mise en œuvre de cette méthode est longue et l'interprétation des résultats parfois délicate; on lui préfère souvent la mesure de résistivités apparentes.

Pour comprendre ce que sont ces dernières, il faut étudier tout d'abord, dans le cas simple d'un terrain homogène, la distribution du potentiel autour d'une électrode A d'où s'écoule un courant I .

Le courant forme des filets rectilignes rayonnant autour de A. Il se produit une chute de tension dans le sol du fait de la résistance de celui-ci. Au voisinage de l'électrode les surfaces équipotentiellles sont des sphères concentriques.

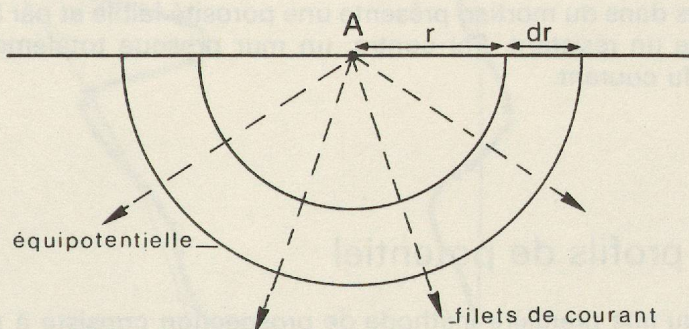


Figure 30

Entre deux sphères équipotentiellles de rayon r et $r+dr$ nous aurons :

$$-dV = \rho \frac{dr}{2 \pi r^2} \cdot I$$

Le facteur ρ qui lie la variation du potentiel au courant qui s'écoule, dépend de la nature du sous-sol et est appelé la résistivité électrique.

Si l'on peut mesurer la différence de potentiel $-dV$, et le courant I , on peut du même coup déterminer la résistivité spécifique du terrain envisagé.

$$\rho = \frac{-dV}{I} \cdot 2 \pi r^2 \cdot \frac{1}{dr}$$

Dans la pratique archéologique, on travaille le plus souvent en milieu hétérogène, il est rarement possible d'obtenir des résistivités spécifiques; on note alors des résistivités apparentes.

$$\rho \cdot app = \frac{\Delta V}{I} \cdot K$$

ρ_{app} est une moyenne complexe de toutes les résistivités spécifiques présentes.

K est une constante en relation avec r .

Les résistivités électriques permettent de distinguer les unes des autres les formations du sous-sol. Elles sont en effet à peu près constantes pour une formation donnée, mais varient parfois considérablement d'une formation à l'autre.

La résistivité dans le sous-sol.

Un sol, une roche ou des vestiges archéologiques conduisent l'électricité le plus souvent grâce à l'eau qu'ils contiennent. La conductibilité du sous-sol et son inverse, la résistivité, dépendent de sa teneur en eau et de la qualité, la salinité, de cette eau. Les facteurs déterminants sont donc la porosité, la saturation des pores et l'ionisation de l'eau d'imbibition.

Toute mesure de résistivité d'une formation est donc en réalité une mesure de sa teneur en eau et de la minéralisation de cette eau. La résistivité s'exprime en ohms.m.

Voici quelques exemples de résistivités observées :

Eau de pluie	30 à 100 ohms.m
Eau chargée en sels	0,03 à 10 ohms.m
Argiles et marnes	1 à 50 ohms.m
Sables et grès marneux	30 à 200 ohms.m
Calcaires et roches éruptives	300 à plusieurs milliers d'ohms.m.

On conçoit donc qu'un mur en maçonnerie encore bien conservé, constitué par exemple de blocs de calcaire noyés dans du mortier, présente une porosité faible et par là même se comporte électriquement comme un résistant. Par contre, un mur presque totalement détruit est moins résistant au passage du courant.

6.3 Cartes et profils de potentiel

Nous avons vu qu'une première méthode de prospection consiste à comparer la distribution du potentiel, créé dans le sous-sol par l'envoi d'un certain courant, à ce que serait cette distribution pour un terrain homogène. C'est la méthode des cartes de potentiel.

Une source envoie du courant continu dans le sol au moyen de deux électrodes *A* et *B* assez éloignées, à l'aide de deux autres électrodes impolarisables *M* et *N* reliées à un voltmètre sensible, on cherche par tâtonnement les points équipotentiels (dans ce cas $\Delta V_{MN}=0$).

Cette méthode se prête mal à une interprétation claire des résultats, de plus l'allure des courbes équipotentiellles dépend de la position des électrodes *A* et *B*. Pour étudier complètement une zone, il faut pouvoir établir plusieurs cartes pour diverses positions des électrodes *A* et *B*, ce qui rend la méthode longue et peu souple.

Un autre procédé consiste à tracer l'évolution du potentiel le long d'un profil. Les électrodes *A* et *B* sont fixes, on déplace suivant la ligne *AB* les deux électrodes *M* et *N* entre lesquelles on mesure la différence de potentiel. Cette façon de faire a l'avantage de n'exiger que le déplacement de deux électrodes, mais la tranche de terrain prospectée est variable, ce qui présente des inconvénients sur lesquels nous reviendrons.

Si le sous-sol possède des hétérogénéités, celles-ci vont se marquer par des anomalies du profil de potentiel.

Dans l'exemple qui suit nous avons reporté les mesures faites le long d'une ligne *AB* recoupant deux murs enfouis. On voit très nettement les anomalies provoquées par ces structures.

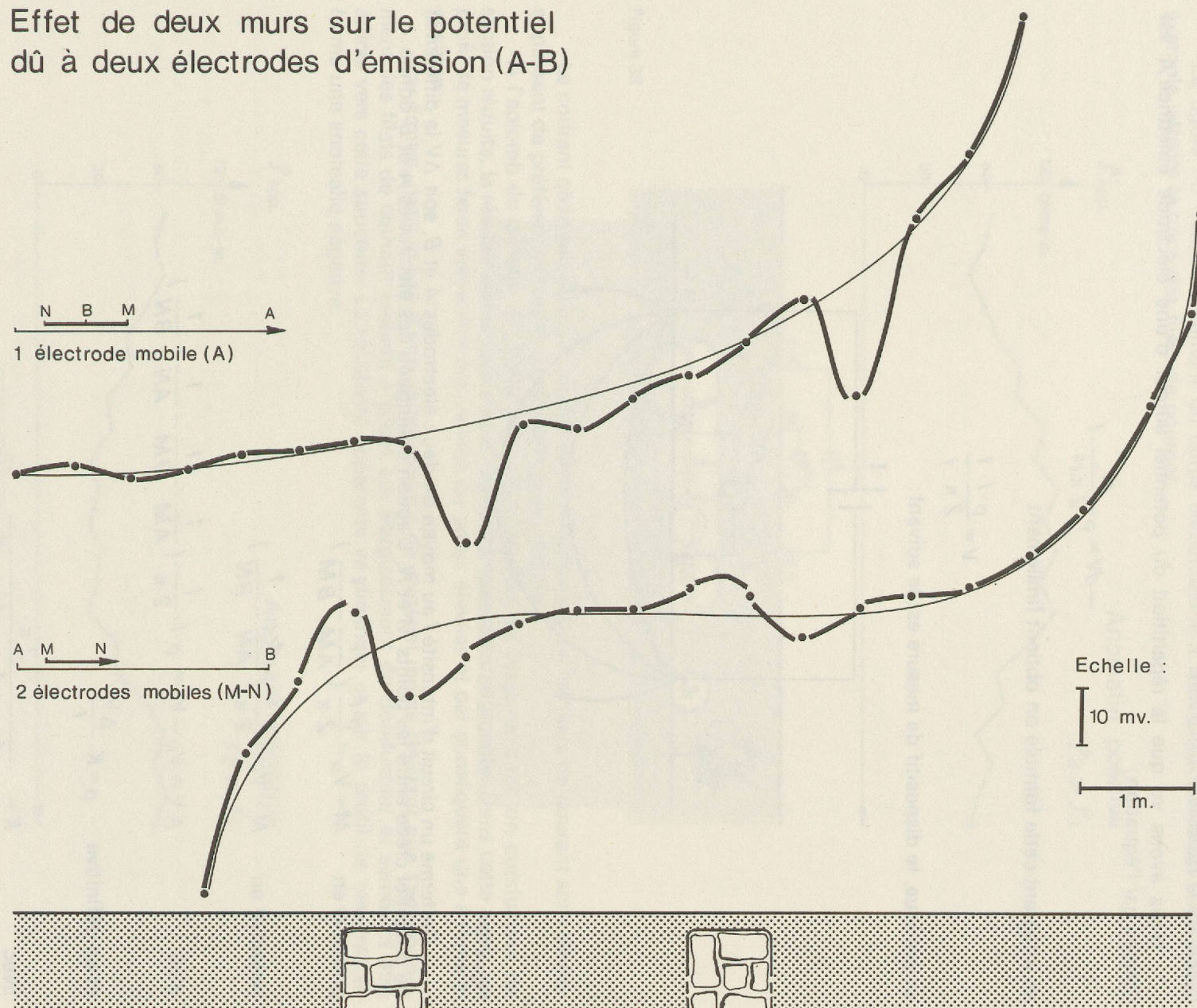
Ce procédé, jusqu'ici peu utilisé en prospection, permet de préciser certains points de détail.

6.4 Profils et cartes de résistivités

Les profils et les cartes de résistivités apparentes sont très largement utilisés en prospection archéologique. Ils expriment les valeurs de la résistivité apparente mesurées pour une tranche constante du sous-sol. La mesure se fait généralement en déplaçant un dispositif de dimensions fixes de proche en proche. Les résultats ainsi obtenus fournissent une image des variations latérales dans la composition du sous-sol, image qui ne saurait être bien interprétée sans une bonne compréhension de ce qu'est la résistivité apparente et de ce que sont les facteurs qui peuvent la faire varier.

Figure 31

Effet de deux murs sur le potentiel dû à deux électrodes d'émission (A-B)



Calcul de la résistivité apparente

Nous avons vu que la répartition du potentiel autour d'une électrode émettrice A est donnée par l'équation :

$$-dV = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \cdot I$$

en intégrant cette formule on obtient finalement

$$V = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r}$$

en pratique, le dispositif de mesure est le suivant :

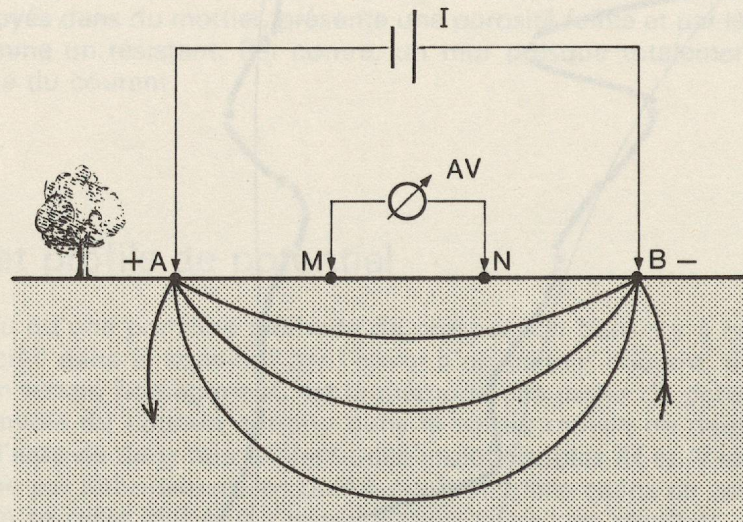


Figure 32

On ferme un circuit d'intensité I au moyen de deux électrodes A et B , soit ΔV la différence de potentiel créée entre les points M et N . L'action conjuguée des électrodes A et B donne :

potentiel en $M = V_M = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right)$

potentiel en $N = V_N = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)$

d'où $\Delta V = V_M - V_N = \rho \cdot I \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$

et en définitive $\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$

avec $K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)}$

En mesurant I en milliampères, V en millivolts et BM , AM , AN , etc., en mètres, on obtient les résistivités ρ en ohms.m.

Ce calcul se rapporte à un terrain homogène et isotrope; dans le cas d'un sous-sol hétérogène, un calcul identique fournit la résistivité apparente, fonction des dimensions du dispositif et de la répartition des résistivités dans le sous-sol.

La figure 33 montre comment un corps électriquement résistant, un dallage enfoui par exemple, affecte le tracé des filets de courant.

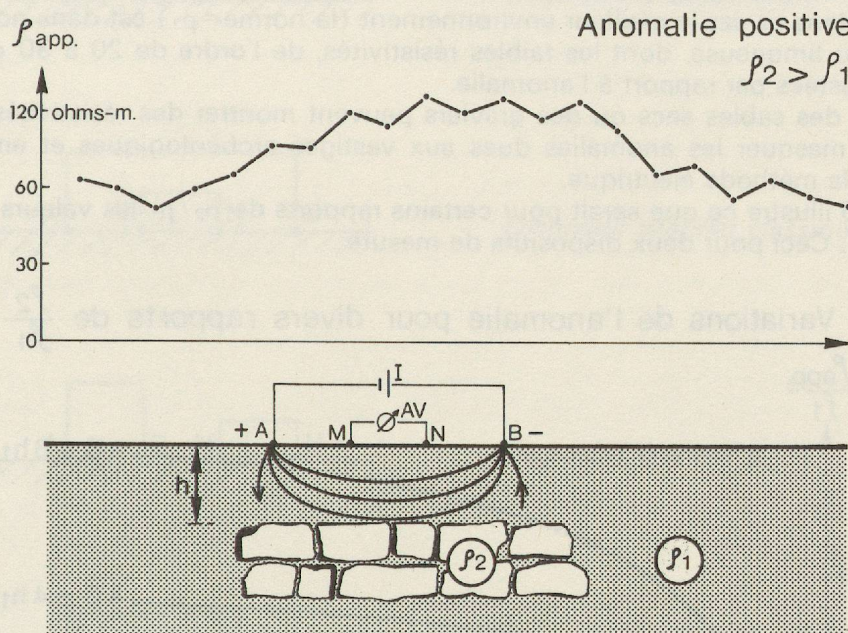


Figure 33

Le courant obéit toujours à la loi de l'effort minimum, aussi les filets de courant sont déviés et passent de préférence dans le terrain le moins résistant.

A l'aplomb du dallage, les filets de courant doivent se resserrer dans un conducteur de section réduite, la résistance du terrain et la résistivité apparente augmente. Dans cette zone, un profil de mesures ferait apparaître des valeurs de ρ_{app} élevées et par conséquent une anomalie positive.

Par contre, dans le cas d'une cavité remplie de matériel moins résistant que l'environnement, les filets de courant mettent à profit cet élargissement du conducteur et semblent être attirés vers cette structure. La résistivité apparente va diminuer et sur le profil de mesures se forme une anomalie négative.

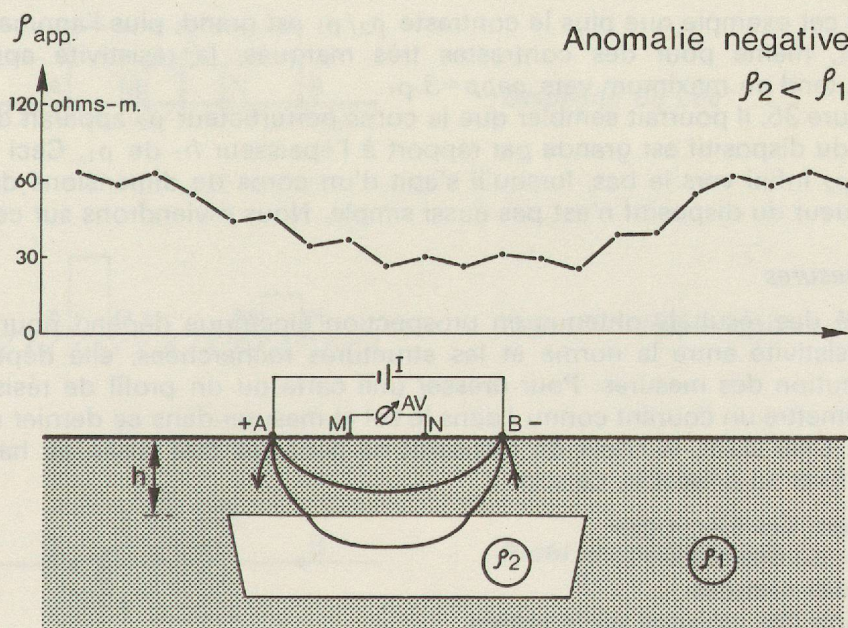


Figure 34

Pour un dispositif donné, l'anomalie, qu'elle soit positive ou négative, est d'autant plus marquée que le contraste des résistivités ρ_2 et ρ_1 est grand.

La prospection archéologique cherche souvent à mettre en évidence des objets électriquement résistants, dans ce cas le meilleur environnement (la norme = ρ_1) est dans nos régions une terre argileuse ou limoneuse, dont les faibles résistivités, de l'ordre de 20 à 30 ohms.m., sont nettement contrastées par rapport à l'anomalie.

Par contre, des sables secs ou des graviers peuvent montrer des résistivités très élevées, susceptibles de masquer les anomalies dues aux vestiges archéologiques et empêcher toute prospection par la méthode électrique.

La figure 35 illustre ce que serait pour certains rapports de ρ_2/ρ_1 les valeurs de l'anomalie relative ρ_{app}/ρ_1 . Ceci pour deux dispositifs de mesure.

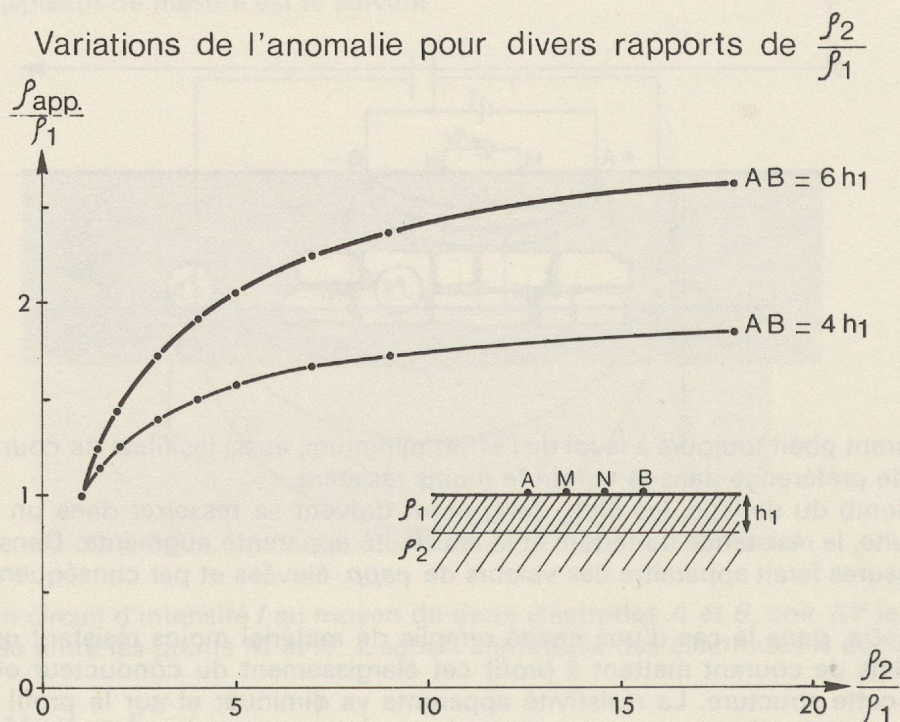


Figure 35

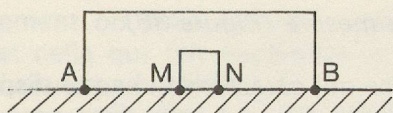
Il ressort de cet exemple que plus le contraste ρ_2/ρ_1 est grand, plus l'anomalie relative est forte; cependant, même pour des contrastes très marqués, la résistivité apparente, dans l'exemple choisi, tend au maximum vers $\rho_{app} = 3 \cdot \rho_1$.

A voir la figure 35, il pourrait sembler que le corps perturbateur ρ_2 apparaît d'autant mieux que la longueur du dispositif est grande par rapport à l'épaisseur h_1 de ρ_1 . Ceci n'est vrai que pour un terrain ρ_2 infini vers le bas, lorsqu'il s'agit d'un corps de dimensions déterminées, le choix de la longueur du dispositif n'est pas aussi simple. Nous reviendrons sur ce point.

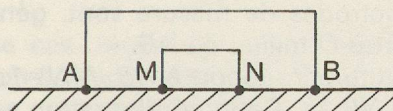
Exécution des mesures

Si la qualité des résultats obtenus en prospection électrique dépend pour une part des contrastes de résistivité entre la norme et les structures recherchées, elle dépend aussi des modalités d'exécution des mesures. Pour dresser une carte ou un profil de résistivités, il faut pour l'essentiel émettre un courant connu I dans le sol et mesurer dans ce dernier une différence de potentiel ΔV . Ceci étant, le choix du dispositif ne peut pas être laissé au hasard. Certains éléments sont à fixer au préalable, ce sont :

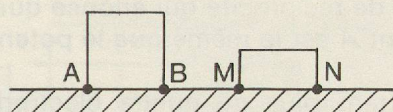
- L'arrangement des électrodes
- La longueur du dispositif
- La densité des mesures
- La disposition des mesures sur le terrain.



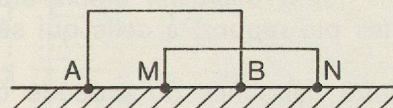
Dispositif Schlumberger



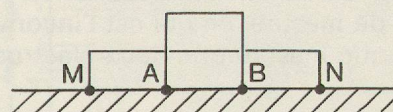
Dispositif Wenner classique α



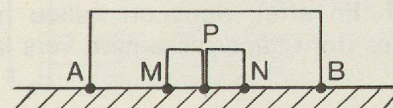
Dispositif Wenner β



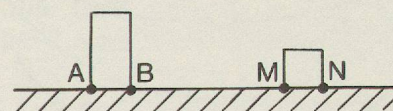
Dispositif Wenner γ



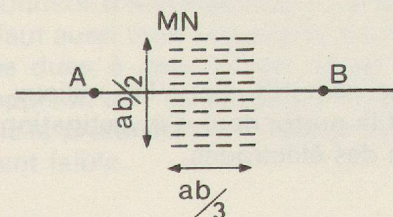
Dispositif Wenner inverse



Dispositif de Lee



Dispositif dipôle-dipôle



Profil et rectangle AB

Figure 36

A Les différents dispositifs de mesure (Figure 36).

C'est la configuration géométrique des électrodes qui caractérise chaque dispositif.

Le dispositif le plus couramment employé en prospection est celui dont nous avons parlé, appelé quadripôle et comportant deux pôles pour l'envoi de courant A et B , et deux pour la mesure des différences de potentiel M et N .

Partant de ce quadripôle, il existe plusieurs façons de disposer les électrodes. Le plus souvent, les quatre pôles sont alignés. Les deux électrodes de mesure sont, généralement, à l'intérieur de l'intervalle AB et symétriques par rapport à O milieu de AB .

Dispositif Schlumberger. La distance MN est petite par rapport à AB , $MN=1/5 AB$.

Les dispositifs Wenner, dans ce cas $AM=MN=NB=a$. Cette configuration a souvent été employée en archéologie pour des raisons de commodité, la longueur $AM=MN=NB=a$ est fréquemment de 1 mètre pour les mêmes raisons. Partant du dispositif classique, on peut interchanger les électrodes. Dans un sous-sol homogène, ces quatre dispositifs Wenner doivent fournir une mesure équivalente, en vertu du principe de réciprocité qui énonce que le potentiel créé en un point M par un courant envoyé en un point A est le même que le potentiel qu'aurait créé en A le même courant issu de M .

On peut aussi utiliser des dispositifs comportant plus de quatre électrodes. Dans *le dispositif de Lee*, une cinquième électrode est placée au milieu de MN , ce qui permet de mesurer deux différences de potentiel pour la même position des électrodes AB , l'une entre $MP=\Delta V_1$, l'autre entre $NP=\Delta V_2$.

Il existe enfin des dispositifs dissymétriques, tels que *le dispositif dipôle-dipôle*, MN est extérieur à AB et les distances MN et AB sont petites par rapport à celle qui sépare l'un de l'autre ces deux couples d'électrodes.

Le désir de diminuer les manipulations a donné naissance au procédé dit «profil et rectangle AB ». Dans ce cas, AB restent fixes. A l'intérieur du rectangle $AB/3$, $AB/2$, le champ est sensiblement homogène, on exécute un grand nombre de mesures à l'intérieur de ces limites avec un MN très petit, $MN=1/25$ à $1/50 AB$.

Cette méthode permet de dresser une petite carte des résistivités apparentes, malheureusement le facteur K doit être calculé pour chaque point de mesure, ce qui est l'inconvénient de ce dispositif. Par contre, le fait de ne déplacer entre chaque mesure que deux électrodes constitue un avantage.

B Longueur de ligne et profondeur d'investigation

A première vue la profondeur d'investigation peut sembler liée exclusivement à l'écartement des électrodes d'émission de courant A et B . En effet, dans un milieu homogène la configuration des filets de courant occupe des volumes dont l'accroissement vers la profondeur est proportionnel à l'allongement de AB .

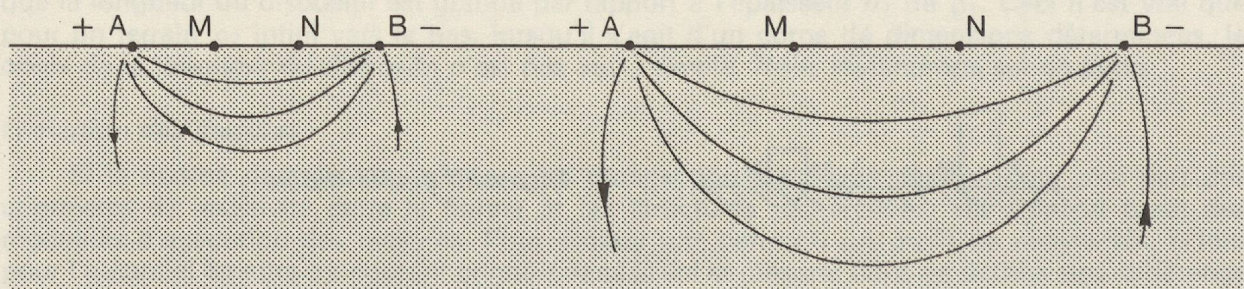


Figure 37

Malheureusement, les choses ne sont pas aussi simples. Pour les milieux hétérogènes surtout, il est difficile de définir avec rigueur ce qu'est la profondeur d'investigation et de quelle manière cette profondeur est corrélée à la disposition des électrodes.

Pratiquement on peut admettre que, dans un cas donné, la disposition optimum des électrodes est celle qui fait apparaître la plus grande variation de la résistivité apparente à l'aplomb de la structure à localiser.

Il faut noter que la disposition et l'écartement des électrodes peuvent être optima pour une couche horizontale mais ne plus l'être pour un amas placé à la même profondeur.

Ces réserves faites, il est cependant utile, pour fixer les idées, de calculer la profondeur d'investigation de divers dispositifs dans le cas simple d'un empilement de couches horizontales.

Dans ce cas, rappelons-le, un dispositif de longueur AB est dit avoir une profondeur d'investigation h lorsqu'il fait apparaître au mieux une couche située à cette profondeur h , c'est-à-dire lorsque cette couche affecte le plus la courbe des résistivités apparentes.

Un exemple fera saisir aisément cette notion qui n'est pas très usuelle.

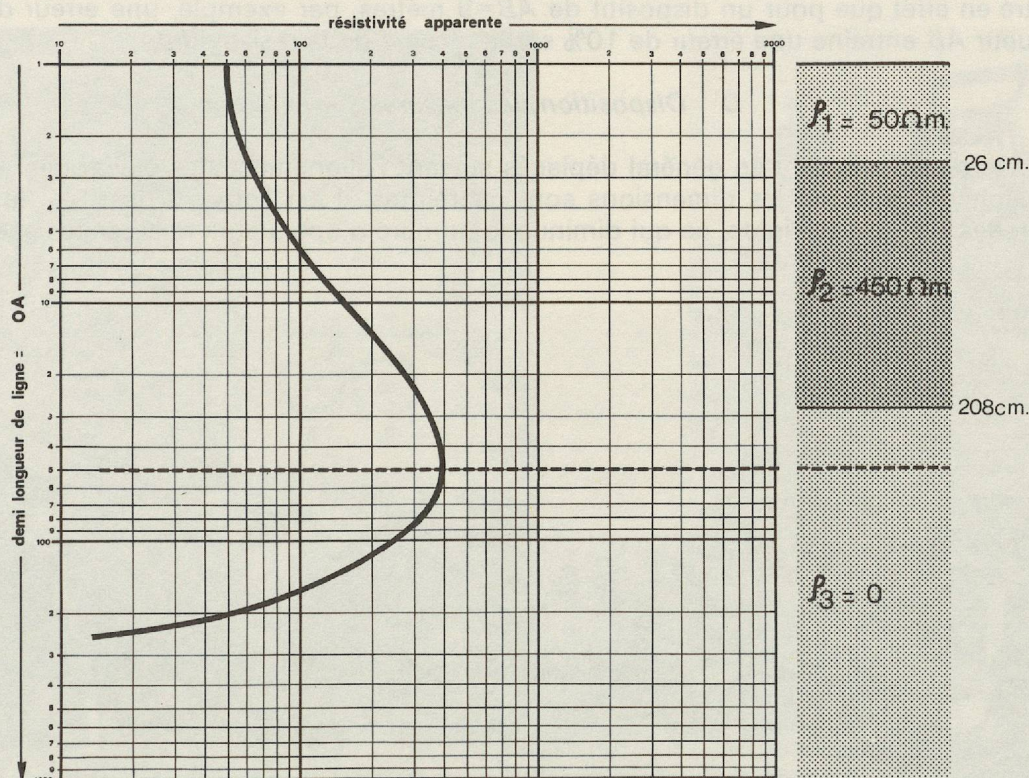


Figure 38

L'exemple ci-dessus montre que la couche p_2 située entre 26 cm et 208 cm, disons, pour fixer les idées, à 1 mètre de profondeur, se marque le plus fortement lorsque $AB=10$ mètres, c'est-à-dire que, dans ce cas, la profondeur d'investigation d'une ligne de 10 mètres vaut 1 mètre; on parle alors d'une profondeur d'investigation de 0,1.

En fait la profondeur d'investigation dépend à la fois de la position des électrodes d'émission A et B et de celle des électrodes de mesure M et N .

On a pu calculer que pour le cas des couches horizontales, la profondeur d'investigation est de 0,125 pour le dispositif Schlumberger, de 0,11 pour le dispositif Wenner, de 0,195 pour un double dipôle et enfin de 0,135 pour un dispositif focalisé.

La profondeur d'investigation n'est pas seule en cause dans le choix d'une longueur de dispositif. Il faut aussi tenir compte du pouvoir de résolution, c'est-à-dire le pouvoir de discerner les anomalies dues à deux objets assez rapprochés. D'après les récents travaux de Roy et Apparao, il apparaît que les systèmes Wenner et Schlumberger ont un bon pouvoir de résolution, alors que la profondeur d'investigation de ces deux arrangements est comme nous l'avons vu relativement faible.

Le choix du dispositif de mesure et de sa longueur a donc une importance capitale. Toute campagne de prospection devrait débuter par une série d'essais destinés à bien fixer ce choix.

C Densité des mesures

Lorsqu'on déplace sur le terrain un dispositif fixe pour dresser des profils ou une carte de résistivités, l'intervalle entre les mesures doit être choisi en fonction des dimensions des structures archéologiques.

Idéalement, compte tenu de la taille moyenne des murs, tombeaux, etc., cet intervalle ne devrait pas être supérieur à 1 mètre. Dans la pratique, s'il s'agit d'une prospection générale, on fait le plus souvent des mesures avec un pas égal à la longueur du dispositif, soit 3 mètres, 5 mètres, 9 mètres, etc. Par contre, lors d'un levé de détail, on peut réduire l'intervalle entre les mesures à 50 centimètres par exemple.

Dans tous les cas, il faut mesurer avec grand soin la distance entre les électrodes. On montre en effet que pour un dispositif de $AB=9$ mètres, par exemple, une erreur de 5% sur la longueur AB entraîne une erreur de 10% sur la mesure de la résistivité.

D Disposition des mesures sur le terrain

Les dispositifs sont en général déplacés suivant l'alignement des électrodes. En prospection archéologique où les dimensions sont restreintes, il est souvent possible de monter les électrodes sur un bâti rigide, ce qui diminue le nombre d'opérateurs nécessaires sur le terrain.



En général, on exécute ainsi une série de profils, parallèles entre eux et distants de quelques mètres. Ces profils doivent si possible être perpendiculaires à l'allongement des structures.

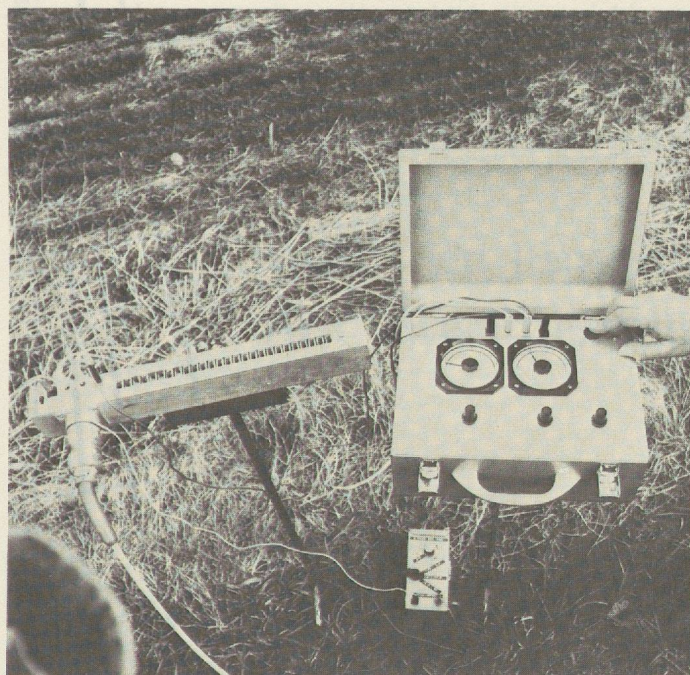
Lorsque les vestiges archéologiques ont des dimensions minimales, il peut être intéressant de resserrer les profils de sorte que la distance entre ceux-ci soit égale à l'intervalle entre les mesures. On obtient ainsi un quadrillage. Cette méthode permet de tracer de bonnes cartes de résistivités et les zones d'anomalies sont alors délimitées avec précision.

L'interprétation des profils et des cartes de résistivités est facilitée par la comparaison des résultats obtenus à l'aide de différentes longueurs de ligne. L'emploi de traînées de plusieurs longueurs permet d'obtenir des indications sur les variations de la résistivité avec la profondeur et facilite souvent la distinction entre des structures dissemblables, mais produisant sur un seul traîné des effets presque analogues.

Pour éviter d'avoir à repasser plusieurs fois sur les divers points de mesure, nous avons utilisé un système permettant de faire des traînées simultanées à plusieurs longueurs de ligne.

Ce système peut être décrit comme suit: un câble de 26 conducteurs, souple, avec une sortie tous les 50 centimètres ou tous les mètres est posé sur le sol. Chaque sortie est fixée à une électrode. Un clavier branché au bout du câble permet d'utiliser indifféremment n'importe quel groupe d'électrodes.

Après avoir mis à profit toute la longueur du câble, on déplace le système selon une direction choisie au préalable. L'intervalle entre les mesures peut être égal, au minimum, à la distance entre chaque sortie, soit par exemple 50 centimètres ou 1 mètre.



Grâce à ces divers aménagements de l'appareillage, les mesures sont beaucoup plus rapides de nos jours qu'il y a une dizaine d'années. Les progrès réalisés par les instruments de mesure eux-mêmes ne sont pas étrangers à cette évolution.

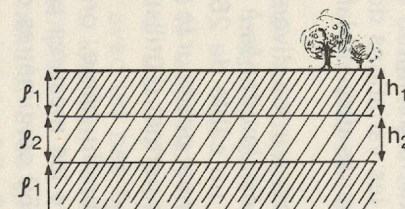
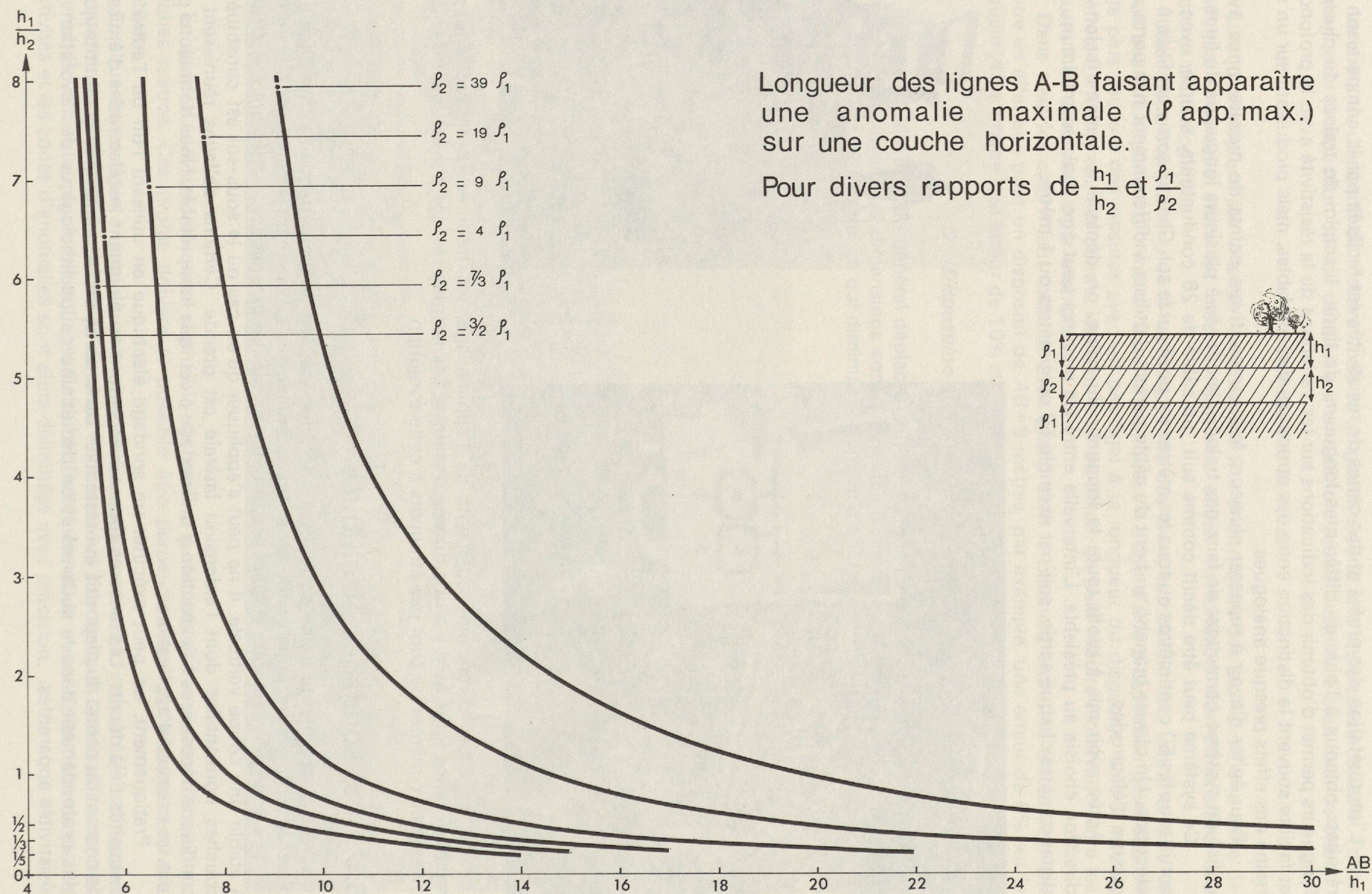
6.5 Les sondages électriques

Les dispositifs de traîné en longueur de ligne variable et permettant une investigation à diverses profondeurs, nous conduisent tout naturellement à examiner les sondages électriques.

Le sondage électrique a relativement peu d'emploi en prospection archéologique. Destiné à établir une coupe verticale, il ne peut s'appliquer qu'au cas où le sous-sol est constitué de couches horizontales dont l'extension latérale est grande. Certains dallages réunissent les conditions nécessaires à l'exécution d'un sondage électrique interprétable. Nous donnerons plus loin un exemple d'application.

Pratiquement, on peut exécuter un sondage électrique en utilisant l'un ou l'autre des dispositifs déjà décrits. Les mesures successives se font en éloignant les électrodes d'émission de courant du centre du dispositif qui reste fixe. De la sorte, on fait pénétrer le courant toujours plus profondément dans le sous-sol et on déduit une coupe lithologique de l'évolution des résistivités apparentes.

Figure 39



6.6 Effets de quelques structures archéologiques simples sur les résistivités apparentes

Les couches horizontales

Les formations horizontales sont les plus faciles à mettre en évidence, tant grâce aux profils de résistivités que grâce aux sondages électriques. Tant que les couches sont « très étendues », l'interprétation des résultats reste simple malgré quelques ambiguïtés.

La figure 39, page 70, illustre l'effet d'une couche résistante ρ_2 , dallage ou niveau de débris par exemple, plongée dans un milieu plus conducteur ρ_1 .

Pour chaque épaisseur du niveau résistant ou de sa couverture conductrice, il est possible de prévoir quelle sera la longueur de ligne optimale, c'est-à-dire celle faisant apparaître une anomalie maximale.

Comme le montre la figure 39, cette longueur de ligne varie non seulement avec le rapport h_1/h_2 mais aussi avec le rapport ρ_1/ρ_2 . Il faut remarquer que la longueur de ligne efficace peut être la même pour des valeurs de h_1/h_2 variables, pour autant que les contrastes de résistivité varient aussi.

Il est important d'utiliser des lignes de longueur aussi voisines que possible de l'optimum. On peut calculer à priori l'anomalie maximum provoquée par la présence dans le sous-sol d'une couche résistante ρ_2 , anomalie qui n'est pas toujours très marquée.

Valeurs de l'anomalie maximum $\frac{\rho_{app.}}{\rho_1}$
Pour divers rapports de $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ et $\frac{h_2}{h_1}$

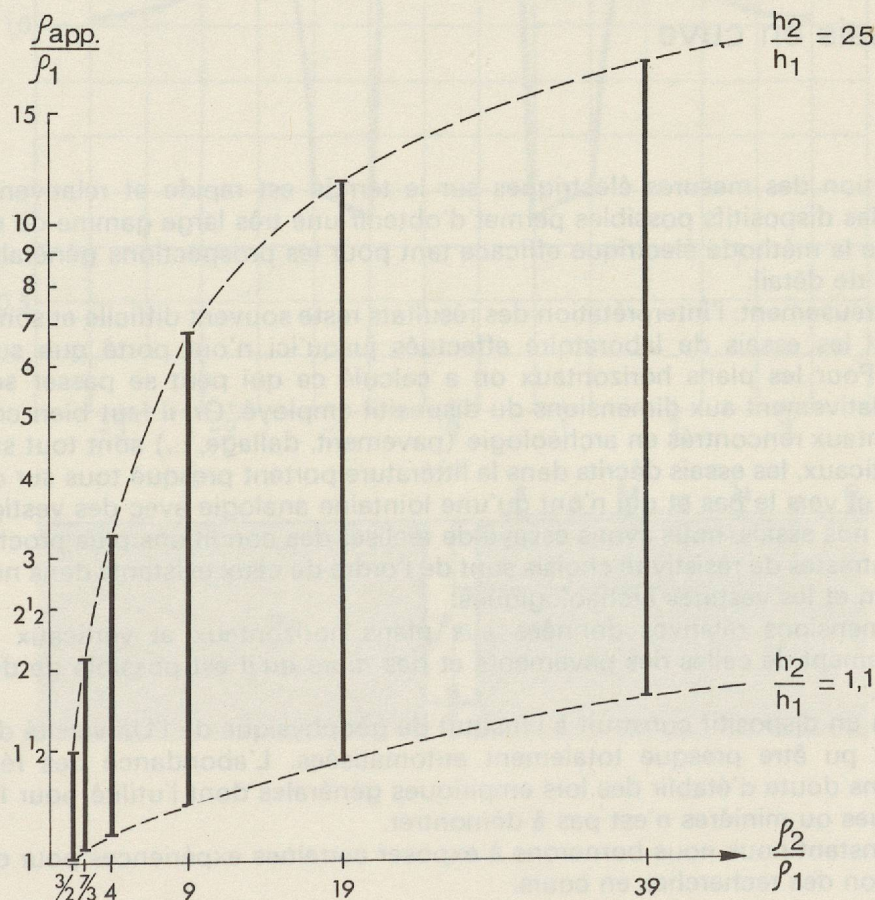


Figure 40

Pratiquement sur le terrain, qui par sa nature géologique n'est pas parfaitement homogène, l'attention n'est attirée que par des anomalies qui se chiffrent par des résistivités au moins 1,3 fois plus fortes que la norme.

Quand les couches horizontales ne sont pas «très étendues», les choses se compliquent singulièrement, toute prévision analytique devient pratiquement impossible, l'analyse ne peut se faire que grâce à l'étude de modèles réduits, nous y reviendrons ultérieurement.

Les couches verticales

Dans ce cas encore, seules les couches très grandes, voire infinies, provoquent des effets prévisibles mathématiquement. Les autres cas, c'est-à-dire presque tous ceux qui intéressent la prospection archéologique, doivent être étudiés sur des modèles analogiques.

La figure 41 représente un profil de résistivités calculé sur une couche verticale de profondeur infinie (ρ_2). Dans cet exemple $\rho_2=9$. ρ_1 et le dispositif utilisé est un Wenner pour lequel la distance entre électrodes (a) vaut deux fois l'épaisseur de la couche verticale.

On remarque immédiatement sur le profil la présence de trois pics. Le plus important des trois apparaît lorsque les électrodes de mesure MN passent sur le résistant, il attire l'attention sur la structure recherchée. Par contre, les deux pics latéraux sont produits par le passage de A et B sur la couche verticale, un observateur inexpérimenté pourrait y voir l'effet de deux structures supplémentaires.

Ces remarques expliquent pourquoi il peut être utile, malgré certaines difficultés, d'utiliser des dispositifs où seuls M et N sont déplacés, alors que A et B restent fixes, du moins temporairement.

6.7 Essais en cuve

Introduction

L'exécution des mesures électriques sur le terrain est rapide et relativement simple. La multiplicité des dispositifs possibles permet d'obtenir une très large gamme de résultats, ce qui devrait rendre la méthode électrique efficace tant pour les prospections générales que pour les prospections de détail.

Malheureusement, l'interprétation des résultats reste souvent difficile et sommaire. En effet, les calculs et les essais de laboratoire effectués jusqu'ici n'ont porté que sur des cas bien particuliers. Pour les plans horizontaux on a calculé ce qui peut se passer sur des couches «infinies» relativement aux dimensions du dispositif employé. Or, il faut bien constater que les plans horizontaux rencontrés en archéologie (pavement, dallage, ...) sont tout sauf infinis. Pour les plans verticaux, les essais décrits dans la littérature portent presque tous sur des plans infinis latéralement et vers le bas et qui n'ont qu'une lointaine analogie avec des vestiges de murs.

Lors de nos essais, nous avons essayé de réaliser des conditions plus proches de la réalité.

- Les contrastes de résistivité choisis sont de l'ordre de ceux existants dans nos régions entre le terrain et les vestiges archéologiques.
- Les dimensions relatives données aux plans horizontaux et verticaux se rapprochent sensiblement de celles des pavements et des murs qu'il est possible de détecter dans nos régions.

Grâce à un dispositif construit à l'Institut de géophysique de l'Université de Lausanne, les mesures ont pu être presque totalement automatisées. L'abondance des résultats obtenus permettra sans doute d'établir des lois empiriques générales dont l'utilité pour les prospections archéologiques ou minières n'est pas à démontrer.

Pour l'instant nous nous bornerons à exposer certaines expériences pour donner une idée de l'orientation des recherches en cours.

Profil des résistivités apparentes ($\rho_{app.}$) au passage d'un mur vertical infini.

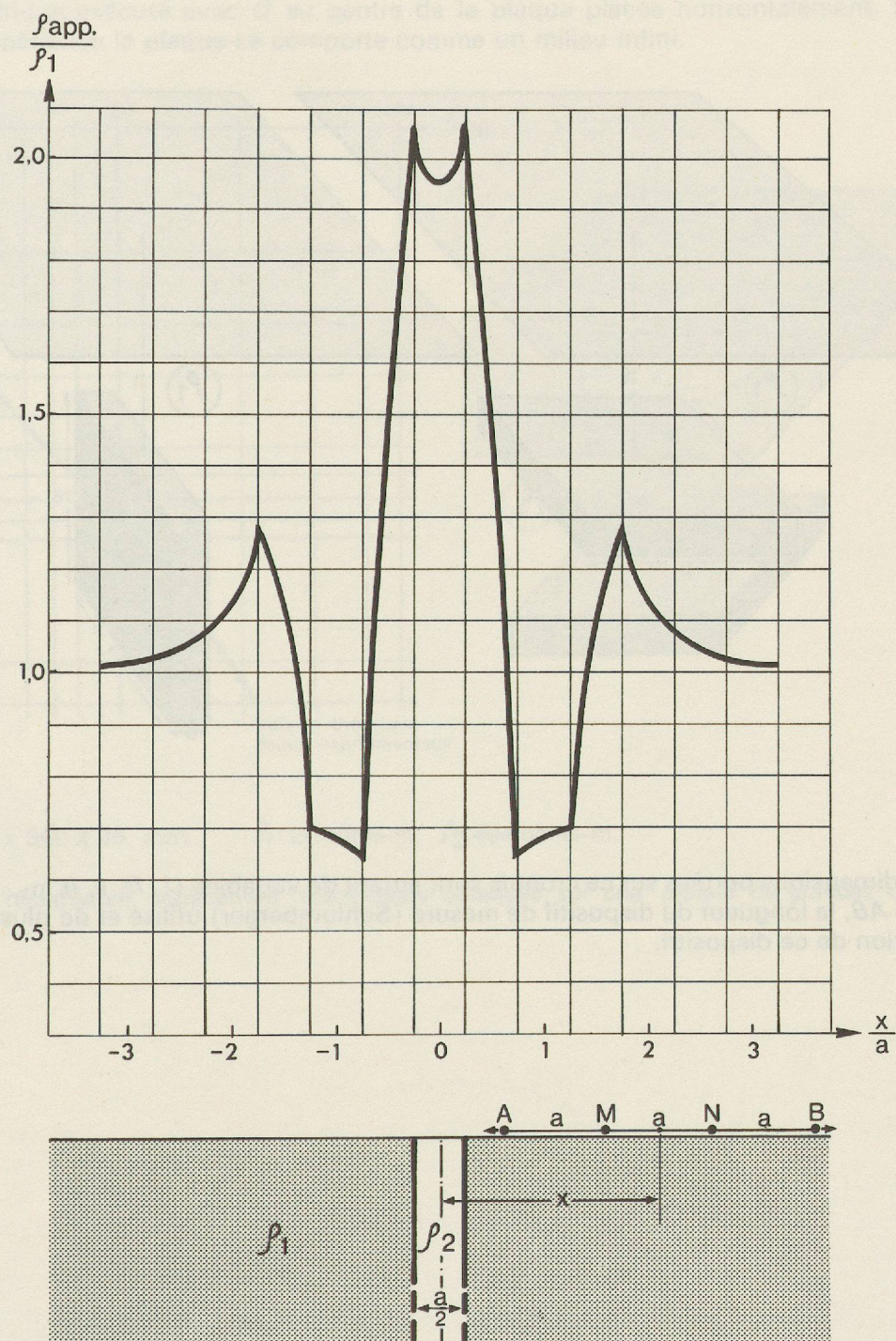


Figure 41

Premières expériences

Dans un premier temps nous nous sommes attachés à définir les variables à considérer dans un modèle réduit (plaque horizontale ou verticale) et à examiner l'allure générale des courbes de résistivités apparentes obtenues sur un tel modèle.

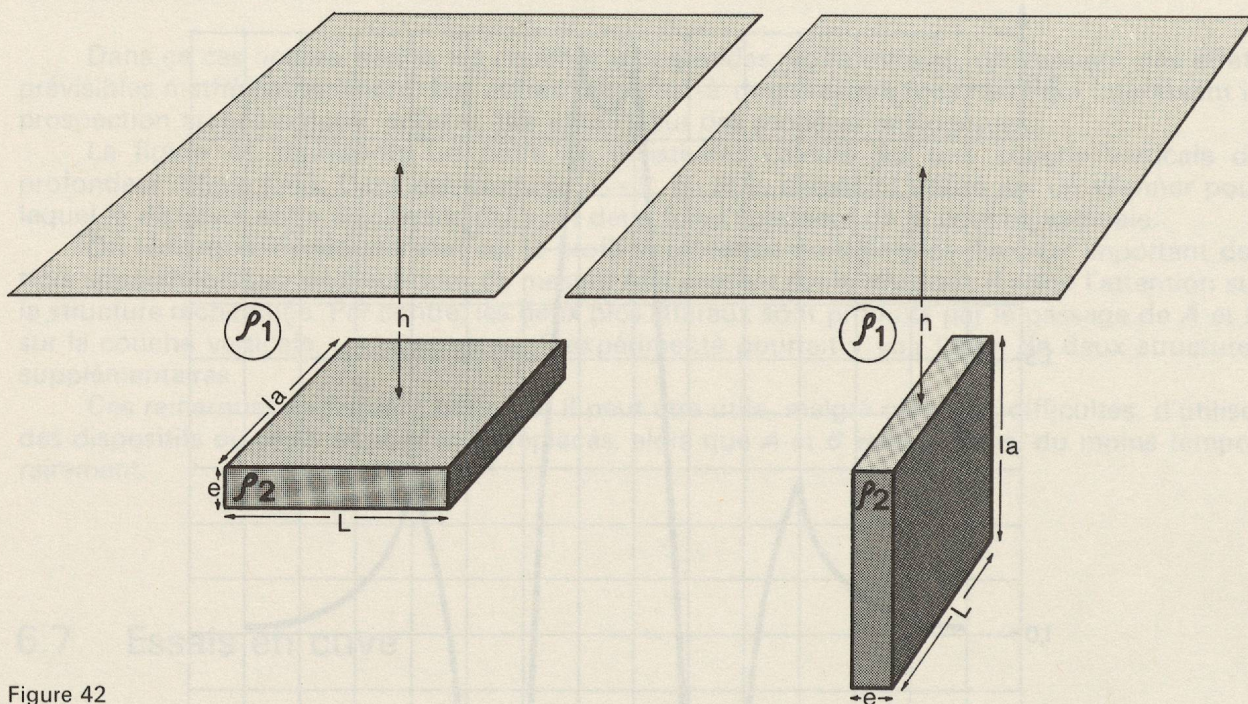
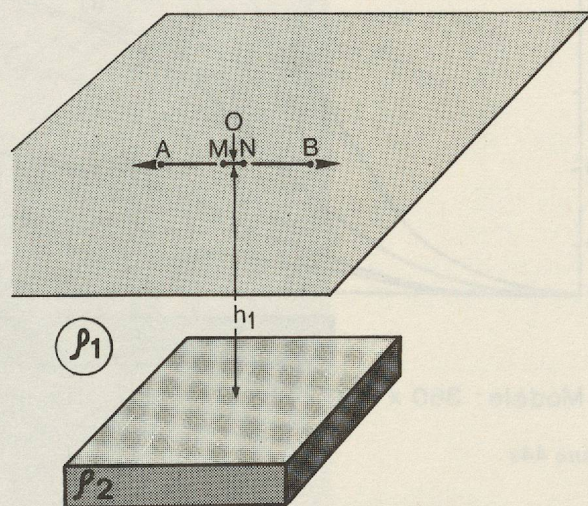
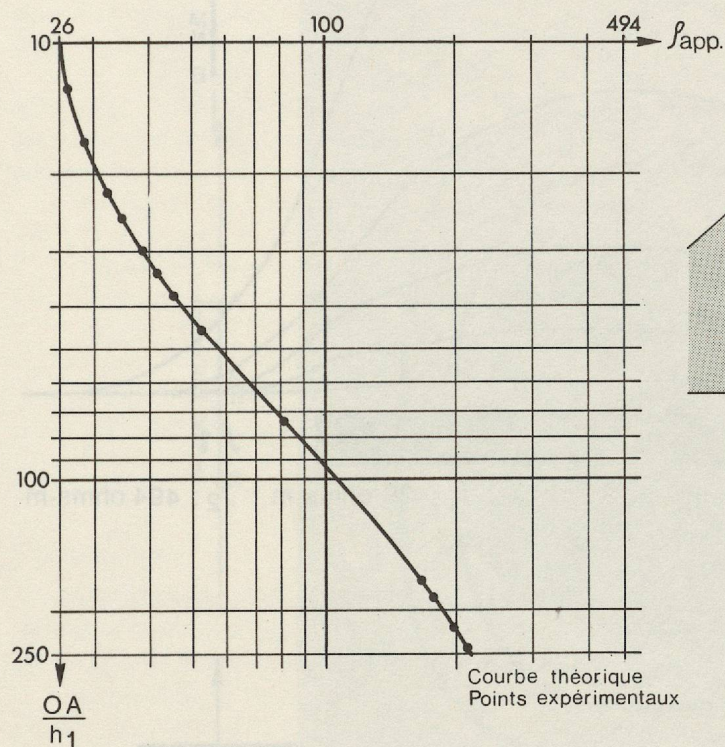


Figure 42

Les dimensions portées sur ce croquis sont autant de variables ($L, la, e, h, \rho_1, \rho_2$); on peut y ajouter AB , la longueur du dispositif de mesure (Schlumberger) utilisé et de plus la position et l'orientation de ce dispositif.

Allure générale des anomalies

Pour mettre en évidence l'allure générale des anomalies, nous nous sommes bornés tout d'abord à faire varier seulement AB/h d'une part, et d'autre part la position et l'orientation du dispositif par rapport à la plaque. Cette dernière a été choisie carrée avec $L=a=360$ mm, $e=25$ mm, $\rho_1=26$ ohms.m., $\rho_2=494$ ohms.m. La figure 43 rend compte des résultats d'un sondage électrique exécuté avec O au centre de la plaque placée horizontalement. Dans les limites de l'expérience la plaque se comporte comme un milieu infini.



Modèle 360 x 360 x 25 mm. ρ_1 : 26 ohms-m. ρ_2 : 494 ohms-m.

Valeurs des résistivités apparentes maximales obtenues sur une plaque de grandes dimensions.

Figure 43

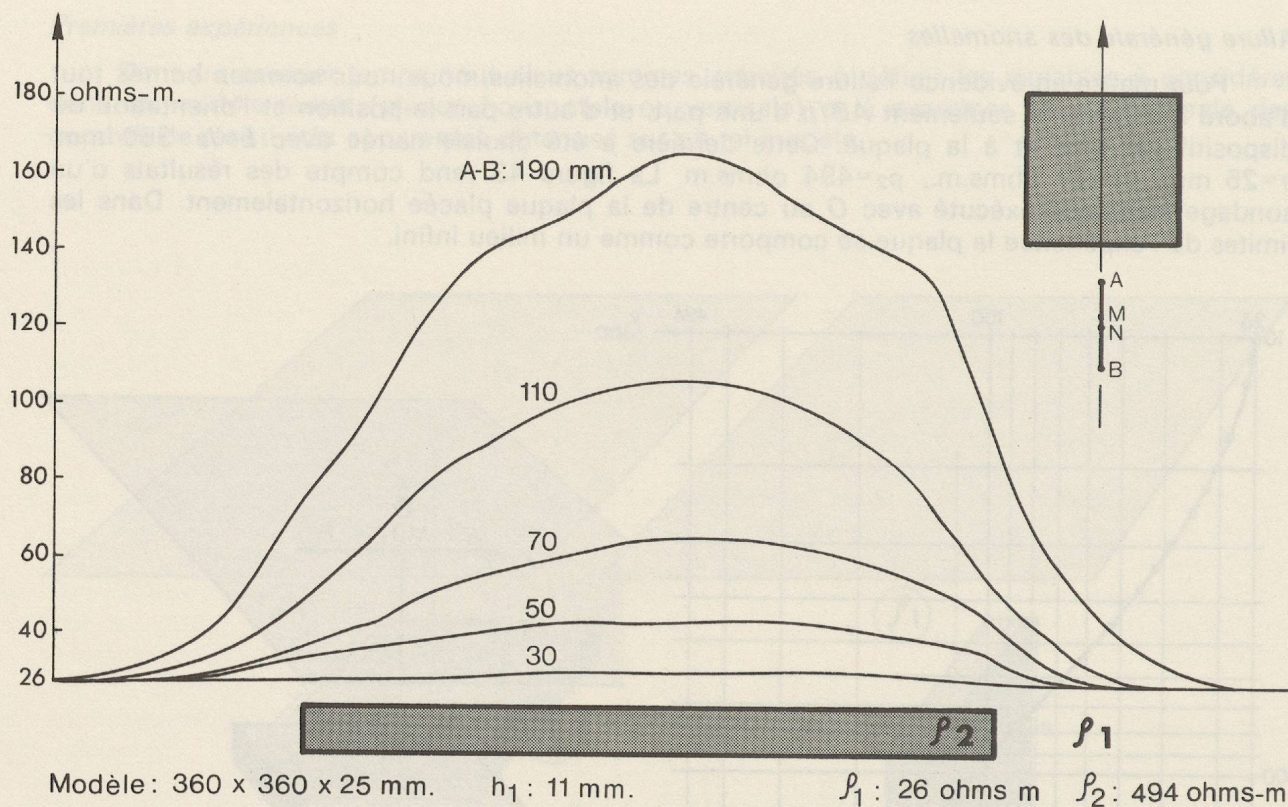


Figure 44a

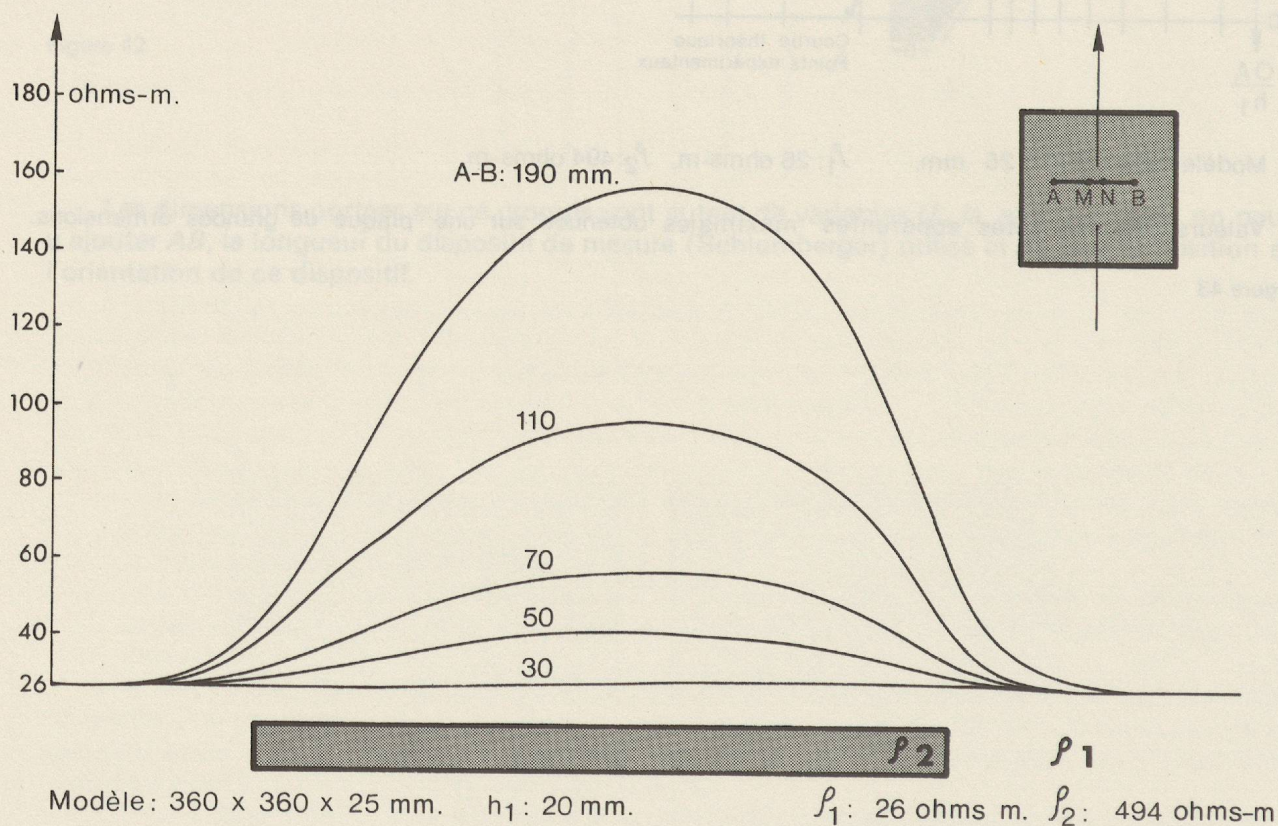


Figure 44b

Les figures 44_a et 44_b montrent l'allure des profils de résistivités lorsqu'on passe au-dessus de la médiane de la plaque horizontale avec un traîné longitudinal et un traîné transverse. L'effet de l'orientation du dispositif de traîné est mis en évidence sur la vue en plan de l'anomalie provoquée par la plaque carrée décrite ci-dessus (figure 45).

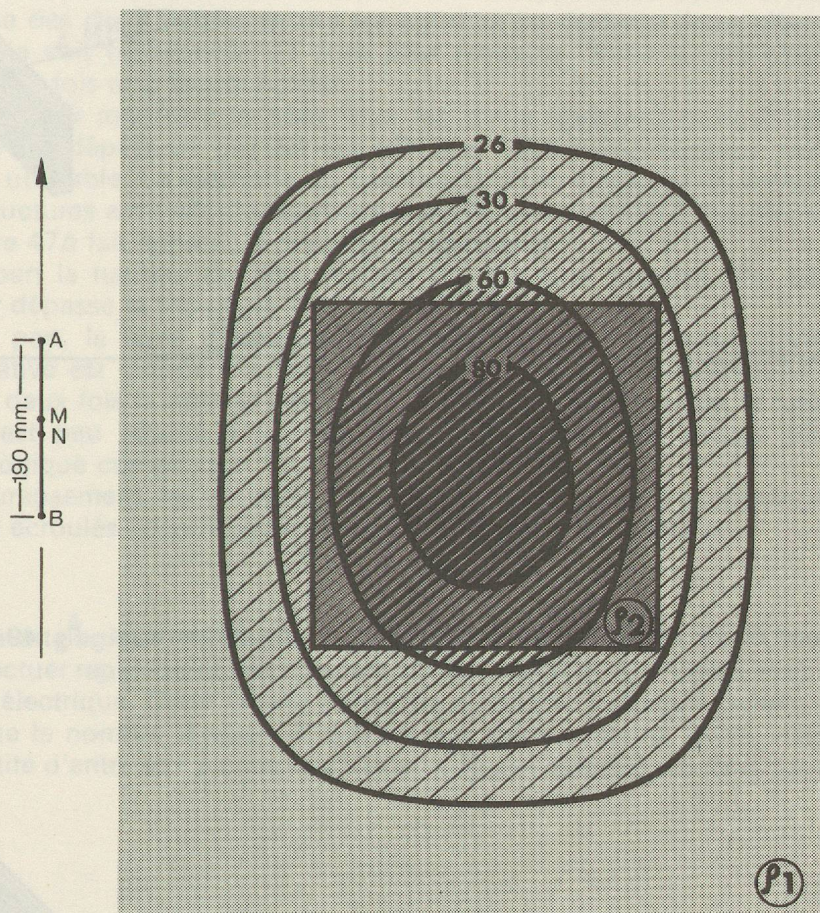


Figure 45

Modèle : 360 x 360 x 25 mm.
 $h_1 = 20$ mm.

$\rho_1 = 26$ ohms-m.
 $\rho_2 = 490$ ohms-m.

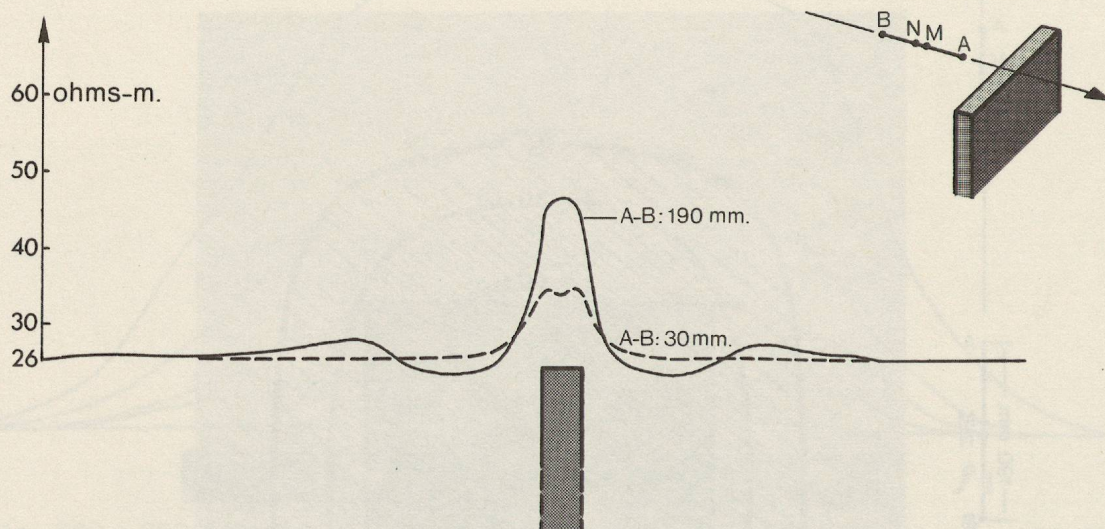
L'allure générale des anomalies sur une plaque verticale, qui peut être en archéologie assimilée à un mur, est elle aussi bien caractéristique.

La figure 46_a fait apparaître pour une ligne $AB=190$ mm un pic principal à l'aplomb du mur et deux pics secondaires latéraux. Pour les lignes plus courtes, $AB=30$ mm dans notre exemple, les pics latéraux disparaissent alors que le pic principal se subdivise en deux lobes. Quant à la figure 46_a, elle montre comment évoluent les résistivités des maxima lorsque les profils électriques recoupent le mur à diverses distances de ses extrémités.

L'examen même superficiel des anomalies obtenues sur une plaque carrée nous apporte déjà quelques renseignements :

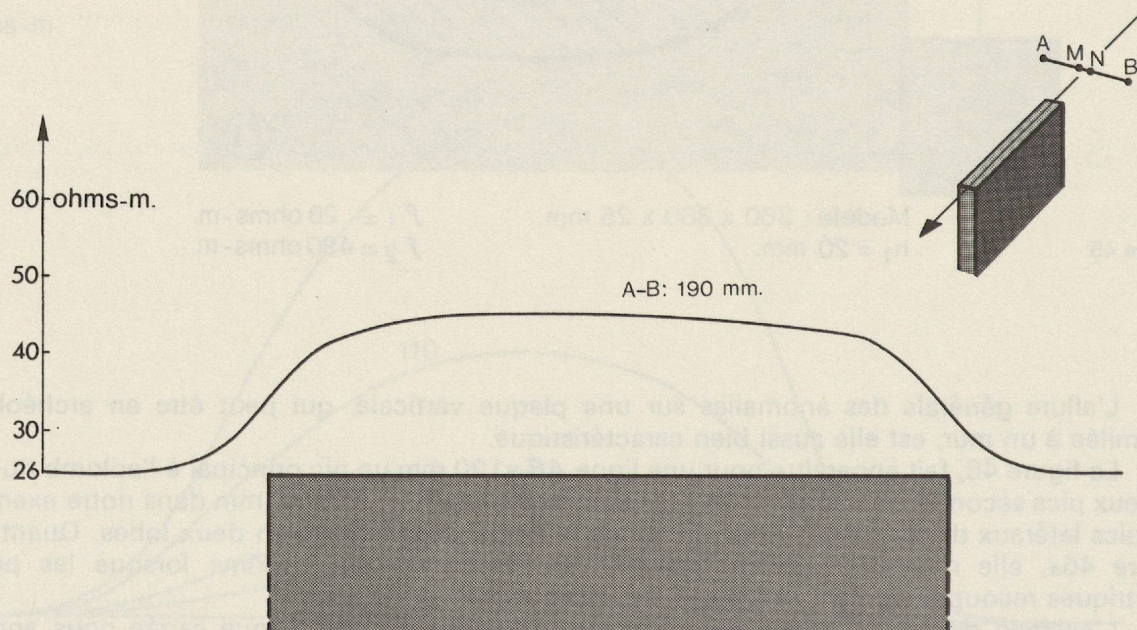
- Dans les limites fixées à l'expérience, l'anomalie observée est d'autant plus forte que le rapport AB/h est grand.
- Toutes choses restant égales par ailleurs, l'anomalie de la plaque verticale est moindre que celle de la plaque horizontale.

- Par contre, les maxima obtenus sur la plaque verticale décroissent lentement lorsqu'on s'approche des extrémités de celle-ci; alors que les maxima observés sur la plaque horizontale diminuent rapidement en direction des bords de cette dernière.
- En plan, l'anomalie est artificiellement allongée dans le sens parallèle au dispositif. D'autre part, elle diminue en amplitude mais aussi en largeur lorsque le rapport AB/h décroît.



Modèle vertical 360 x 360 x 25 mm. h_1 : 5 mm. ρ_1 : 26 ohms-m. ρ_2 : 494 ohms-m.

Figure 46a



Modèle vertical 360 x 360 x 25 mm. h_1 : 7 mm. ρ_1 : 26 ohms-m. ρ_2 : 494 ohms-m.

Figure 46b

Valeurs des anomalies maximales

Pour mieux simuler les problèmes archéologiques nous avons fait varier les dimensions mêmes de la plaque. Dans cette deuxième phase d'expériences, les changements portent non plus seulement sur AB/h et les orientations du dispositif, mais encore sur la largeur de la plaque lorsqu'elle est horizontale, sa hauteur lorsqu'elle est verticale (voir figure 42).

Pour simplifier un peu la lecture des résultats obtenus, les figures 47a et 47b ne fournissent que les résistivités maximales obtenues pour divers rapports de la/AB et AB/h .

Chacune des deux figures donne les courbes au-dessous desquelles les conditions pour que l'anomalie soit perceptible ne sont plus remplies. Nous avons choisi comme seuil de signification 1,3 fois et 2 fois la norme.

La figure 47a montre que pour tous les plans horizontaux envisagés, un dispositif de longueur AB ne dépassant pas $8h$ est efficace. Une telle longueur reste dans la pratique parfaitement utilisable. La méthode du traîné doit donc s'adapter facilement à la recherche de toutes les structures archéologiques même petites, assimilables à des plans horizontaux.

La figure 47b fait apparaître deux faits importants:

- D'une part la hauteur du plan vertical (la) ne joue que fort peu de rôle dès que cette hauteur dépasse la moitié de AB .
- D'autre part, la ligne d'émission AB nécessaire pour que se manifeste une anomalie significative est longue d'au moins $10h$; elle doit atteindre $40h$ pour que l'anomalie soit égale à deux fois la norme. Il découle de cette observation que le traîné de type Schlumberger est peu adapté à la mise en évidence de murs faisant partie d'une structure archéologique complexe.

Fort heureusement, les vestiges de murailles ou de parois s'accompagnent le plus souvent de matériaux écroulés constituant d'approximatifs plans horizontaux.

Conclusions

La cuve analogique construite à l'Institut de géophysique de l'Université de Lausanne permet d'effectuer rapidement des mesures sur des modèles très variés avec n'importe quel type de dispositif électrique. Cette facilité permettra d'adapter à chaque recherche sa technique.

Bien que le nombre d'essais à réaliser soit théoriquement infini, nous espérons pouvoir réduire quantité d'entre eux à quelques lois empiriques simples, valables pour de grands groupes de cas.

Figure 47b

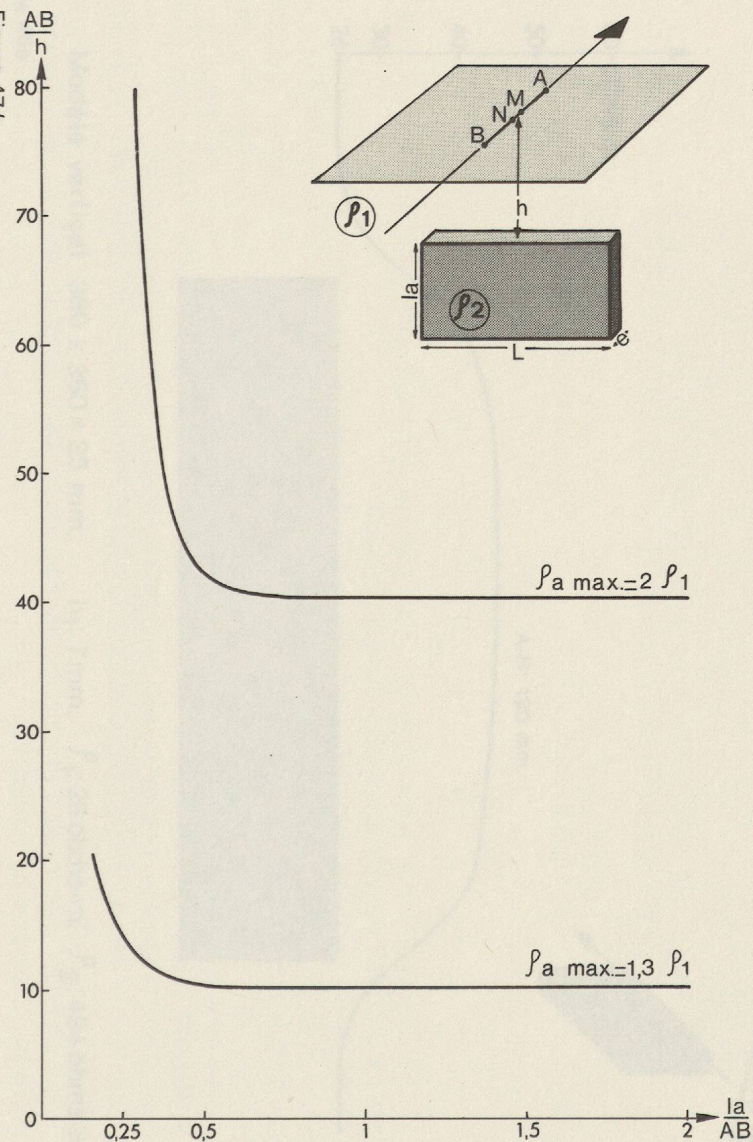
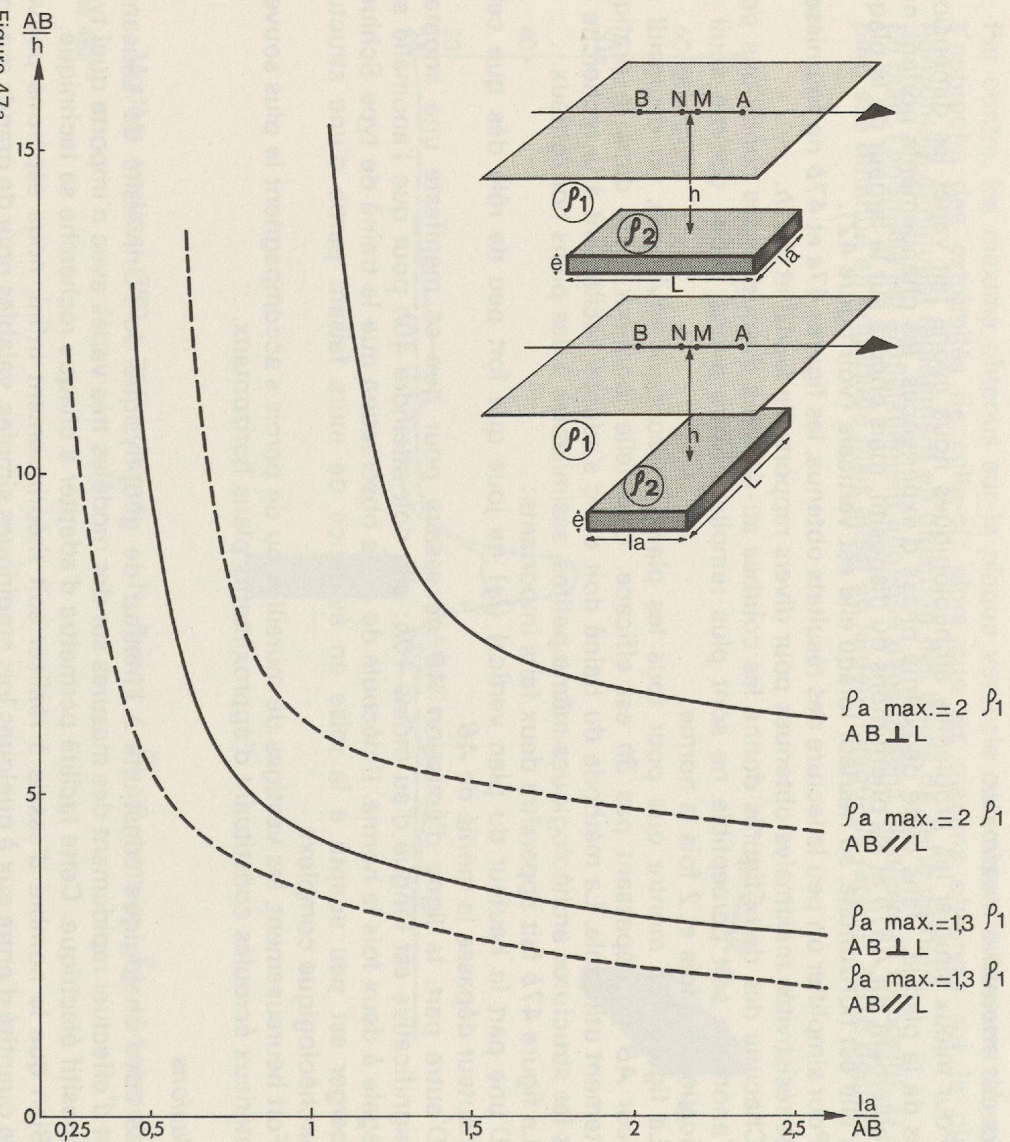


Figure 47a



Conditions à remplir en termes de $\frac{la}{AB}$ pour que le maximum de l'anomalie soit égal à $1,3 \times \rho_1$ et $2 \times \rho_1$.

6.8 Le pénétromètre-électrode

Le pénétromètre dynamique est généralement utilisé pour apprécier les qualités mécaniques des terrains de fondation et, dans une moindre mesure, comme outil de reconnaissance géologique. Divers auteurs ont publié des tables montrant les corrélations entre la résistance à l'enfoncement d'un pénétromètre donné et la nature des terrains traversés.

Les informations géologiques recueillies par ce procédé, bien que précieuses, restent souvent assez fragmentaires.

En transformant un pénétromètre en pénétromètre-électrode, il est possible d'améliorer la qualité des renseignements collectés grâce à la mesure simultanée de la résistance à l'enfoncement et de la résistivité électrique des terrains traversés.

Schéma sommaire du
pénétromètre - électrode

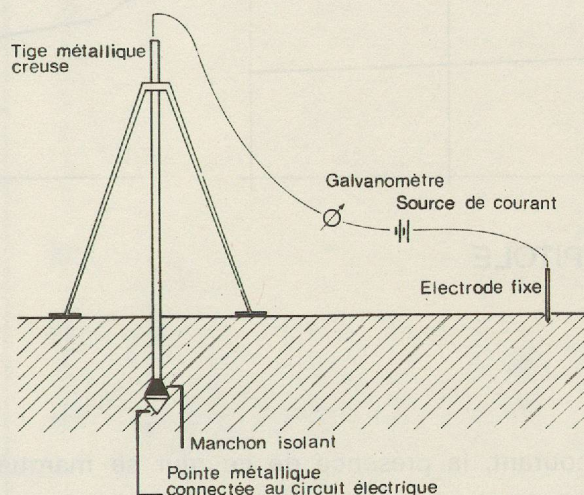


Figure 48

La tête mobile du pénétromètre, une électrode fixe et le sol sont connectés de façon à constituer un circuit électrique. Une tension constante (V) est appliquée à ce circuit, la mesure des valeurs successives prises par le courant (I) fournit immédiatement une image des valeurs relatives des résistivités électriques des couches traversées par la pointe du pénétromètre.

Ultérieurement, il est facile de calculer des résistivités vraies, et par conséquent caractéristiques, de ces couches.

Le pénétromètre en prospection archéologique

Jusqu'à présent, il ne semble pas que la prospection archéologique ait mis à profit les possibilités du pénétromètre.

Divers essais exécutés à Avenches semblent pourtant très concluants (figure 49).

Dans ce cas, la courbe de résistance à l'enfoncement suffit à elle seule à repérer le mur romain enfoui. Elle permet en outre d'en préciser la profondeur.

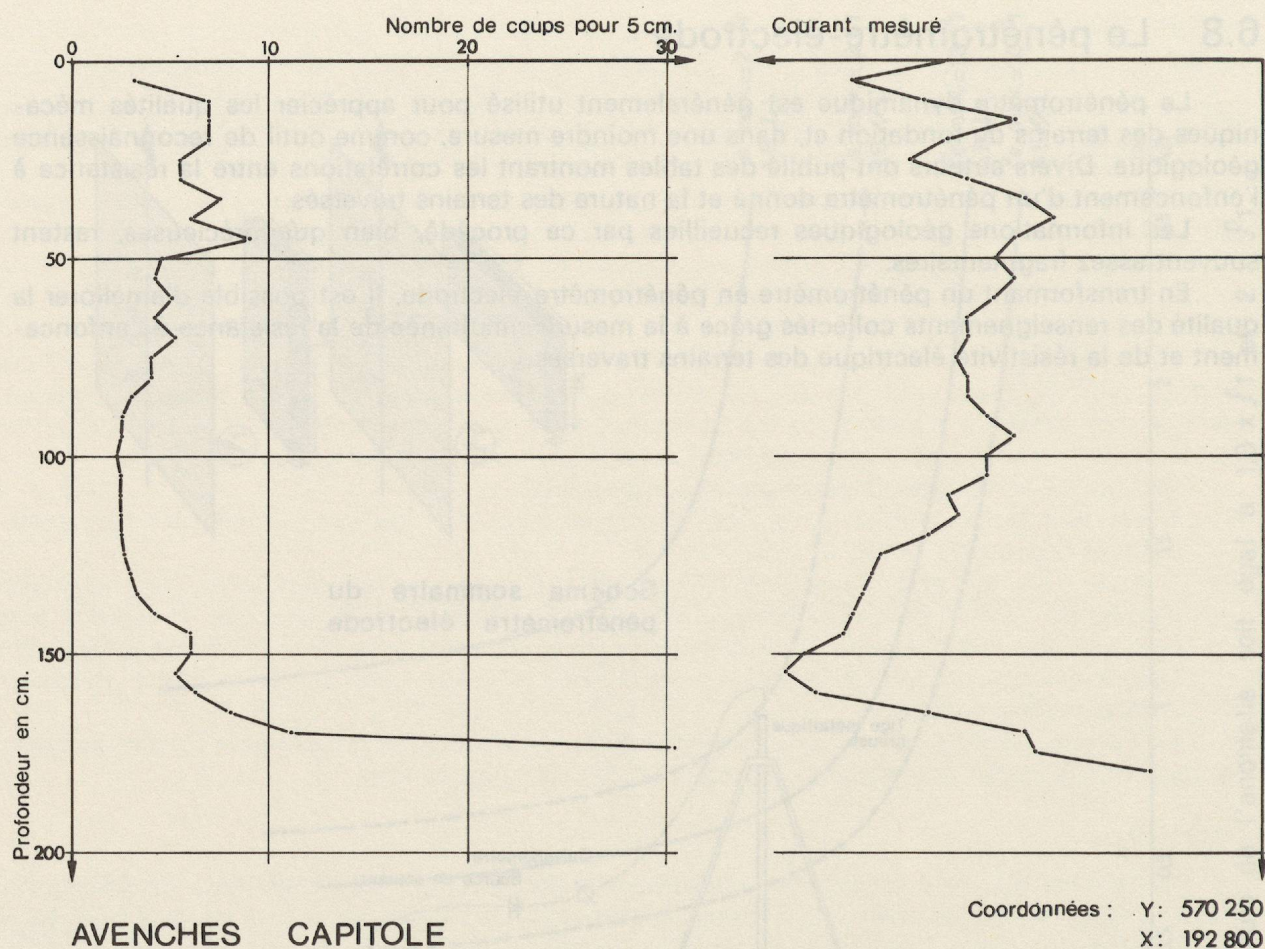
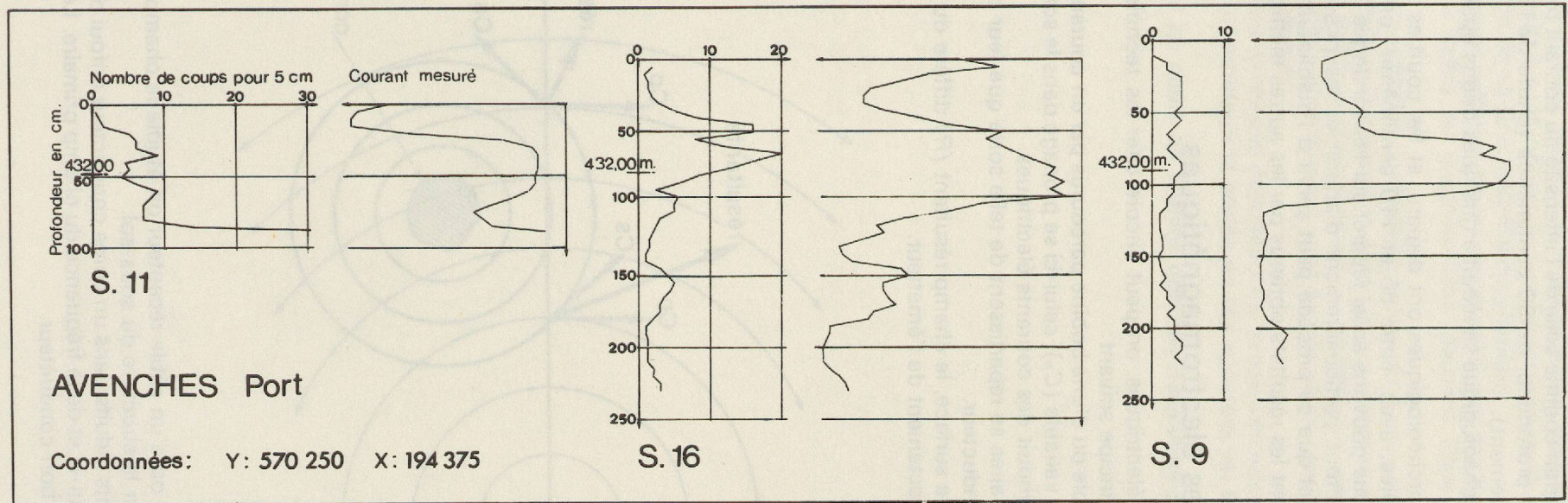


Figure 49

Sur la courbe de courant, la présence de ce mur se marque par une brusque chute d'intensité.

Dans l'exemple suivant (figure 50), l'utilité du pénétrömètre-électrode est encore plus évidente.



La courbe de pénétration comme celle de l'intensité du courant révèlent au *S11* la présence de vestiges romains à une profondeur de 80 centimètres (chute de l'intensité et augmentation de la résistance à l'enfoncement).

Au *S16*, la couche archéologique se réduit à quelques débris épars entre 150 et 180 centimètres.

Au *S9*, les vestiges archéologiques ont disparu, et les courbes reflètent la «stratigraphie normale» de la zone étudiée, avec, entre 65 et 110 centimètres, une couche de sable et de gravillons. Couche que nous pouvons aussi repérer sur les sondages 11 et 16.

Cet exemple permet tout particulièrement d'apprécier les possibilités du pénétrömètre-électrode. Il montre en effet que ce procédé peut servir à l'établissement d'une microstratigraphie qui complète utilement les résultats obtenus par les autres méthodes de prospection.

6.9 Les méthodes électromagnétiques

Parmi les méthodes électriques, on peut encore citer les techniques électromagnétiques. Elles sont basées sur le principe suivant :

Si au moyen d'un câble ou d'une bobine parcourus par un courant alternatif, on produit un champ électromagnétique variable (C_p), celui-ci se propage dans le sous-sol et, mis en présence d'un corps conducteur, y induit des courants électriques.

Ces courants secondaires se répartissent de telle sorte que leur champ électromagnétique (C_s) s'oppose au champ inducteur.

En chaque point de la surface, le champ résultant (R) diffère du champ primaire, c'est-à-dire du champ arrivant directement de l'émetteur.

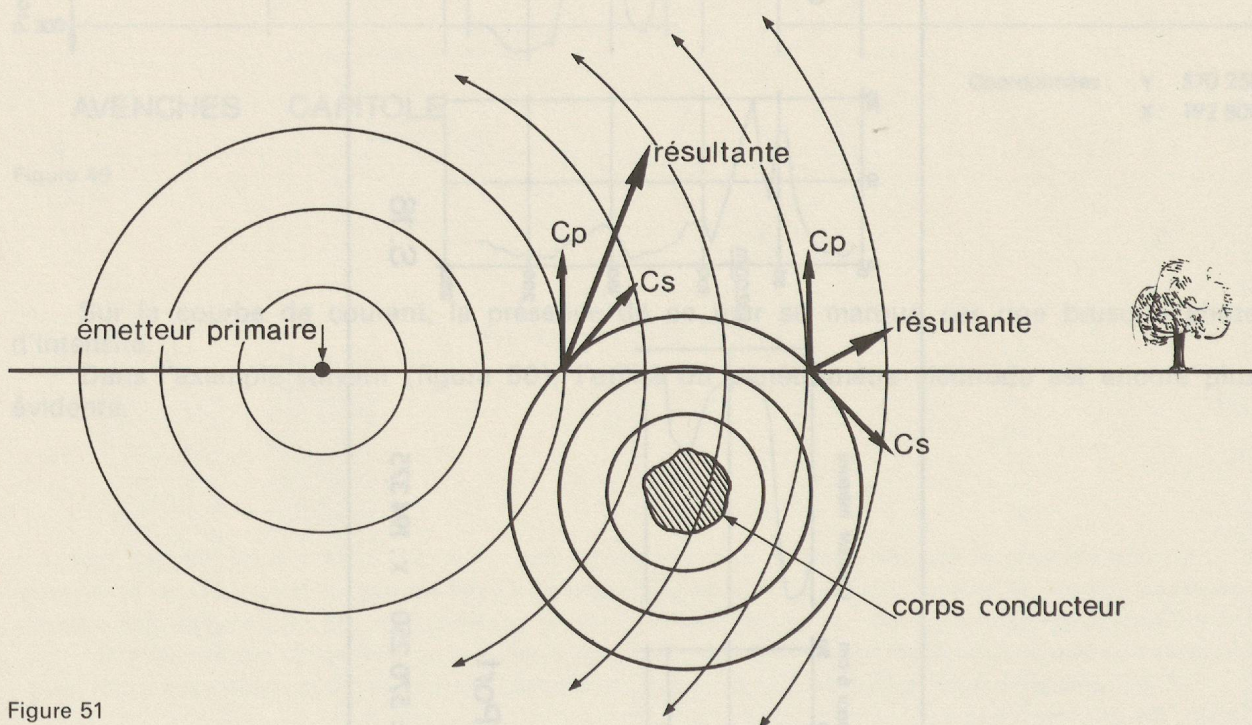


Figure 51

A l'aide d'une bobine ou d'un câble récepteur on étudie le champ résultant, ce qui permet de tirer des conclusions sur la structure du sous-sol.

L'intensité des courants induits dans un corps conducteur enfoui dépend entre autres de la résistivité électrique de celui-ci et de la fréquence du champ primaire. Les courants sont d'autant plus forts que le corps est bon conducteur.

En surface, grâce à la bobine réceptrice, c'est la partie magnétique du champ que l'on mesure; si bien que les résultats sont influencés non seulement par la conductibilité du sous-sol mais aussi par les variations de sa susceptibilité magnétique.

De récentes prospections archéologiques ont montré que des fossés, des remblais ou des tuiles qui sont décelables grâce au magnétomètre peuvent l'être aussi par les méthodes d'induction.

Ces effets, liés à la susceptibilité, sont faibles comparés à ceux causés par la conductibilité, aussi les techniques électromagnétiques sont-elles surtout utilisées pour la recherche de corps conducteurs. C'est ainsi que l'on emploie souvent, en archéologie, des détecteurs de mines, qui révèlent la présence de métaux. Ces derniers sont de très bons conducteurs, leur résistivité est de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-4} ohm.m.

Malheureusement, dans le cas des détecteurs de mines, l'émetteur et le récepteur sont très proches l'un de l'autre, c'est pourquoi la portée de ces appareils est très faible, ce qui en limite considérablement l'usage.

C'est le plus souvent au cours de fouilles que ces détecteurs peuvent rendre de grands services.

6.10 Exemples de prospection

ÉTUDE GÉOÉLECTRIQUE DE RECONNAISSANCE (Figure 52).

Villa romaine - Mornex - Genève - Suisse.

La figure 52 illustre la toute première prospection archéologique exécutée par l'Université de Lausanne. Nous verrons qu'elle illustre aussi le rôle que peut jouer la chance dans une telle prospection.

A Mornex, les archéologues avaient repéré des fragments de tuiles romaines dispersés dans les prés. Il semblait difficile, sans l'aide de la géophysique, de fixer l'emplacement de la villa d'où paraissaient provenir ces débris.

Les mesures électriques, exécutées sur toute la surface où se rencontraient des tuiles, montrent d'une part que la résistivité du terrain est basse, moins de 80 ohms.m, et d'autre part qu'elle varie très peu. Les circonstances extra-archéologiques sont donc très favorables.

Quelques valeurs, bien groupées, font apparaître une très nette anomalie. Des mesures complémentaires délimitent une surface où la résistivité atteint au moins deux fois et jusqu'à quatre fois la norme. A première vue, nous pouvions penser que cette surface recouvrait l'ancienne habitation romaine.

En fait, les fouilles ont montré que l'anomalie repérée correspond parfaitement aux zones où le sol de la villa a subsisté plus ou moins endommagé. Par contre, des murs relativement importants ont été découverts par les archéologues hors des zones que signalent les résistivités électriques.

Les essais en cuve, que nous décrivons au paragraphe 6.7, ont montré que malgré ses murs importants, la villa de Mornex nous aurait complètement échappé si des pavements et des fragments d'hypocauste n'avaient pas subsisté.

En fait, le dispositif de mesure utilisé ne permettait pas de repérer des murs tels que ceux mis au jour par la suite. Mais cela nous l'ignorions au moment de cette première prospection; seule la chance nous a évité un échec.

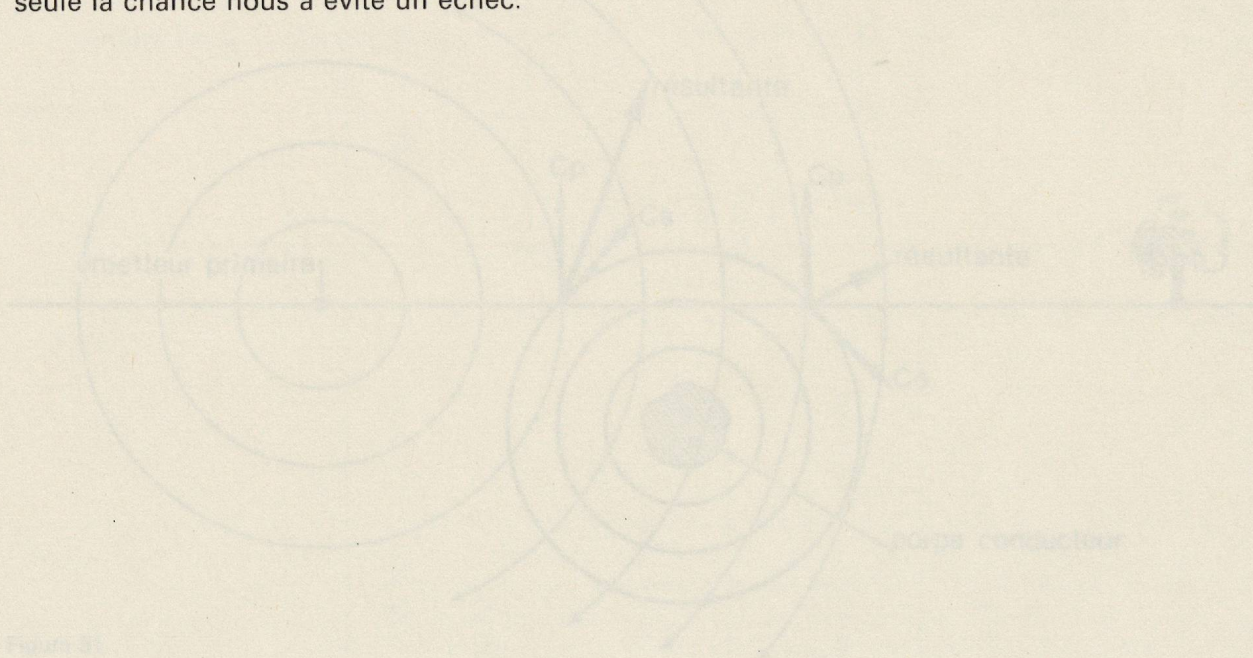


Figure 52

A l'aide d'une balance sur un câble récepteur on mesure le champ résultant de la somme des courants induits par la structure du sol.

L'intensité des courants induits dans un sol est une fonction de la résistivité électrique de celui-ci et de la fréquence du champ primaire. Les courants sont d'autant plus forts que le corps est plus conducteur.

MORNEX ~ VILLA ROMAINE

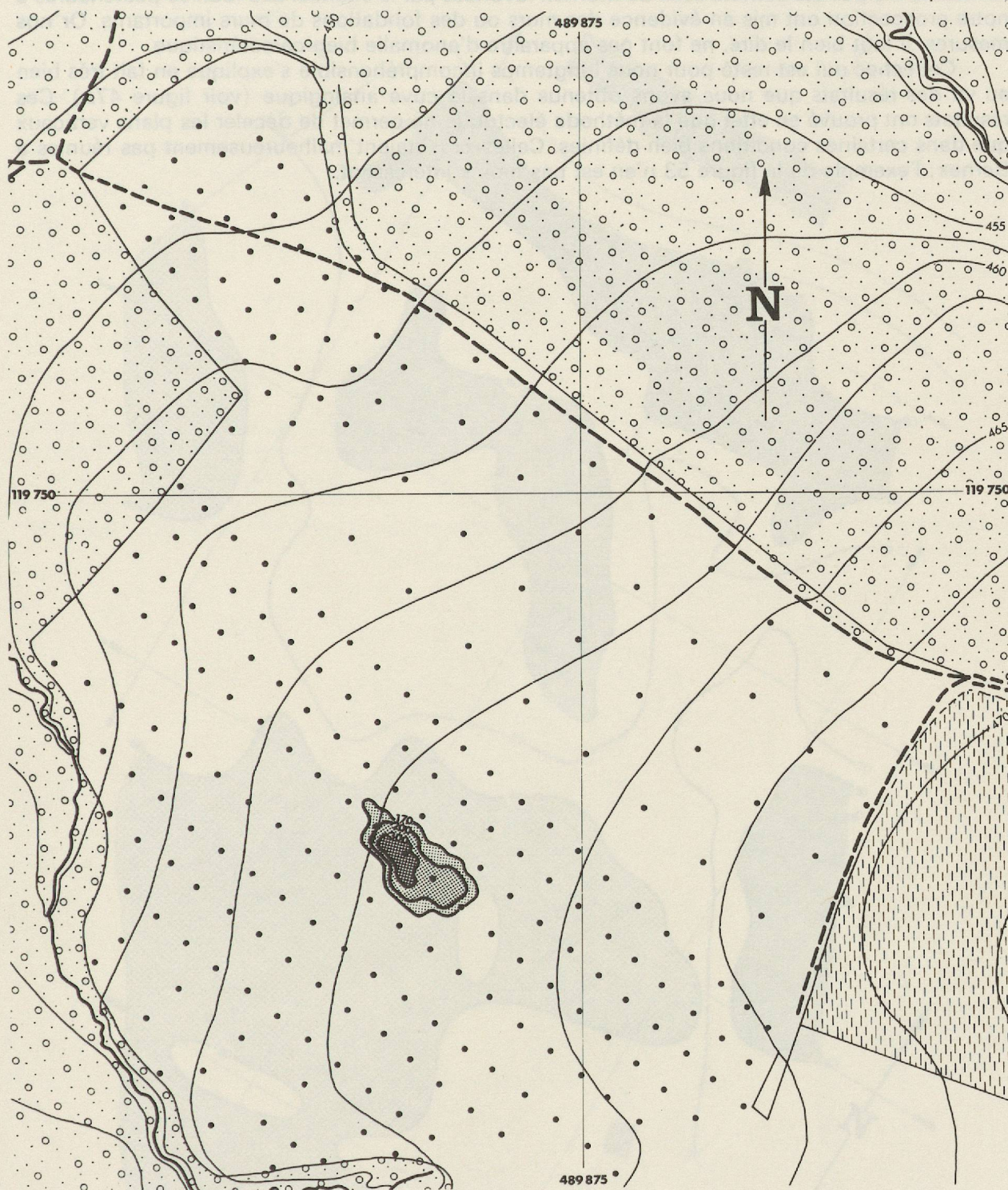
RESISTIVITES ELECTRIQUES APPARENTES

A-B: 5 m.

• Stations de mesures

Valeurs en ohms-m.

Echelle 20 m.



INSTITUT DE GEOPHYSIQUE · UNIVERSITE DE LAUSANNE

D.Chapellier 1973

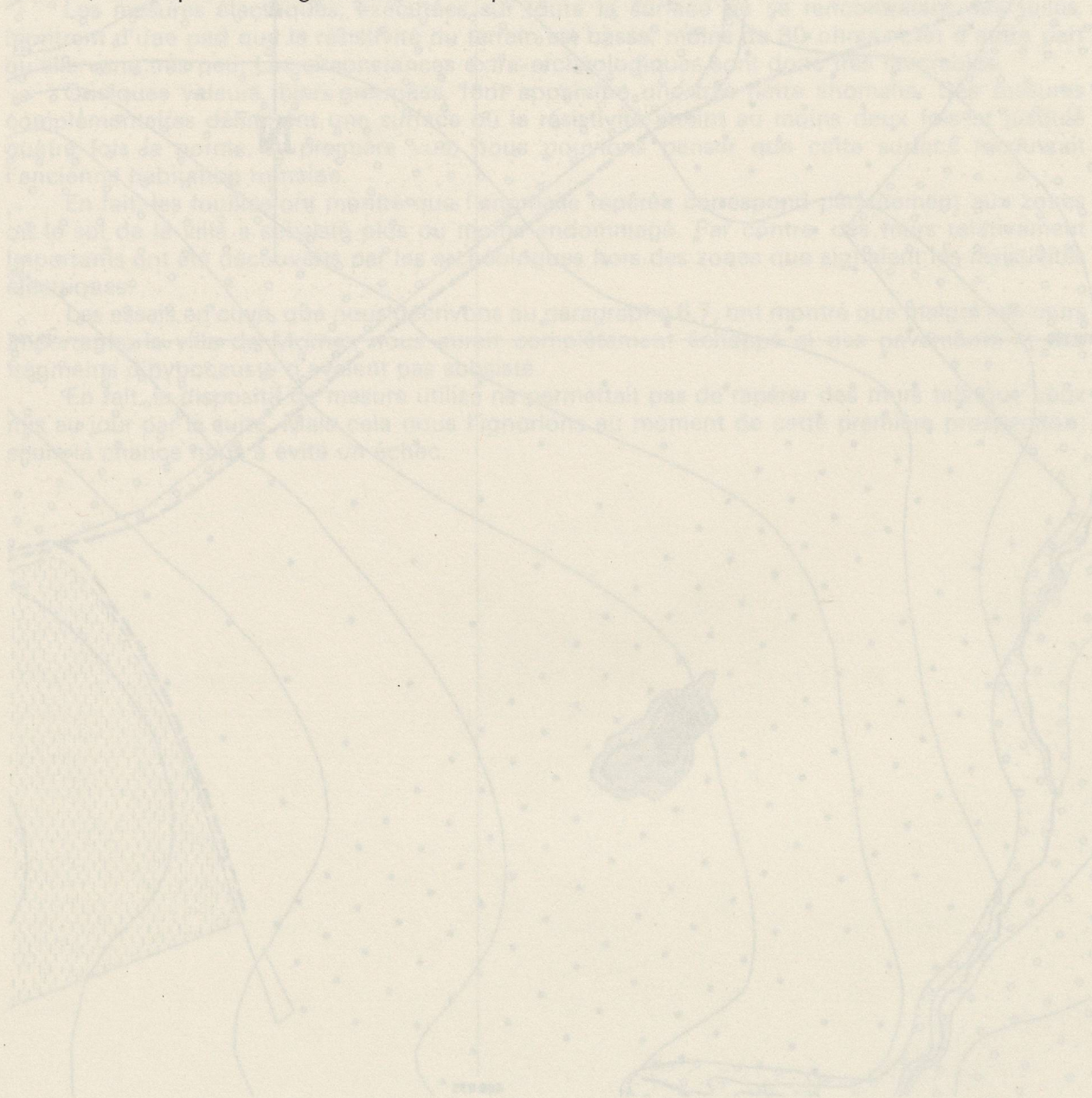
Étude géoélectrique de reconnaissance (Figure 52)

ÉTUDE GÉOÉLECTRIQUE DE SEMI-DÉTAIL (Figure 53).

Villa romaine - Bernex - Genève - Suisse.

L'étude de Bernex, exécutée elle aussi avant nos recherches sur le repérage des plans verticaux, n'a pas été comme celle de Mornex favorisée par la chance. Les fouilles postérieures à notre prospection ont mis en évidence des murs ou des fondations de murs importants. Or nos mesures, il faut bien le dire, ne font pas apparaître d'anomalie bien caractéristique.

Cet échec qui est resté pour nous longtemps incompréhensible s'explique en fait très bien au vu des résultats que nous avons obtenus dans la cuve analogique (voir figure 47b). Ces résultats ont prouvé en effet que la méthode électrique ne permet de détecter les plans verticaux que dans certaines conditions bien définies. Celles-ci n'étaient malheureusement pas réunies à Bernex; l'exemple de la figure 53 n'en est pas moins intéressant.



BERNEX ~ VILLA ROMAINE

RESISTIVITES ELECTRIQUES APPARENTES

A-B: 9 m.

Echelle 10 m.

Valeurs en ohms-m.



INSTITUT DE GEOPHYSIQUE
UNIVERSITE DE LAUSANNE

D. Chapellier 1973

Étude géoélectrique de semi-détail (Figure 53)

ÉTUDE GÉOÉLECTRIQUE GÉNÉRALE ET DE DÉTAIL (Figures 54 et 55).

Villa romaine - La Chaux - Vaud - Suisse.

Les figures 54 et 55 illustrent deux stades de la prospection électrique exécutée sur l'emplacement probable d'une ville romaine.

Une carte des résistivités obtenue avec une ligne d'émission (*AB*) longue de 9 mètres (figure 54) permet de situer grossièrement l'emplacement des bâtiments anciens qui se disposent approximativement selon un rectangle.

Un examen plus approfondi de cette carte fait apparaître cinq taches particulièrement remarquables présentant des résistivités supérieures à 140 ohms.m.

La tache la plus intéressante, située au centre de la figure 54, est limitée à l'est et au nord par un talus très probablement artificiel. La surface de cette anomalie, plus de 1200 mètres carrés, laisse supposer une construction importante; les résistivités élevées qui la caractérisent sont certainement l'indice de vestiges relativement bien conservés. On peut penser qu'il s'agit, pour une part du moins, de sols construits en matériaux durs: dallages, briques et peut-être mosaïques.

L'importance du site nous a semblé justifier des études ultérieures magnétiques et électriques.

La prospection magnétique n'a fait que confirmer les principaux résultats reportés sur la figure 54. Les anomalies individuellement ininterprétables se concentrent dans et en bordure immédiate des zones de haute résistivité.

La figure 55 reproduit des fragments de trois profils exécutés dans la tache résistante principale déjà mentionnée. A l'est de cette tache apparaît un mur massif actuellement caché sous un talus. Plus à l'ouest, des vestiges importants se succèdent sur plus de quarante mètres.

Pour expliquer le détail de ces anomalies, on peut avancer diverses hypothèses; seules des fouilles pourront trancher. A en croire les résultats de la géophysique, l'intérêt de ces fouilles ne fait aucun doute.

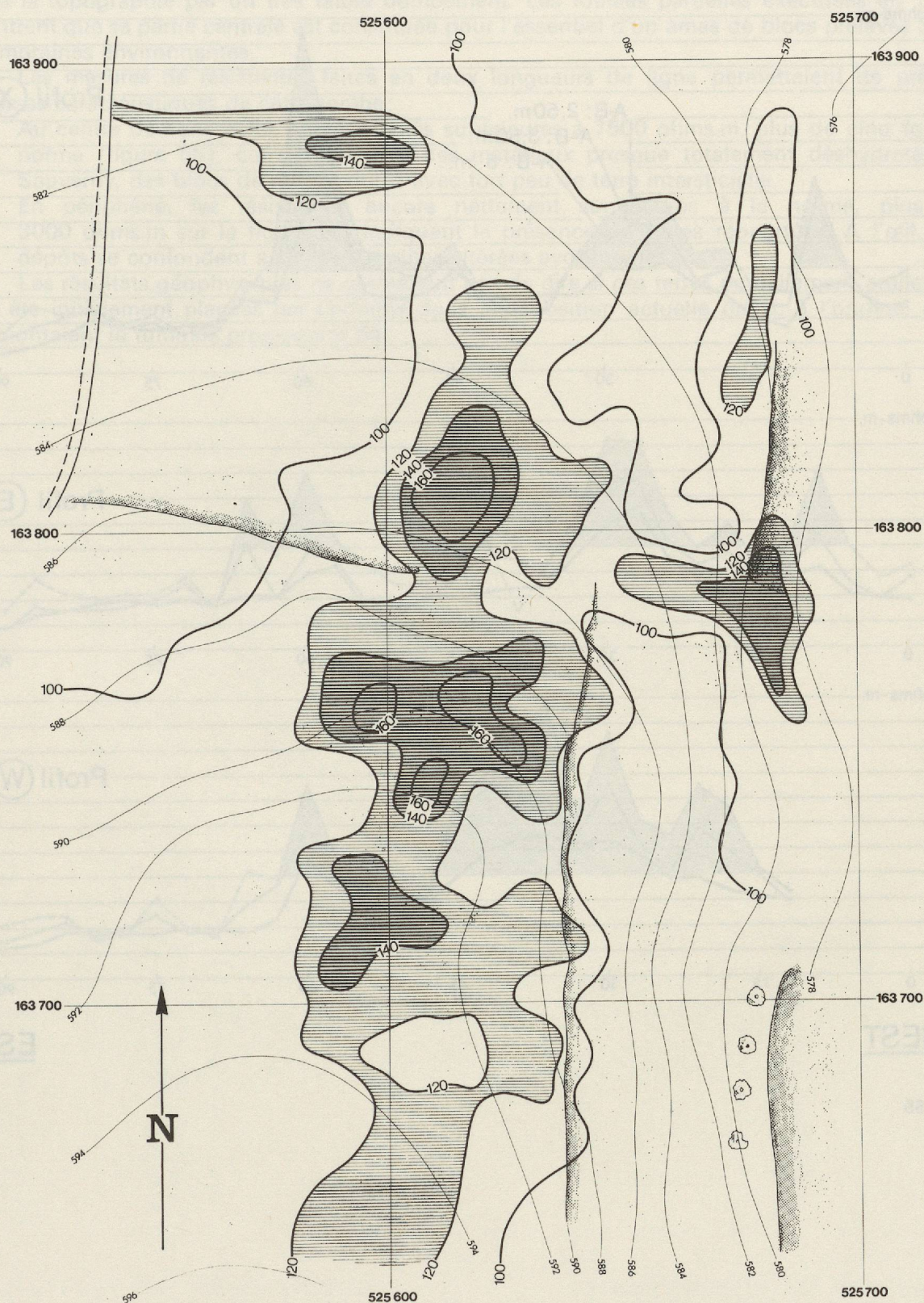
LA CHAUX ~ VILLA ROMAINE

RESISTIVITES ELECTRIQUES APPARENTES

A-B: 9 m.

Echelle : $\frac{10m}{\text{cm}}$

Valeurs en ohms-m.



INSTITUT DE GEOPHYSIQUE · UNIVERSITE DE LAUSANNE

D. Chapellier 1973

Étude géoélectrique générale et de détail (Figures 54 et 55)

LA CHAUX

Résistivités électriques apparentes

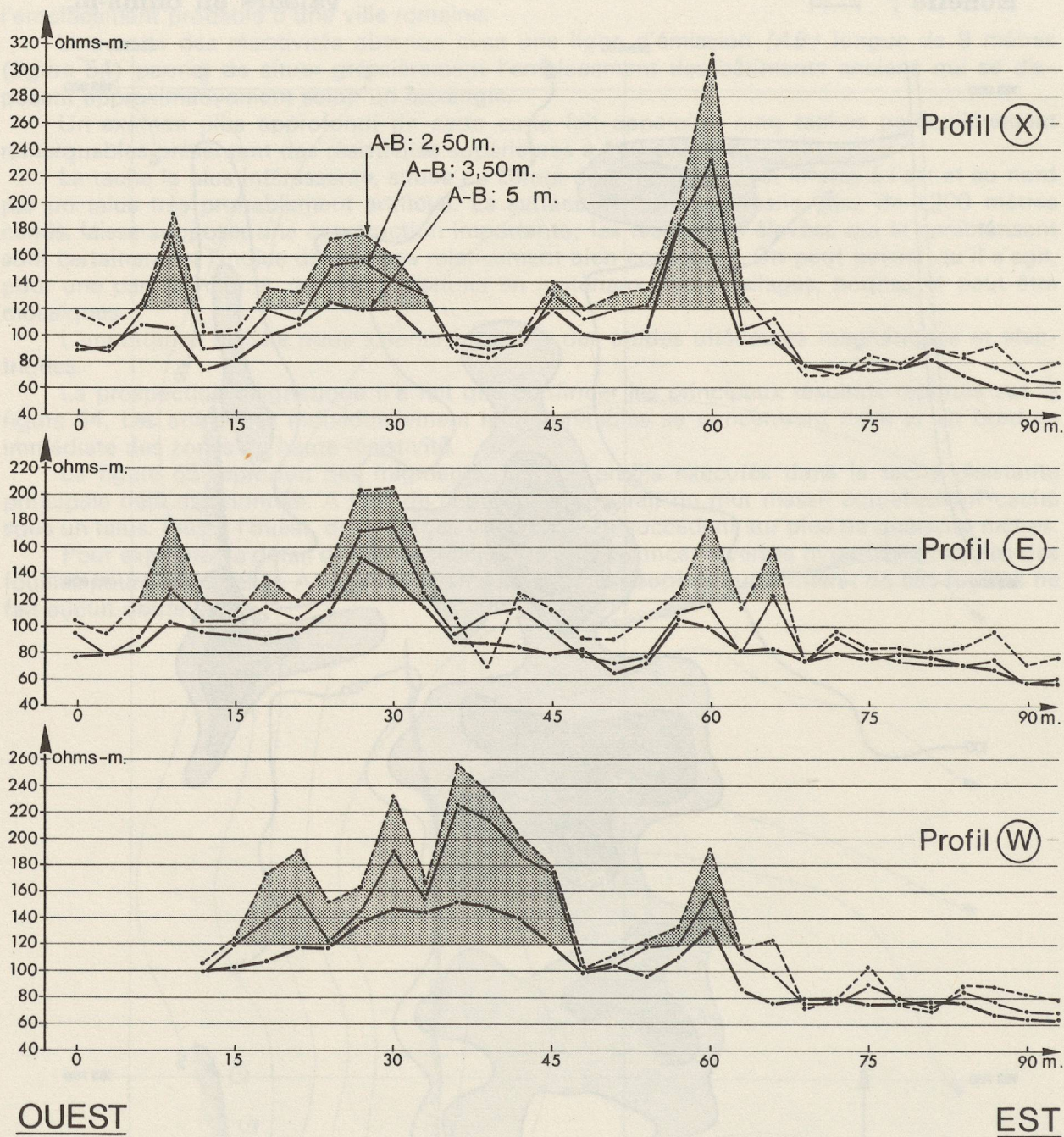


Figure 55

ÉTUDE GÉOÉLECTRIQUE DE DÉTAIL (Figures 56 et 57).

Tumulus de Sauverny - Genève - Suisse.

Ce tumulus signalé à notre attention par des archéologues de l'école de Genève se marque dans la topographie par un très faible bombement. Les fouilles partielles exécutées en 1973 montrent que sa partie centrale est constituée pour l'essentiel d'un amas de blocs prélevés dans les moraines environnantes.

Les mesures de résistivités faites en deux longueurs de ligne permettaient de prévoir diverses caractéristiques de cette tombe :

- Au centre de l'anomalie, les résistivités supérieures à 7500 ohms.m, plus de cinq fois la norme (figure 56), correspondent à des matériaux presque totalement déshydratés; à Sauverny, des blocs de roches dures avec fort peu de terre intersticielle.
- En périphérie, les résistivités encore nettement supérieures à la norme, plus de 3000 ohms.m sur la figure 56, indiquent la présence de terres rapportées. A l'œil, ces dépôts se confondent avec les moraines altérées avoisinantes.

Les résultats géophysiques ne permettent pas de dire si ces terres partiellement argileuses ont été initialement placées par l'homme dans leur position actuelle ou si, à l'origine, elles surmontaient le tumulus proprement dit.

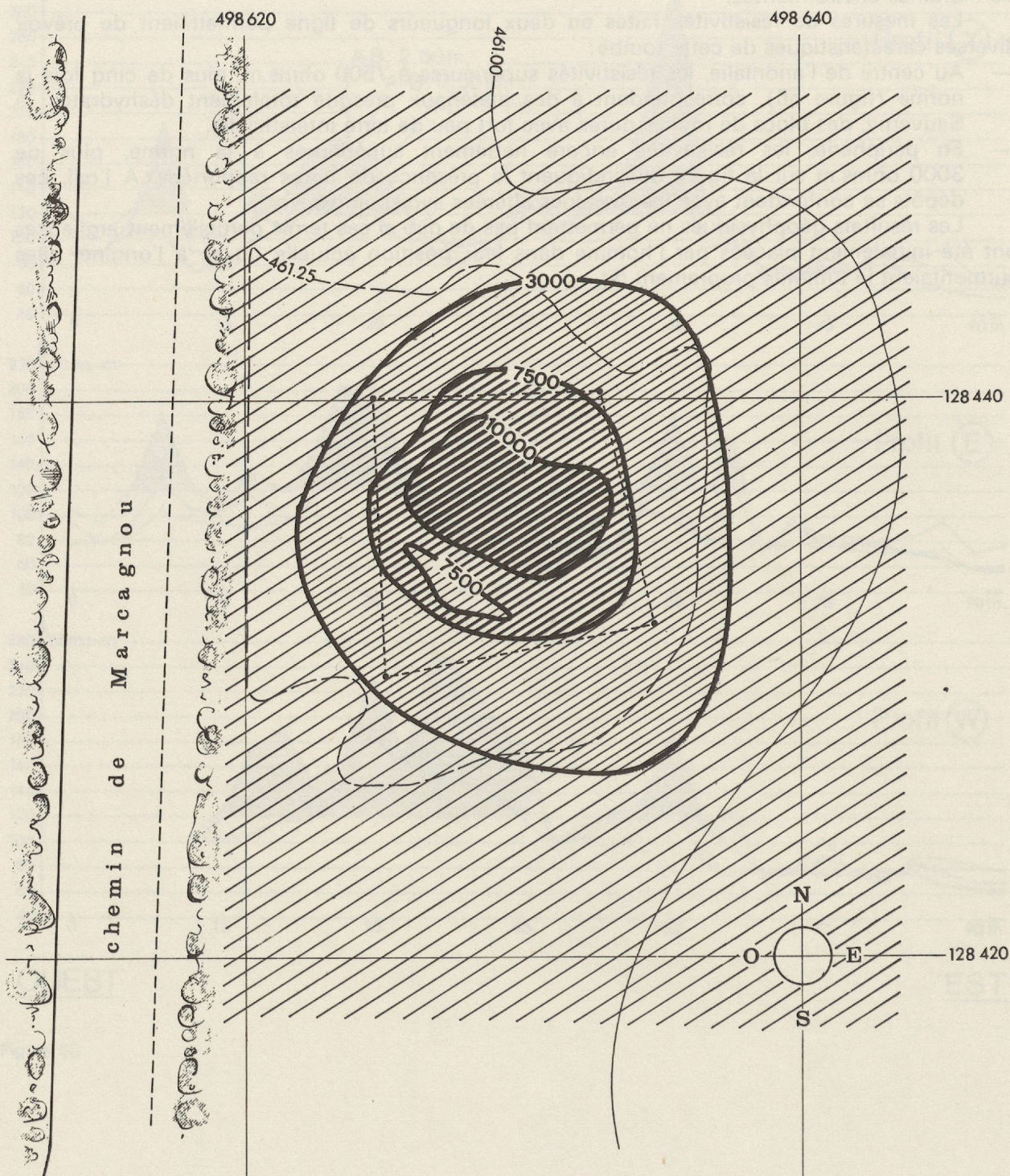
TUMULUS DE SAUVERNY

RESISTIVITES ELECTRIQUES APPARENTES

A-B: 3,50 m.

Echelle: 2,5m.

Valeurs en ohms-m.



INSTITUT DE GEOPHYSIQUE
UNIVERSITE DE LAUSANNE

D. Chapellier 1973

Étude géoélectrique de détail (Figures 56 et 57)

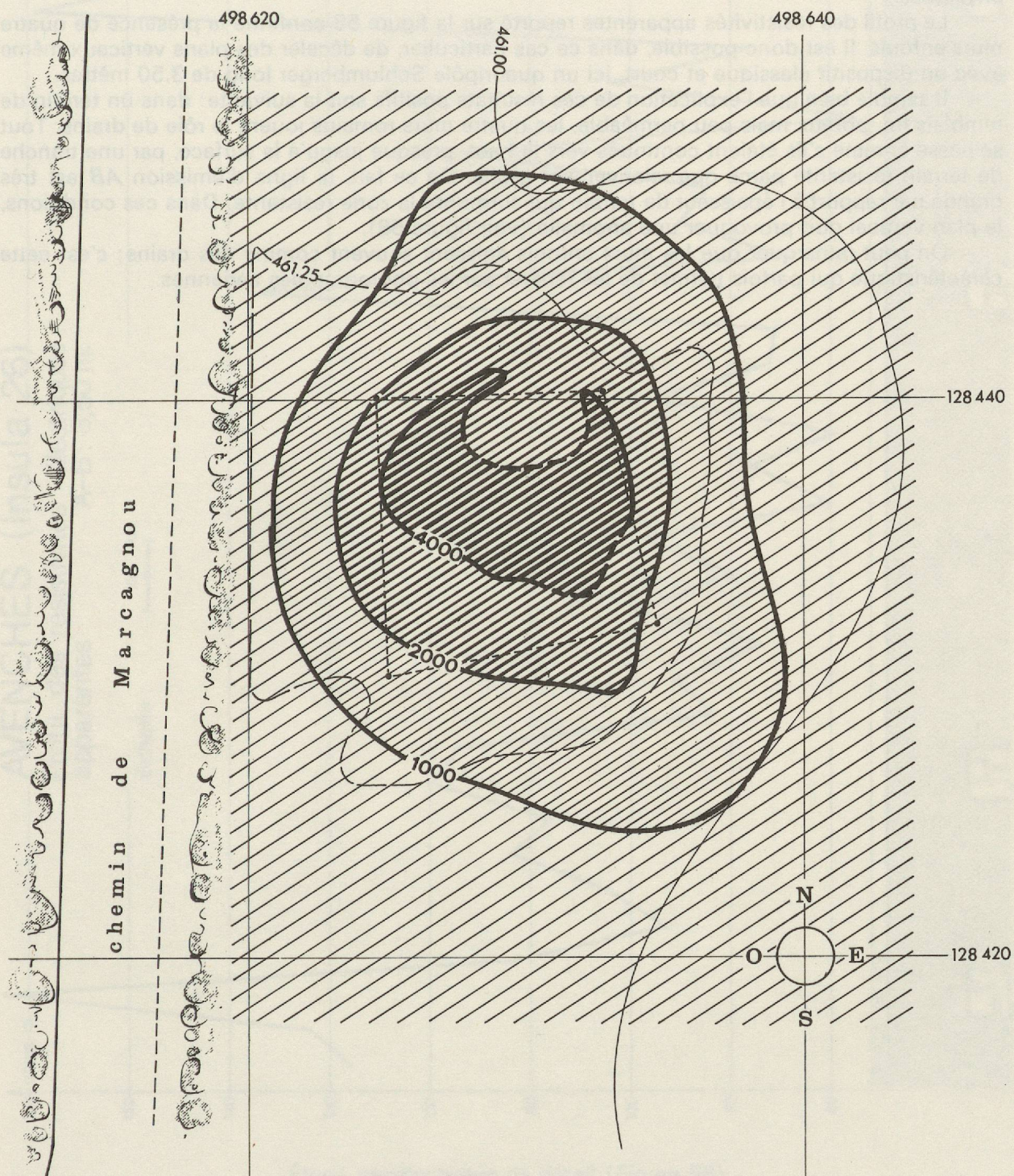
TUMULUS DE SAUVERNY

RESISTIVITES ELECTRIQUES APPARENTES

A-B: 5 m.

Echelle: 2,5m.

Valeurs en ohms-m.



INSTITUT DE GEOPHYSIQUE
UNIVERSITE DE LAUSANNE

D. Chapellier 1973

Figure 57

ÉTUDE GÉOÉLECTRIQUE DE DÉTAIL (Figure 58).

Insula 26 - Avenches - Vaud - Suisse.

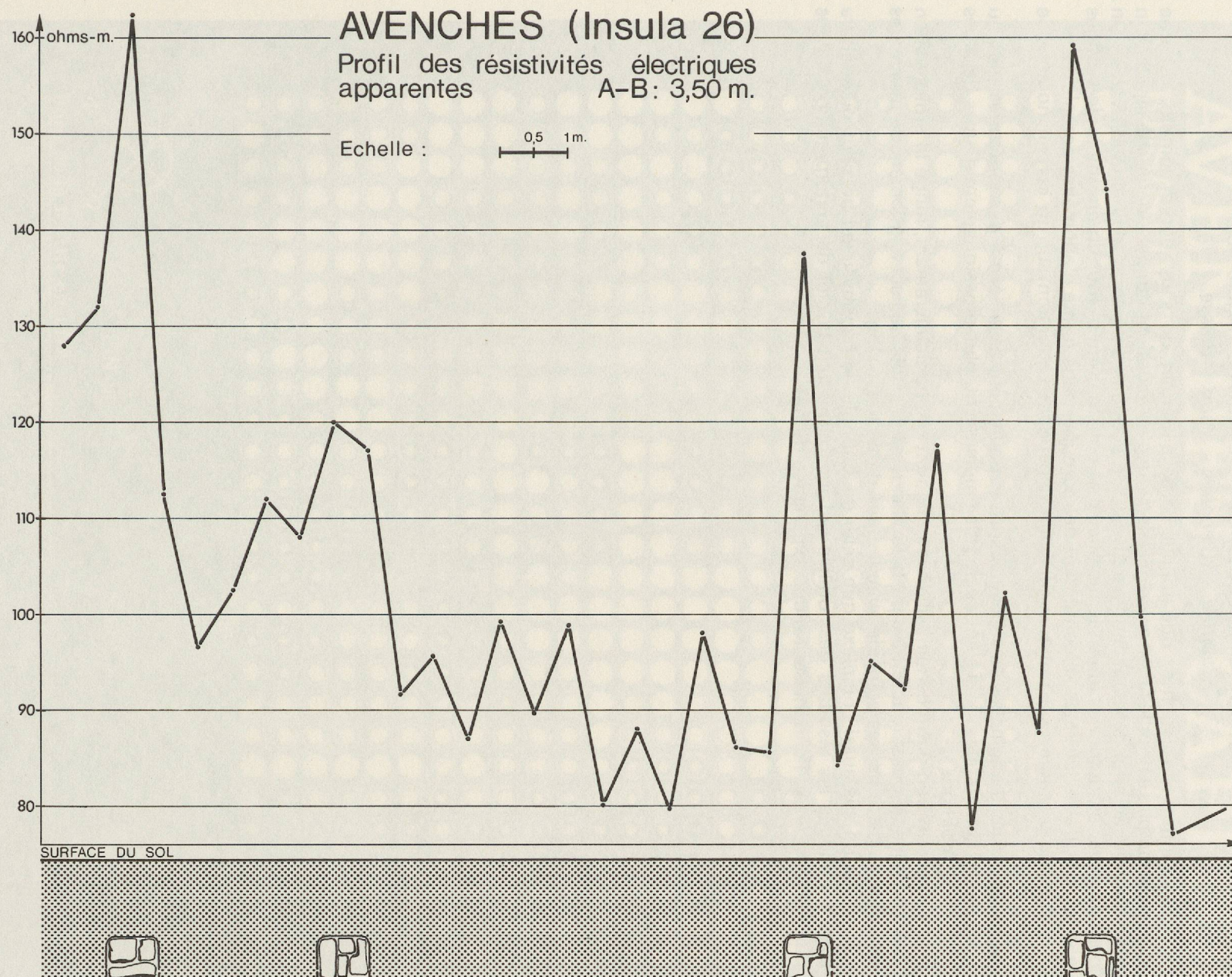
L'insula 26, fouillée il y a plusieurs années, a été remblayée après relevé du plan des vestiges romains.

Cette insula constitue donc un excellent terrain d'exercice où tester les méthodes géophysiques.

Le profil des résistivités apparentes reporté sur la figure 58 confirme la présence de quatre murs enfouis. Il est donc possible, dans ce cas particulier, de détecter des plans verticaux même avec un dispositif classique et court, ici un quadripôle Schlumberger long de 3,50 mètres.

Il semble bien que l'explication de ces résultats positifs soit la suivante: dans un terrain de remblais fin, poreux mais peu perméable, les quatre murs romains jouent le rôle de drains. Tout se passe comme s'ils étaient continués vers le haut, presque jusqu'à la surface, par une tranche de terrain résistante parce que relativement sèche. De ce fait, la ligne d'émission *AB* est très grande par rapport à l'épaisseur de terrain qui surmonte la zone résistante. Dans ces conditions, le plan vertical doit provoquer une anomalie (voir figure 58).

On peut remarquer que les murs enfouis agissent souvent comme des drains; c'est cette caractéristique qui parfois permet de les repérer sur les photographies aériennes.



ÉTUDE GÉOÉLECTRIQUE DE DÉTAIL (Figure 59).

Capitole - Avenches - Vaud - Suisse.

Le Capitole d'Avenches, une fouille partielle permet de s'en rendre compte, est une structure complexe dont les méthodes géophysiques ne sauraient donner une image simple. On peut observer en effet des murs à divers niveaux, d'époques différentes, d'orientation variée. On peut observer en outre des amas de matériaux de construction et tout un ensemble de vestiges que les mesures électriques se contentent de regrouper sous forme d'anomalies complexes.

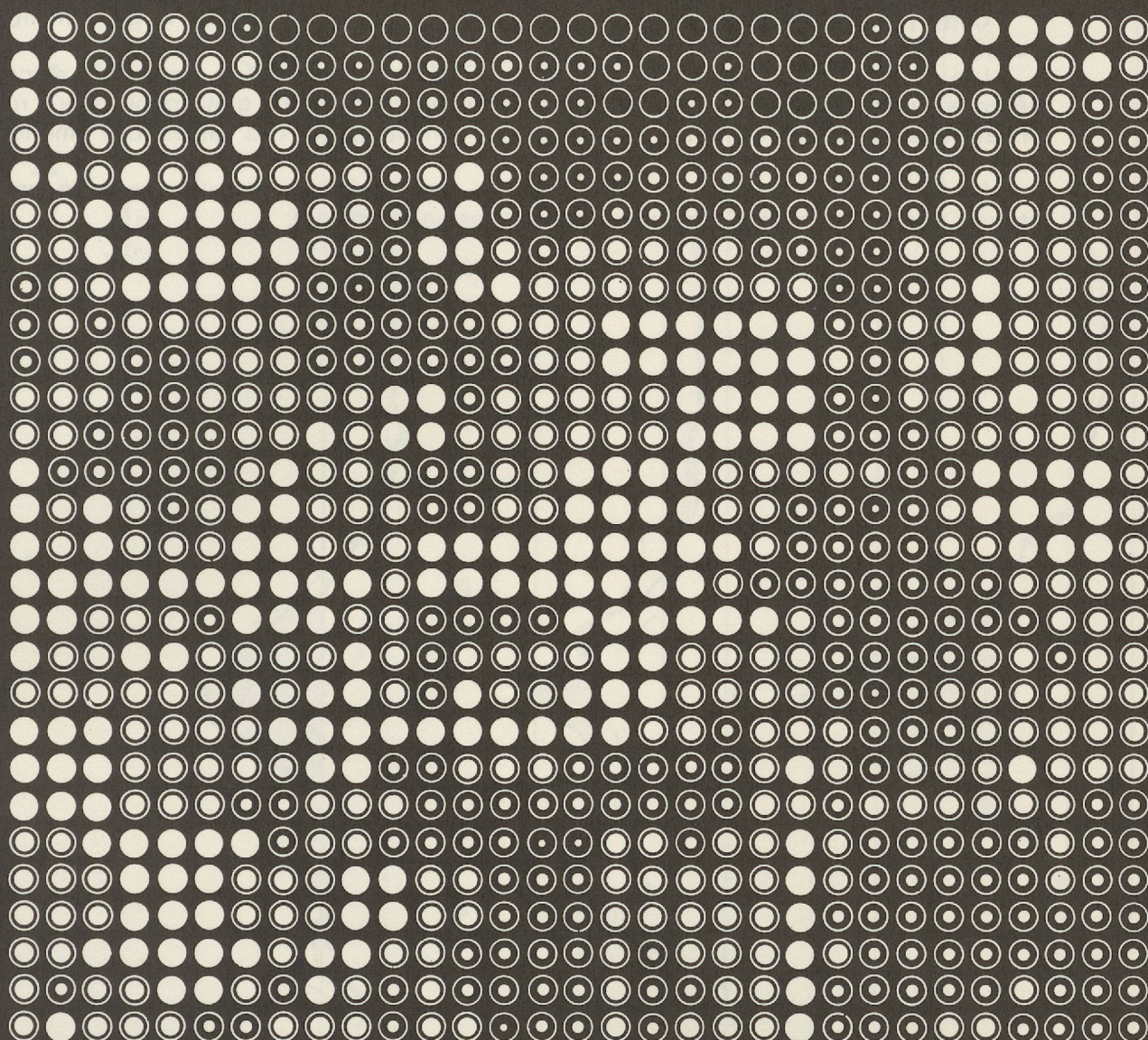
L'étude présentée sur la figure 59 attire cependant l'attention sur un certain nombre de points:

- Les plages d'anomalies très élevées sont certainement associées à des structures plus ou moins horizontales, qu'il s'agisse de sols empierrés ou plus prosaïquement d'amas de blocs de démolition.
- On observe en outre certains alignements dont un, particulièrement, longe la prolongation du mur sud-ouest rencontré dans la fouille. Il est possible que cet alignement de résistivités relativement basses coïncide avec le tracé d'une rue.

Dans un cas aussi complexe que celui du Capitole, le géophysicien ne peut qu'attendre avec impatience les résultats des fouilles qui lui fournissent la clef de l'interprétation de ses propres mesures et l'enrichissent d'une expérience de plus.

AVENCHES ~ CAPITOLE

RESISTIVITES ELECTRIQUES APPARENTES



□ R 36



□ N 28

□ N 36

Echelle: 10 m.

- < 100 ohms m.
- 100-150 ohms-m.
- 150-200 ohms-m.
- 200-250 ohms-m.
- > 250 ohms-m.

Bord de la fouille en 1972



INSTITUT DE GEOPHYSIQUE
UNIVERSITE DE LAUSANNE

D. Chapellier 1973

ÉTUDE GÉOÉLECTRIQUE GÉNÉRALE (Figures 60 et 61).

Route d'accès au port romain d'Avenches - Vaud - Suisse.

Les figures 60 et 61 montrent comment les mesures de résistivité ont permis de localiser avec précision la route romaine menant d'Aventicum à ce qui fut son port sur le lac de Morat.

Cette prospection, qui nous a été suggérée par le Professeur H. Bögli, constitue une première étape dans la recherche du port lui-même.

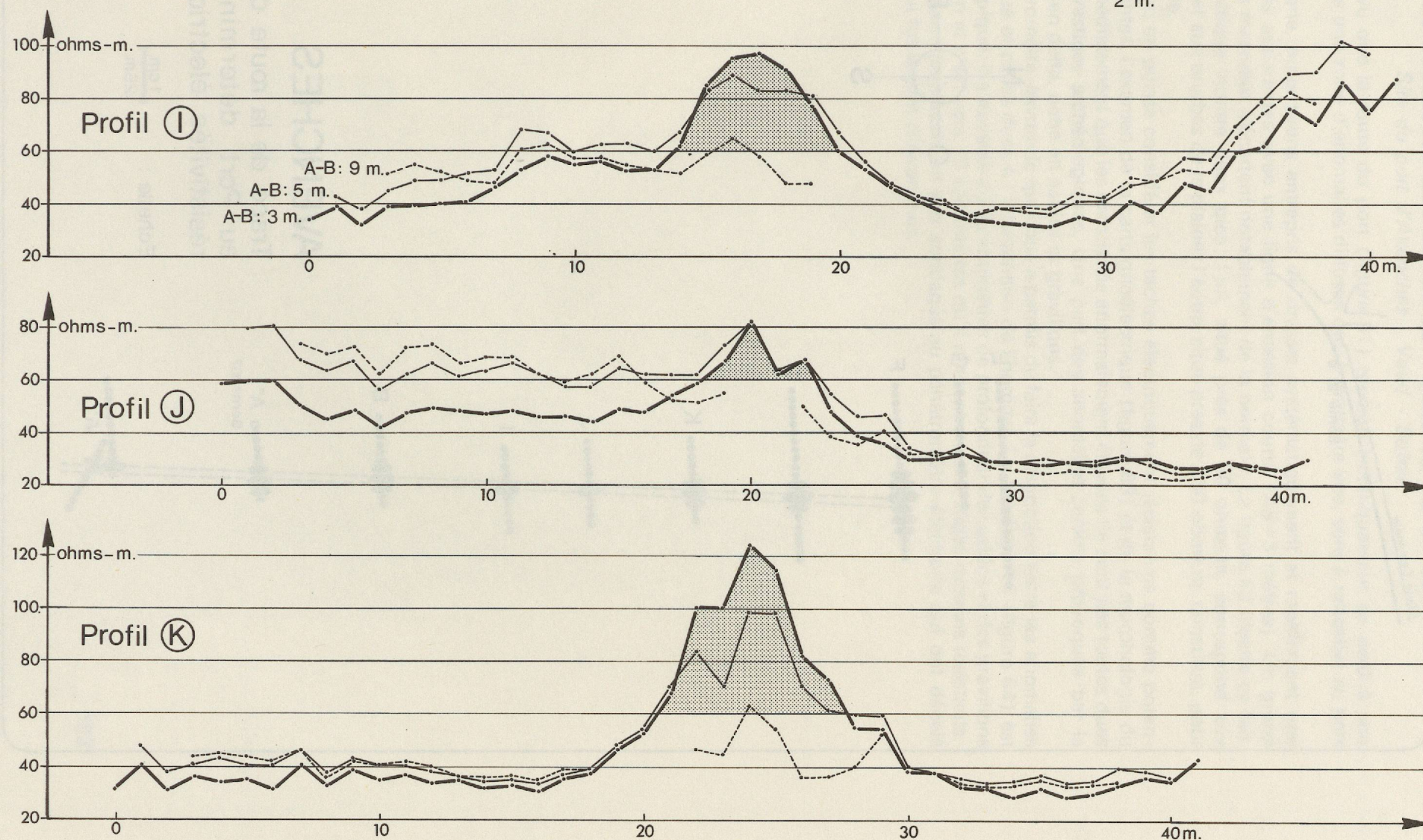
Les profils de résistivités i , j , et K , représentés en détail sur la figure 60, signalent la présence d'une épaisseur relativement forte de matériaux pierreux, graviers ou débris rocheux, formant une bande rectiligne à travers la plaine constituée par des sables, des limons et des tourbes.

La figure 61 schématise la répartition des résistivités sur chacun des onze profils de mesures. Sur cette figure, l'axe de la route se dessine clairement.

AVENCHES (Route d'accès au Port)

Profils des résistivités apparentes
au travers de la route romaine

Echelle : $\frac{1 \text{ cm.}}{2 \text{ m.}}$



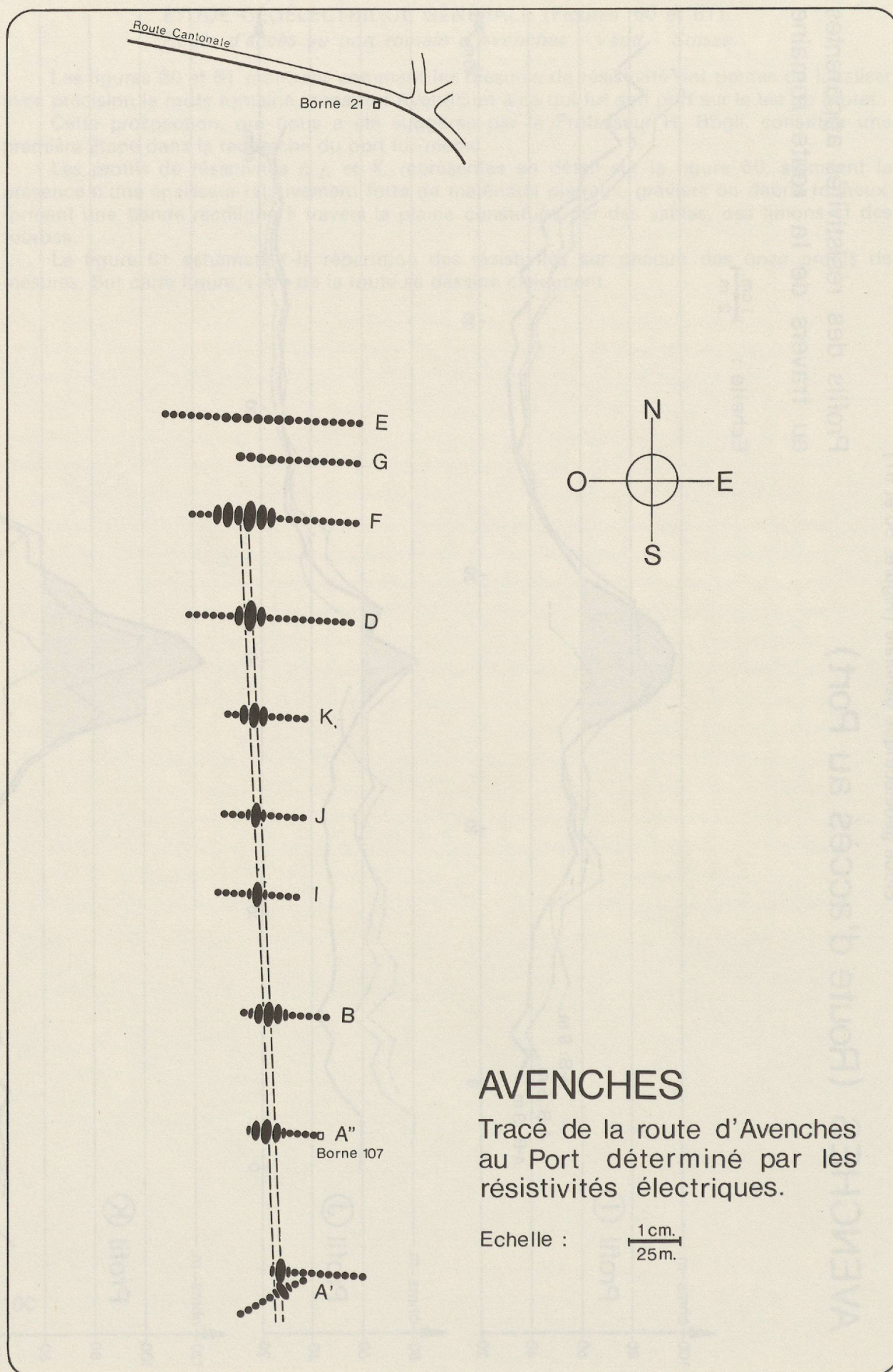


Figure 61

ÉTUDE GÉOÉLECTRIQUE GÉNÉRALE (Figures 62, 63, 64, 65).

Site du port d'Avenches - Vaud - Suisse.

Nous avons vu que la route du port (figure 61) repérée électriquement se perd à son extrémité nord dans une zone d'anomalies diffuses qui, à première vue, sont à rattacher au port lui-même.

Dans cette zone, nous avons entrepris de dresser systématiquement et rapidement une carte des résistivités apparentes avec une ligne d'émission courte ($AB=3$ mètres). Un grand nombre des valeurs mesurées s'écartent notablement de la normale. La figure 62 illustre ce fait. La répartition statistique montre deux pics; l'un, situé près de 50 ohms.m, correspond aux sables, aux limons et aux tourbes de la plaine; l'autre, situé près de 130 ohms.m, constitue, pour la région, l'anomalie.

Bien qu'à priori on puisse considérer les taches électriquement résistantes comme potentiellement intéressantes, l'examen de la carte géoélectrique (figure 63) et de la morphologie du terrain indique immédiatement que les résistivités anormalement élevées ne sont pas toutes dues à la présence de vestiges archéologiques. Une part des anomalies semble provoquée par la présence d'un ancien delta, riche en sables et gravillons.

C'est le pénétrromètre-électrode qui nous a permis de faire la distinction entre les anomalies d'origine géologique et celles dues à l'intervention de l'homme. Le sondage 14 (figure 64) est particulièrement typique, il a traversé à 25 centimètres de profondeur des sables et des gravillons du delta postromain et c'est vers 70 centimètres qu'il rencontre les vestiges romains résistants.

La figure 65 fixe l'emplacement des sondages au pénétrromètre-électrode qui ont décelé des restes de ce qui fut le port d'Avenches.

AVENCHES Port

Répartition statistique des résistivités électriques apparentes

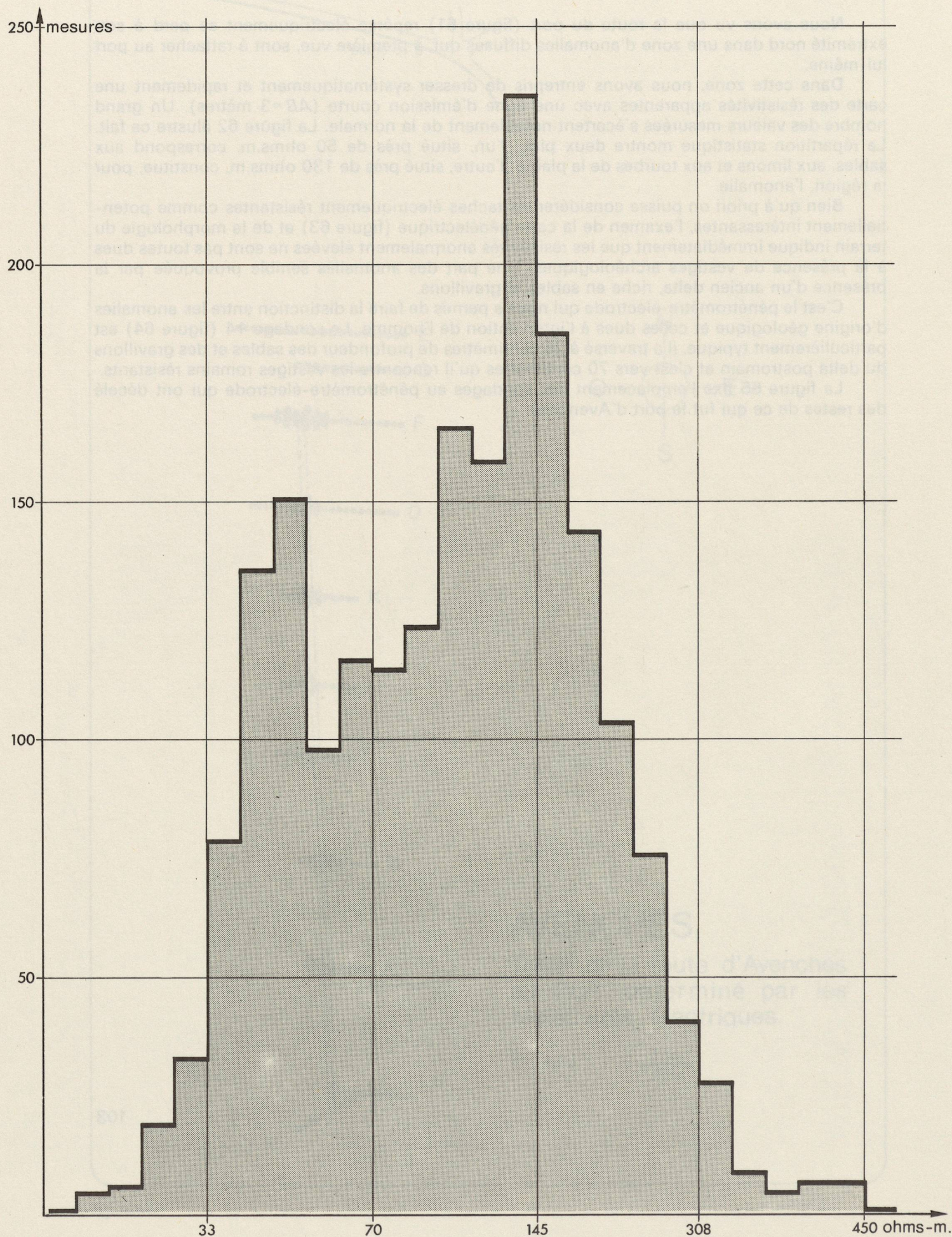
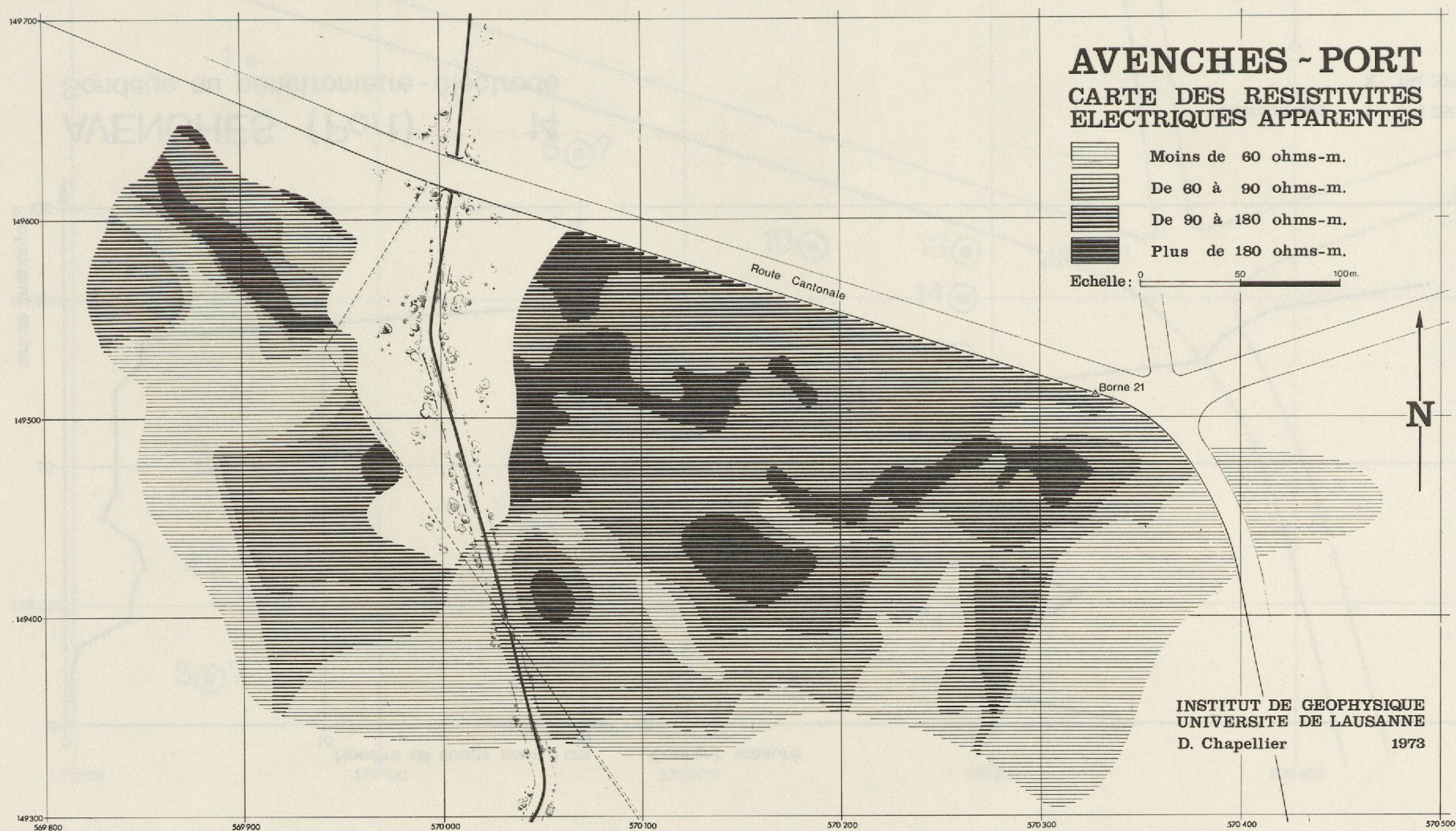
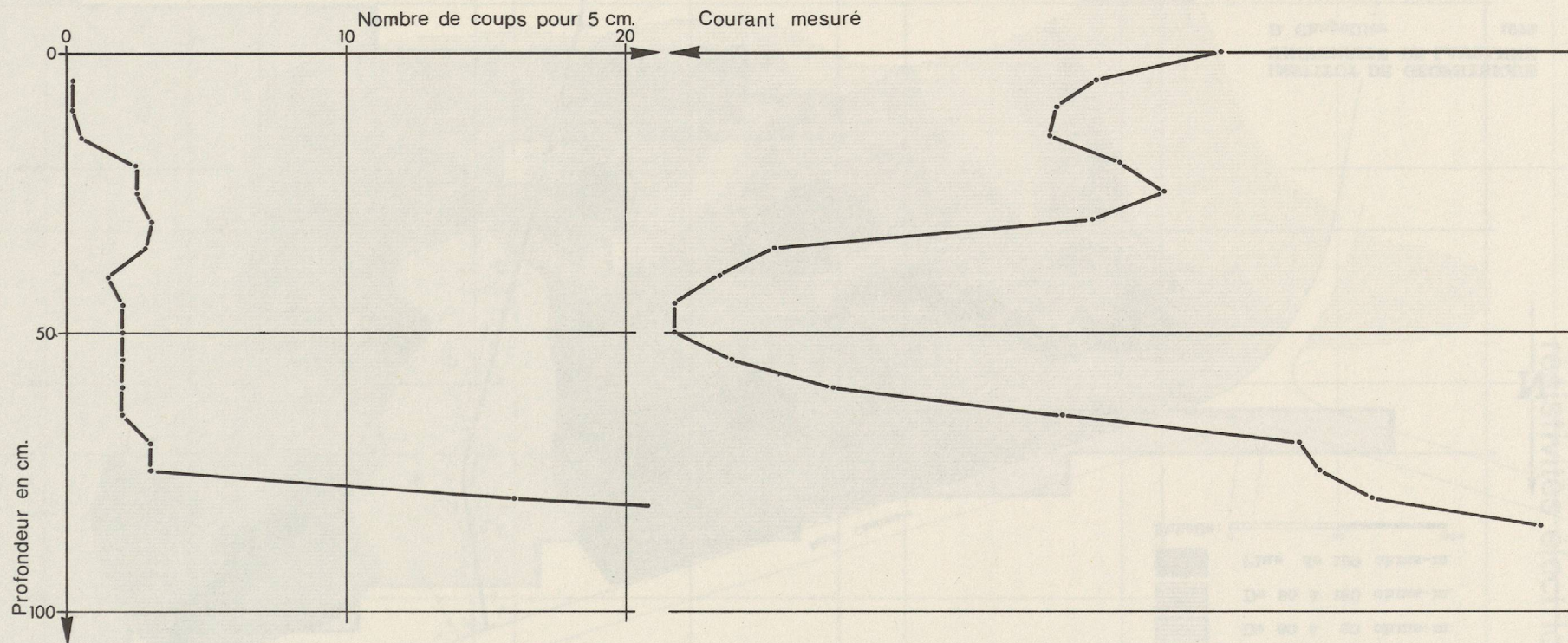


Figure 62

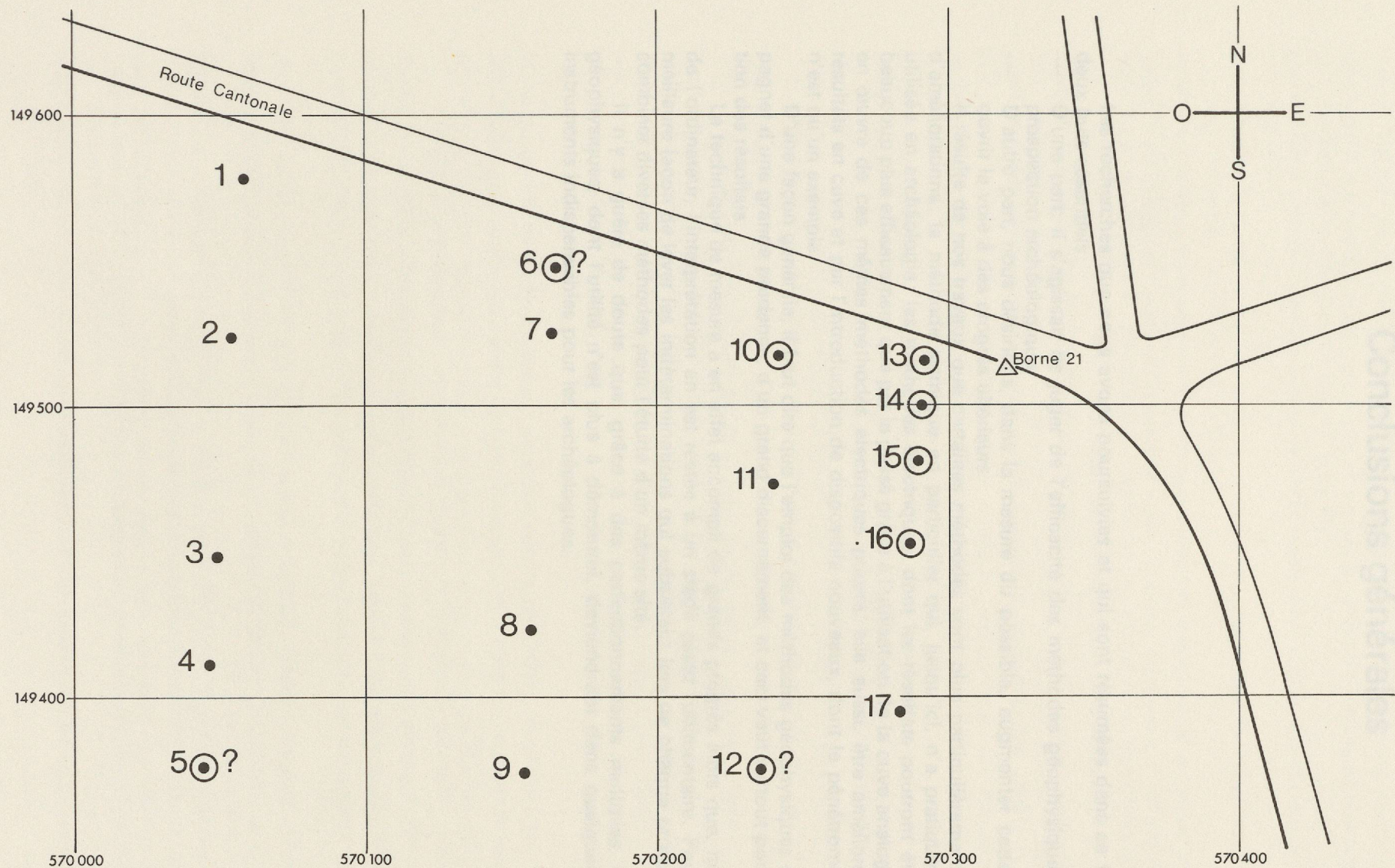
Figure 63





AVENCHES (Port) 14
Sondage au pénétromètre - électrode

Coordonnées : Y : 570 250
X : 194 375



AVENCHES (Port)

Emplacement des pénétrromètres

Conclusions générales

Les recherches que nous avons poursuivies et qui sont résumées dans ce travail avaient deux buts essentiels:

- D'une part, il s'agissait de juger de l'efficacité des méthodes géophysiques utilisées en prospection archéologique.
- D'autre part, nous désirions, dans la mesure du possible, augmenter cette efficacité et ouvrir la voie à des progrès ultérieurs.

Il résulte de nos travaux que certaines méthodes sont plus particulièrement susceptibles d'améliorations: la méthode sismique en particulier qui, jusqu'ici, n'a pratiquement pas été utilisée en archéologie; les méthodes électriques, dont les résultats pourront être interprétés beaucoup plus efficacement que par le passé grâce à l'utilisation de la cuve analogique. La mise en œuvre de ces mêmes méthodes électriques pourra, elle aussi, être améliorée au vu des résultats en cuve et par l'introduction de dispositifs nouveaux, dont le pénétrömètre-électrode n'est qu'un exemple.

D'une façon générale, il faut dire que l'emploi des méthodes géophysiques doit s'accompagner d'une grande prudence, d'un grand discernement, et ceci vaut surtout pour l'interprétation des résultats.

La technique de mesure a en effet accompli de grands progrès alors que, malgré l'emploi de l'ordinateur, l'interprétation en est restée à un stade assez rudimentaire. Pour l'instant, la meilleure façon de lever les indéterminations qui subsistent lors de chaque prospection est de combiner diverses méthodes pour l'étude d'un même site.

Il n'y a guère de doute que, grâce à des perfectionnements multiples, les méthodes géophysiques, dont l'utilité n'est plus à démontrer, deviendront dans quelques années des instruments indispensables pour les archéologues.

Bibliographie

Généralités

- ARCHEOLOGIA (1973), L'archéologie aérienne: vision fantastique du passé. Document N° 1. Dijon. France. 138 pp.
- HEILAND C.A. (1940), Geophysical exploration. Hafner. New York.
- HESSE A. (1966), Prospections géophysiques à faible profondeur. Applications à l'archéologie. Dunod. Paris. 149 pp.
- LASFARGUES P. (1966), Magnétisme en géologie et prospection magnétique au sol. Masson. Paris. 157 pp.
- LININGTON R.E. (1970), Techniques used in archaeological field surveys. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A. 269. 89-108.
- MERKLER G. (1973), Aspects concernant les résultats des mesures géophysiques de détail exécutées pour détecter des objets archéologiques dans les zones de «Pacutul Lui Soare» et de la cité d'Histria. Revue roumaine de géologie, géophysique et géographie. Tome 17 (1), 103-122.
- NETTLETON L.L. (1940), Geophysical prospecting for oil. Mc Graw-Hill. New York.
- RAINEY F. and RALPH E.K. (1966), Archaeology and its new technology. Science 153, 1481-1491.
- ROTHE E. et ROTHE J.P. (1952), Prospection géophysique. Gauthier-Villars. Paris. Vol 2, 185-486.
- SCHWARZ G.T. (1965), Archäologen an der Arbeit. Francke Verlag. Bern München. 200 pp.
- SEGUIN K.M. (1971), La géophysique et les propriétés physiques des roches. Les presses de l'Université Laval. Québec. 562 pp.
- UNESCO (1970), Musées et recherches sur le terrain. Unesco. Paris 180 pp.

Magnétisme

- AITKEN M.J. and ALLDRED J.C. (1964), A simulator trainer for magnetic prospection. Archaeometry, 7.
- ALLDRED J.C. and AITKEN M.J. (1966), A fluxgate gradiometer for archaeological surveying. Prospezioni Archeologiche, 1, 53-60.
- AITKEN M.J. (1959), Magnetic prospecting: the proton magnetometer. Archaeometry, 2, 40-42.
- AITKEN M.J. (1960), Magnetic prospecting: the proton gradiometer. Archaeometry, 3, 38-40.
- AITKEN M.J. (1961), Physics and archaeology. Interscience. New York London. 173 pp.
- AITKEN M.J. and TITE M.S. (1962), Proton magnetometer surveying on some British Hill-Forts. Archaeometry, 5, 126-134.
- AITKEN M.J. (1963), Magnetic Location. Science in archaeology. Thames and Hudson. Bristol. 555-568.
- AITKEN M.J. and ALLDRED J.C. (1966), Prediction of magnetic anomalies by means of a simulator. Prospezioni archeologiche, 1, 67-72.
- BOYER D. and PHAM VAN NGOC. (1971), A continuous measurement technique for detailed magnetic prospecting. Application to an archaeological site. Prospezioni archeologiche, 6, 43-52.
- LE BORGNE E. (1965), Les propriétés magnétiques du sol. Application à la prospection des sites archéologiques. Archeo-Physika, Band 15 der Beihefte der Bonner Jahrbücher. Böhlau Verlag. Köln. 1-20.
- LERICI C.M. (1961), Archaeological surveys with the proton magnetometer in Italy. Archaeometry, 4, 76-82.

- LININGTON R.E. (1964), The use of simplified anomalies in magnetic surveying. *Archaeometry*, 7, 3-14.
- LININGTON R.E. (1966), Further examples of the use of simplified theoretical anomalies in magnetic surveying. *Prospezioni archeologiche*, 1, 73-80.
- LININGTON R.E. (1966), An extension to the use of simplified anomalies magnetic survey. *Archaeometry*, 9, 51-60.
- LININGTON R.E. (1969), The Rome computer system for treating archaeological survey results — second part. *Prospezioni archeologiche*, 4, 9-58.
- RALPH E.K. (1964), Comparison of a proton and a rubidium magnetometer for archaeological prospecting. *Archaeometry*, 7, 20-27.
- RALPH E.K., MORRISON F., O'BRIEN D.P. (1968), Archaeological surveying utilizing a high sensitivity difference magnetometer. *Geoexploration*, 6 (2), 109-122.
- NAGATA T. (1961), Rock magnetism. Maruzen company LTD. 350 pp.
- SCOLLAR I. (1965), A contribution to magnetic prospecting in archaeology. *Archeo-Physika*, Band 15 der Beihefte der Bonner Jahrbücher. Böhlau Verlag Köln. 21-92.
- SCOLLAR I. (1966), Recent developments in magnetic prospecting in the Rhineland. *Prospezioni archeologiche*, 1, 43-51.
- SCOLLAR I. (1969), A program for the simulation of magnetic anomalies of archaeological origin in a computer. *Prospezioni archeologiche*, 4, 59-84.
- SCOLLAR I. and KRÜCKEBERG F. (1966), Computer treatment of magnetic measurements from archaeological sites. *Archaeometry*, 9, 61-71.
- THELLIER E. (1938), Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques. *Annales I.P.G.* Paris. 16 pp.
- THELLIER E. (1951), Propriétés magnétiques des terres cuites et des roches. *J. de Physique*, t. XII. 205-218.
- THELLIER E. et THELLIER O. (1959), Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Annales de géophysique*, 15, 285-376.
- VACQUIER V., STEENLAND N.C., HENDERSON R.G. and ZIETZ I. (1951), Interpretation of aeromagnetic maps. *Geol. Soc. Amer. Memoir* 47.
- WILCOCK J.D. (1968), A comparison of computer graphix techniques for the automatic reduction of archaeomagnetic field observations. *Prospezioni archeologiche*, 3, 87-90.

Sismique

- BURKE K.B.S. (1973), Seismic techniques in exploration of Quaternary deposit. *Geoexploration*, 11 (4), 207-233.
- CARSON H. (1962), A seismic survey at Harpers Ferry. *Archaeometry*, 5, 119-122.
- SLOTNICK M.M. (1959), Lessons in seismic computing. Richard A Geyer Ed. Houston Texas. 266 pp.
- SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS. (1967), Seismic refraction prospecting. Tulsa. Oklahoma.

Gravimétrie

- GOGUEL J. (1963), La gravimétrie. P.U.F. Collection « Que sais-je », N° 1030.
- NEUMANN R. (1967), La gravimétrie de haute précision. Application aux recherches de cavités. *Geophysical prospecting*, XV, 1.
- NEUMANN R. (1973), Recherche de cavités par prospection gravimétrique. Symposium national. Service Géologique Français. Tome 1.
- LININGTON R.E. (1966), Test use of a gravimeter on etruscan chamber tombs at Cerveteri. *Prospezioni archeologiche*, 1, 37-41.

Électricité

- APPARAO A., ROY A. and MALLICK K. (1969), Resistivity model experiments. *Geoexploration*, 7, 45-54.
- APPARAO A. and ROY A. (1971), Resistivity model experiments, 2. *Geoexploration*, 9, (4), 195-205.
- ASPINALL A. and LYMAN J. (1968), Induced polarization as a technique for archaeological surveying. *Prospezioni archeologiche*, 3, 91-93.
- ASTROM P. (1967), Electrical prospecting at Calatia, Caserta. *Prospezioni archeologiche*, 2, 81-83.
- ATKINSON R.J.C. (1962), Méthodes électriques de prospection en archéologie. A. Laming. La découverte du passé. Paris 59-70.
- BRIZZOLARI E. (1972), Risultati di prove su modelli. Profili di resistività apparente per corpi parallelepipedi resistivi immersi in un mezzo omogeneo isotropo conduttivo. *Annali di Geofisica*, XXV, 615-626.
- BRAISSANT P. et CHAPPELLIER D. (1971), Le potentiomètre Braissant. *Prospezioni archeologiche*, 6, 25-27.
- CARABELLI E. (1967), Ricerca sperimentale dei dispositivi più adatti alla prospezione elettrica di cavità sotterranee. *Prospezioni archeologiche*, 2, 9-21.
- CLARK A.J. (1963), Resistivity surveying. *Science in Archaeology*. Bristol. Thames and Hudson. 569-581.
- CLARK A.J. (1968), A square array for resistivity surveying. *Prospezioni archeologiche*, 3, 111-114.
- EVJEN H.M. (1938), Depth factors and resolving power of electrical measurements. *Geophysics*, 3, 78-95.
- FISCH W. (1946), Goelektrische Untersuchungsmethoden im Dienste der Wasserversorgung. Schweizerischer Verein von Gas und Wasserfachmännern, 5, Zürich.
- FROLICH R.K. (1967), The depth penetration of dipole arrays compared with the Schlumberger arrangement. *Geoexploration*, 5, (4).
- CAGNIARD L. et NEALE R.N. (1957), Technique nouvelle de modèles réduits pour la prospection électrique. *Geophysical prospecting*, 5.
- GONDSWAARD W. (1957), On the effect of the tank wall material in geoelectrical model experiments. *Geophysical prospecting*, 5.
- GRANDINETTI M. (1968), Risultati di prove su modelli relative ad una nuova disposizione elettrodica per la ricerca di corpi di limitate dimensioni. *Bolletino di Geofisica teorica ed applicata*, X (39).
- HESSE A. (1966), The importance of climatologic observations in archaeological prospecting. *Prospezioni archeologiche*, 1, 11-13.
- KELLER V.G. and FRISCHKNECHT F.C. (1966), Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press. New York. London. Paris. 517 pp.
- KUNETZ G. (1966), Principles of direct current resistivity prospecting. Borntraeger. Berlin. 106 pp.
- LASFARGUES P. (1957), Prospection électrique par courants continus. Masson Ed. Paris. 290 pp.
- MANHART T.A. (1937), Model tank experiments and methods for interpretation of resistivity curves. *Colorado School of Mines Quart.* 32, (1), 139-168.
- MEYER DE STADELHOFEN C., CHAPPELLIER D., BRAISSANT P. (1974), Le pénétrömètre-électrode, un nouveau moyen d'investigation du sous-sol. *Bulletin technique de la Suisse romande*. Lausanne. 9, 173-178.
- MUSKAT M. and EVINGER H.H. (1941), Current penetration in direct current prospecting. *Geophysics*, 6, 397-427.
- NAIDU P.S. (1966), Theoretical analysis of apparent resistivity over a dyke of arbitrary shape. *Geophysical prospecting*, 14 (2), 168-183.
- NAIDU P.S. (1966), Apparent resistivity over thin dipping dyke. *Geoexploration*, 4 (1), 25-36.
- PALMER L.S. (1960), Geoelectrical surveying of archaeological sites. *Proc. Prehist. Soc.*, XXVI, 64-75.
- PARASNIS D.S. (1964), Long horizontal cylindrical ore body at arbitrary depth in the fields of two linear current electrodes. *Geophysical prospecting*, 12 (4), 457-487.
- POLDINI E. (1947), La prospection électrique du sous-sol. F. Rouge Ed. Lausanne, 120 pp.

- PESCHEL G. (1967), Geophysical investigations on early medieval defense installation. *Geophysik und Geologie*, 11, 91-103.
- PESCHEL G. (1967), A new favourable combination of resistivity sounding and profiling in archaeological surveying. *Prospezioni archeologiche*, 2, 23-28.
- RAKESH KUMAR (1973), Resistivity types curves over outcropping vertical dyke. I. Geophysical prospecting, 21, 560-578.
- RAKESH KUMAR (1973), Resistivity types sphere curves over outcropping vertical dyke. II. Geophysical prospecting, 21 (4), 615-625.
- ROY A. and APPARAO A. (1971), Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, 36 (5), 943-959.
- ROY A. (1972), Depth of investigation in wenner, three electrode and dipole-dipole, DC resistivity methods. *Geophysical prospecting* 20, 329-340.
- SANGLERAT G. (1972), The penetrometer and soil exploration. Elsevier Publishing company. Amsterdam. London. New York. 464 pp.
- SCHWARZ G.T. (1961), The «Zirkelsonde» a new technique for resistivity surveying. *Archaeometry*, 4, 67-70.
- TOPFER K.D. (1972), Schlumberger measurements over undulating structure (model structures). *Geoexploration*, 10 (1), 41-51.
- VAN NOSTRAND R.G. (1953), Limitations on resistivity methods as inferred from the buried sphere problem. *Geophysics*, 18 (2), 423-433.

Électromagnétisme

- COLANI A. (1966), A new method and wide range apparatus for locating metal objects in the ground, fresh water and salt water. *Prospezioni archeologiche*, 1, 15-23.
- FOSTER E.I. (1968), Further developments of the pulsed induction metal detector. *Prospezioni archeologiche*, 3, 95-99.
- HOWELL M. (1966), A soil conductivity meter. *Archaeometry*, 9.
- HOWELL M. (1968), The soil conductivity anomaly detector (SCM) in archaeological prospection. *Prospezioni archeologiche*, 3, 101-104.
- LAMING A. (1962), Le détecteur électromagnétique. A. Laming. La découverte du passé. Paris. 71-75.
- RENIMEL S. et TABBAGH A. (1973), Un atout pour la prospection archéologique: la détection électromagnétique. *La recherche*, 30, 82-84.
- TITE M.S. and MULLINS C. (1969), Electromagnetic prospecting: a preliminary investigation. *Prospezioni archeologiche*, 4, 95-102.
- TITE M.S. and MULLINS C. (1970), Electromagnetic prospecting on archaeological sites using a soil conductivity meter. *Archaeometry*, 12, 97-104.

Exemples de prospection

- BÖGLI H. (1967 et suivantes), Bulletin de l'Association Pro Aventico.
- BÖGLI H. (1970), Aventicum. Collection Trésors de mon pays. N° 134.
- EGLOFF M. (1966/1967), Les gisements préhistoriques de Baulmes (Vaud). *Annuaire de la Société suisse de préhistoire et d'archéologie*, 53, 7-13, Schwabe Verlag, Basel.
- PAUNIER D. (1971), L'établissement gallo-romain de Bernex (GE). *Annuaire de la Société suisse de préhistoire et d'archéologie*, 56, Schwabe Verlag, Basel.
- JOURDAN R. et PAUNIER D. (1967/1968), Villa romaine de Mornex. Historique et méthode de travail. *Polyphème*, 13, 29-31.
- PELET P.L. (1973), Une industrie méconnue, Fer, Charbon, Acier, dans le Pays de Vaud. *Bibliothèque historique vaudoise*, 49 Lausanne, 272 pp.

