

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 100 (1974)
Heft: 9

Artikel: Le pénétromètre-électrode: un nouveau moyen d'investigation du sous-sol
Autor: Meyer de Stadelhofen, C. / Chapellier, D. / Braissant, P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-72102>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.02.2025

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

Le pénétromètre-électrode : un nouveau moyen d'investigation du sous-sol

par C. MEYER DE STADELHOFEN, D. CHAPPELLIER, P. BRAISSANT

I. Introduction

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 ordinaire en pénétromètre-électrode, il est possible d'améliorer de beaucoup la précision des renseignements collectés. Les transformations nécessaires sont simples et n'entraînent pas de ralentissement des forages.

Très schématiquement, on peut décrire le pénétromètre-électrode de la façon suivante (fig. 1) :

Une source de courant (V), maintenue à une tension constante, alimente d'une part une électrode fixe et d'autre part, à travers un galvanomètre (I), la tête du pénétromètre. Ce dispositif permet de faire passer un courant dans le sol et de mesurer l'intensité de ce courant. Cette mesure fournit immédiatement une image des valeurs relatives des résistivités électriques des couches successivement traversées par le pénétromètre. Nous verrons ultérieurement qu'elle peut aussi fournir les résistivités vraies de ces couches.

Avant de décrire plus en détail la méthode esquissée brièvement ci-dessus, examinons quelques résultats expérimentaux.

II. Résultats expérimentaux

1. Cas d'une nappe polluée par du mazout

Un aquifère constitué par une couche de sable comprise entre deux niveaux de limons argileux a été partiellement envahi par du mazout. Avant d'entreprendre quoi que ce soit pour sauver la nappe, il est indispensable de localiser rapidement la zone polluée (fig. 2).

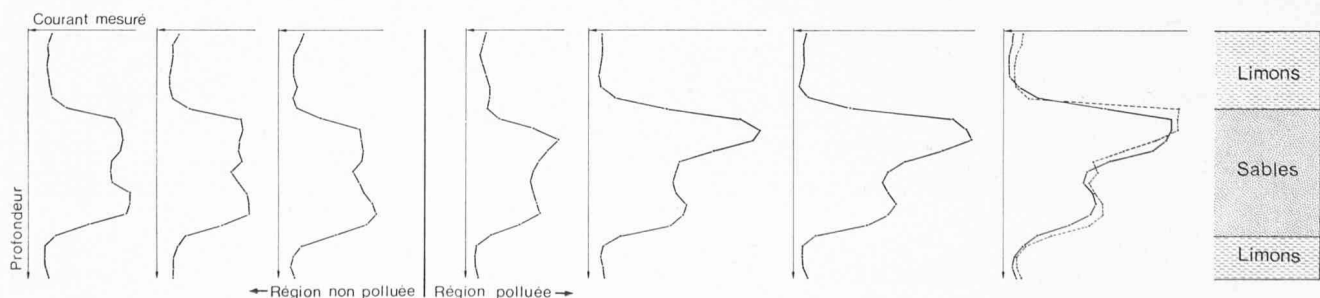


Fig. 2. — Influence du mazout envahissant un aquifère sur le passage du courant électrique.

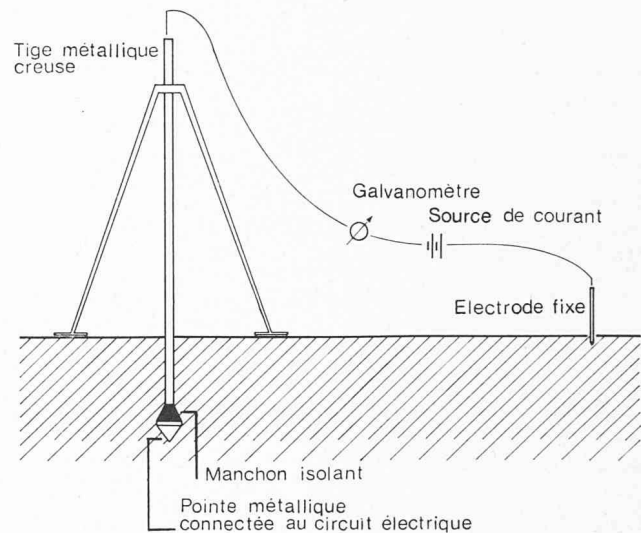


Fig. 1. — Schéma de principe du pénétromètre-électrode.

Dans la zone polluée, le mazout, électriquement résistant, provoque une chute spectaculaire de l'intensité du courant.

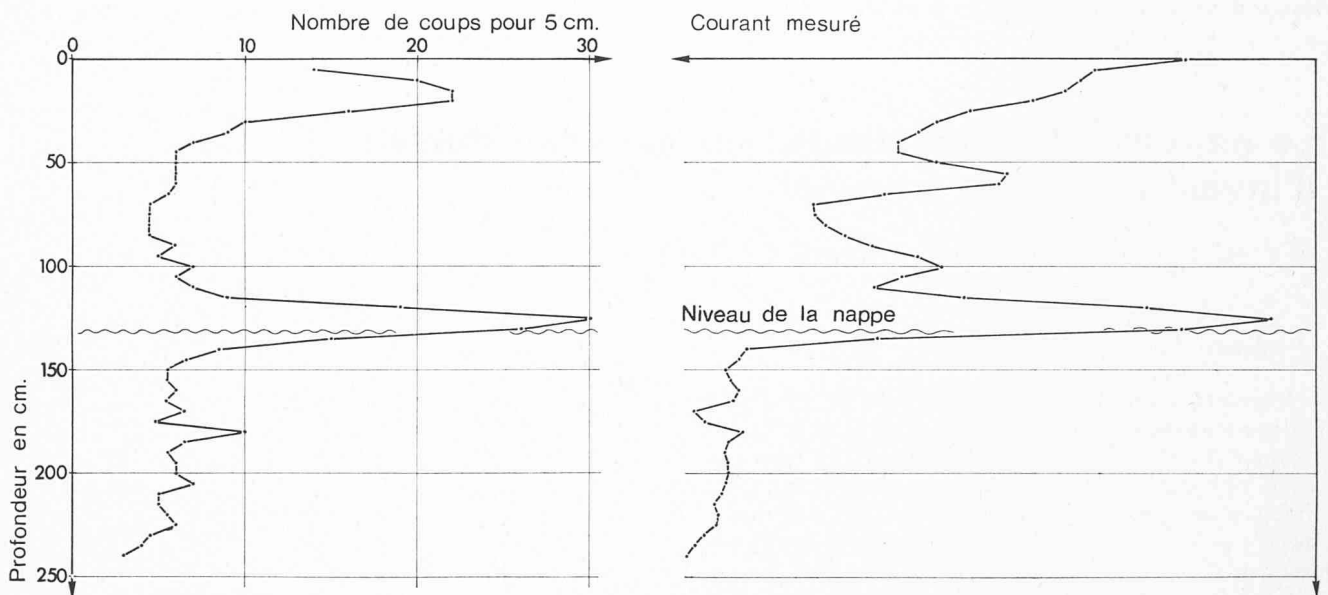
2. Détermination du niveau d'une nappe

Dans les travaux de génie civil comme dans ceux d'hydrologie, il est souvent important de déterminer le niveau de la nappe phréatique.

Ici encore, le pénétromètre-électrode est particulièrement efficace (fig. 3).

Le toit de la nappe ou, si l'on préfère, la limite entre la zone saturée et la frange capillaire se manifeste par une augmentation de l'intensité du courant, alors que le pénétromètre traditionnel reste aveugle à cette limite importante.

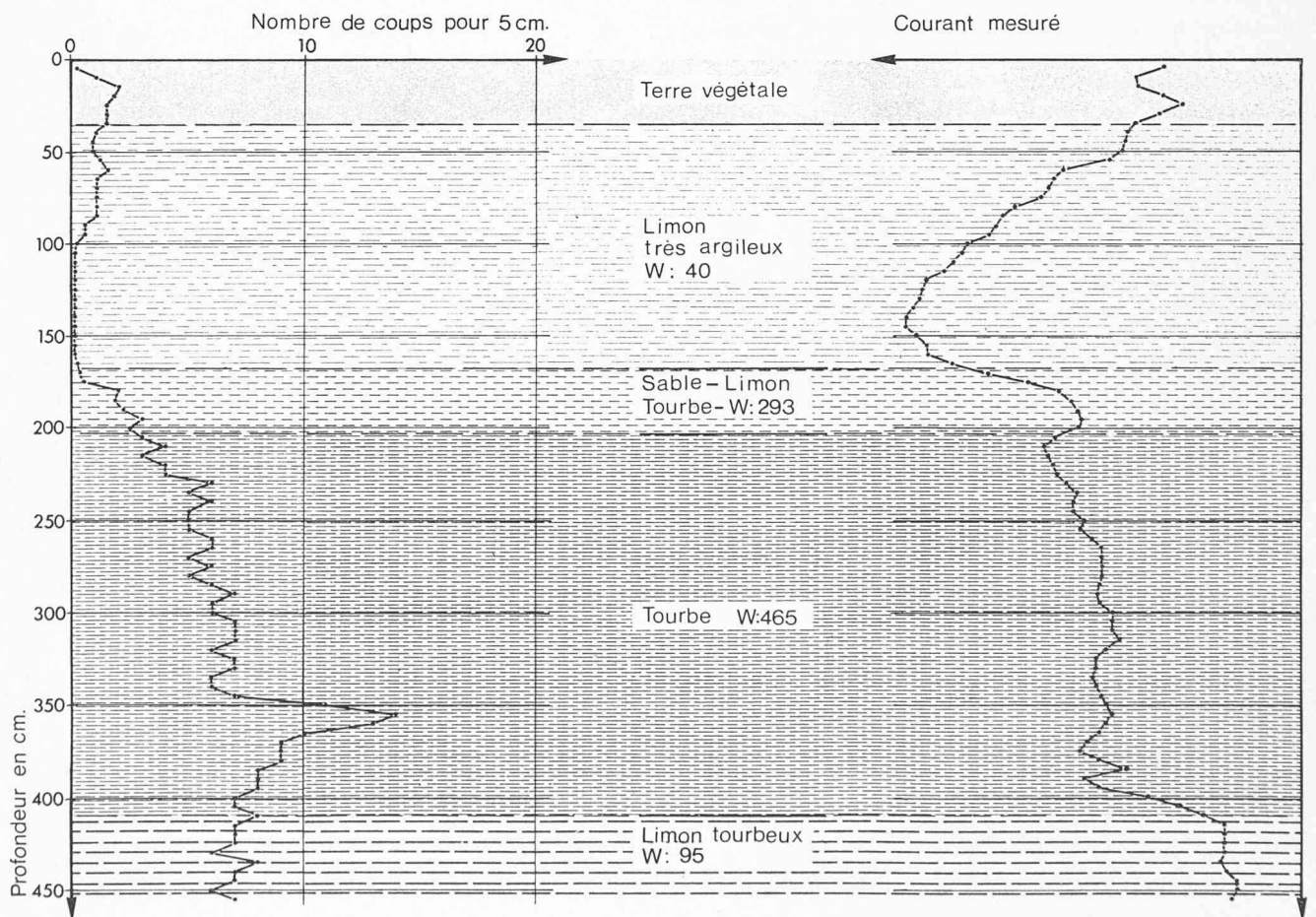
Le contraste entre la zone aérée et la zone saturée se marque par une variation de courant d'autant plus nette que les niveaux traversés sont plus perméables.



MORGES

Coordonnées: Y: 529 000
X: 152 150

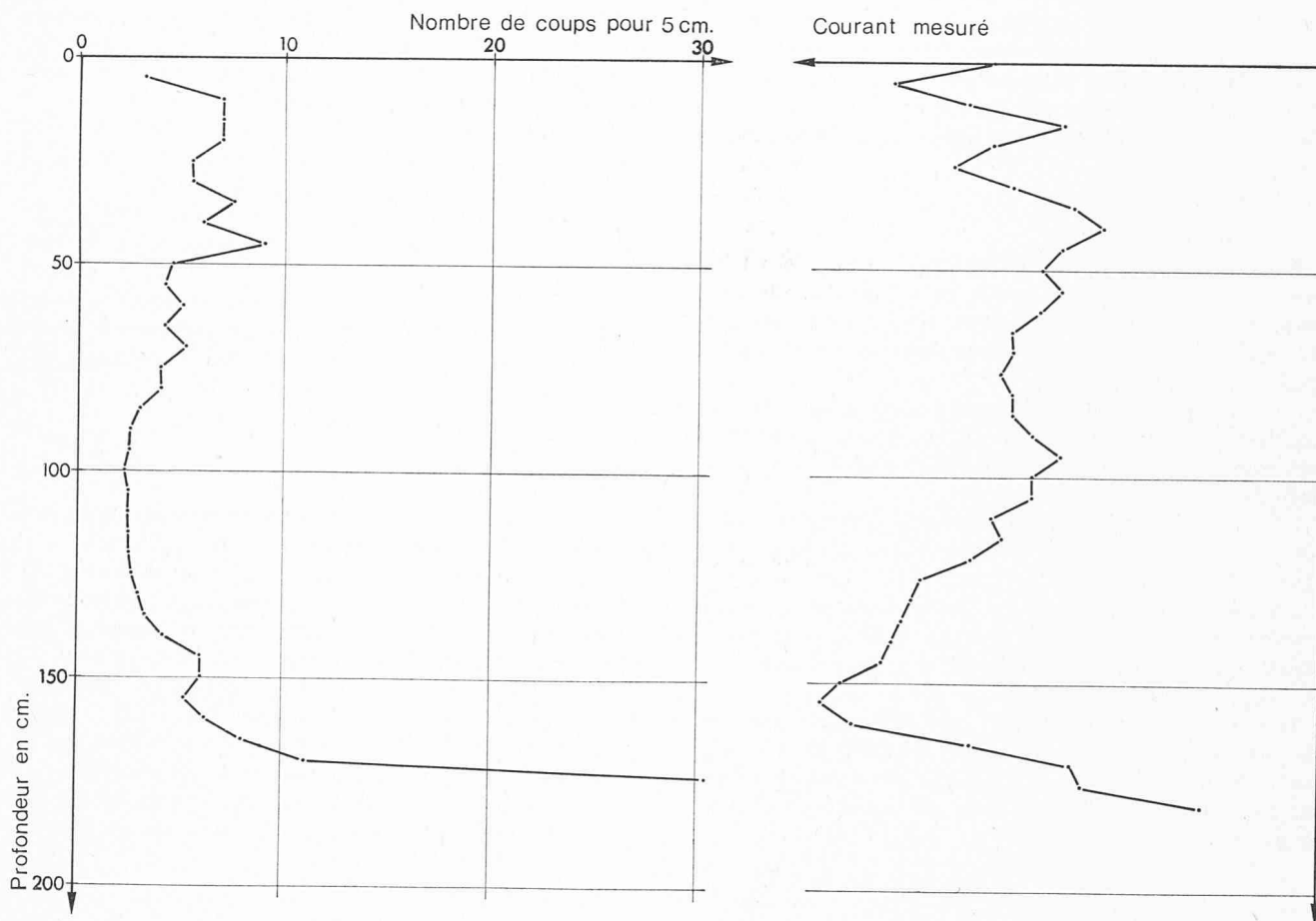
Fig. 3. — Détermination du niveau d'une nappe phréatique grâce au pénétrömètre-électrode.



BELMONT SUR YVERDON

Coordonnées: Y: 537 500
X: 178 100

Fig. 4. — Comparaison des résultats obtenus grâce au pénétrömètre-électrode avec ceux obtenus par sondage carotté.



AVENCHES CAPITOLE

Coordonnées : Y: 570 250
X: 192 800

Fig. 5. — Sondage au pénétromètre-électrode à l'aplomb d'un mur romain enfoui.

3. *Distinctions entre limons et tourbes*

Il est assez facile, grâce au pénétromètre-électrode, de suivre de proche en proche un niveau de tourbes repéré en un point par un sondage (fig. 4).

Cet exemple montre à quel point la qualité de l'eau d'imbibition influe sur la résistance électrique des terrains.

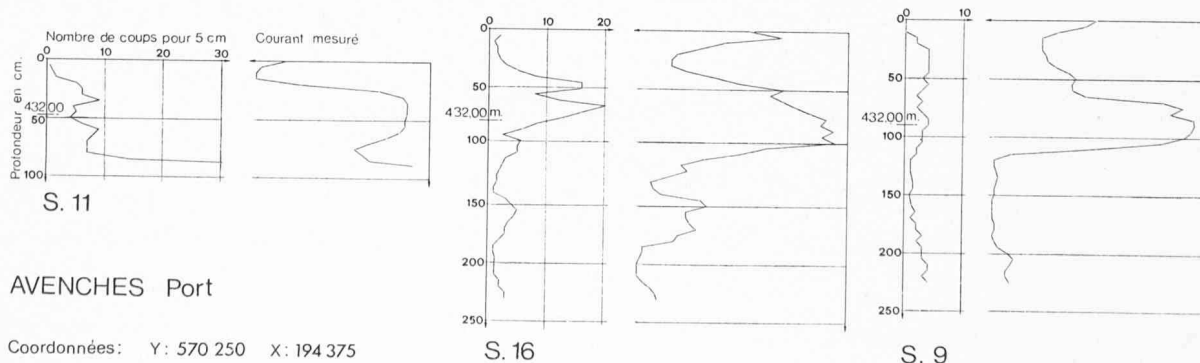
4. *Localisation de vestiges archéologiques*

Il ne semble pas que, jusqu'à nos essais d'Aventicum, la prospection archéologique ait mis à profit les possibilités du pénétromètre. Pourtant, nos premières expériences dans ce domaine semblent très concluantes (fig. 5).

Dans ce cas, la courbe de pénétration suffirait à elle seule à repérer les vestiges romains. Il s'agit d'un mur cimenté dont la présence se manifeste clairement par une extrême résistance à l'avancement ainsi que, sur la courbe du courant, par une nette chute d'intensité.

Dans l'exemple ci-dessous (port romain d'Avenches), les informations apportées par le pénétromètre-électrode complètent utilement celles obtenues grâce au pénétromètre classique (fig. 6).

La courbe de pénétration et celle de l'intensité du courant font apparaître, au sondage 11, d'importants vestiges romains à une profondeur de 80 centimètres.



AVENCHES Port

Coordonnées : Y: 570 250 X: 194 375

Fig. 6. — Sondages au pénétromètre-électrode sur des vestiges romains épars.

Au sondage 16, les vestiges sont réduits à des débris inclus dans une couche située entre 150 et 180 centimètres.

Le sondage 9 reflète la « stratigraphie normale » de la zone étudiée, il met en particulier en évidence, entre 65 et 110 centimètres, une couche de sable et gravillons fluviaux.

6. Etudes de glissements

Nous avons bon espoir de faciliter, grâce au pénétromètre-électrode, l'étude des glissements. Jusqu'ici, dans ce domaine, nous n'avons pu faire qu'un petit nombre d'essais ; si bien que nos résultats sont partiels et provisoires.

Souvent, les niveaux de glissement sont caractérisés par une forte porosité, par une saturation totale et par une très faible perméabilité qui immobilise presque totalement l'eau dans ces niveaux.

Ces diverses caractéristiques physiques doivent, semble-t-il, pouvoir être mises en évidence par le pénétromètre-électrode.

En effet, le pénétromètre s'enfonce facilement dans les terrains meubles très poreux, par conséquent la porosité élevée des niveaux de décollement doit se marquer par une dépression dans la courbe du nombre de coups.

D'autre part, les zones peu perméables, poreuses et saturées se signalent, sur la courbe du courant, par une augmentation d'intensité. La salinité relativement élevée des eaux confinées dans ces zones explique cette conductibilité électrique accrue (fig. 7).

Obtenues dans la vallée de l'Aubonne, les deux courbes de la figure 7 font apparaître, au niveau de la surface de glissement, la première une pénétration aisée, la seconde une augmentation de la conductibilité électrique.

Il est intéressant de noter, au cœur de la masse glissée, entre 150 et 270 centimètres, une zone très poreuse mais activement drainée. Cette zone se signale par un rapide avancement du pénétromètre et une faible intensité du courant électrique, car les eaux météoriques qui y circulent librement sont peu conductrices.

Les recherches que nous poursuivons nous conduiront probablement à tenter la détection des surfaces de décollement, grâce à la mesure des potentiels spontanés qui leur sont associés.

III. La signification des courbes de courant

Nous avons vu que le pénétromètre-électrode peut être schématisé de la façon suivante (fig. 8) :

On peut admettre que la résistance d'un tel circuit est formée presque totalement par la résistance rencontrée au passage de la pointe du pénétromètre au terrain et par celle rencontrée au passage du terrain à l'électrode fixe.

En d'autres termes, la résistance électrique totale est, à peu de chose près, la somme d'une constante, la résistance à proximité de l'électrode fixe, et d'une variable, la résistance à proximité de la pointe du pénétromètre.

Nous avons vérifié la validité de cette approximation sur le terrain en mesurant successivement, pour un seul forage,

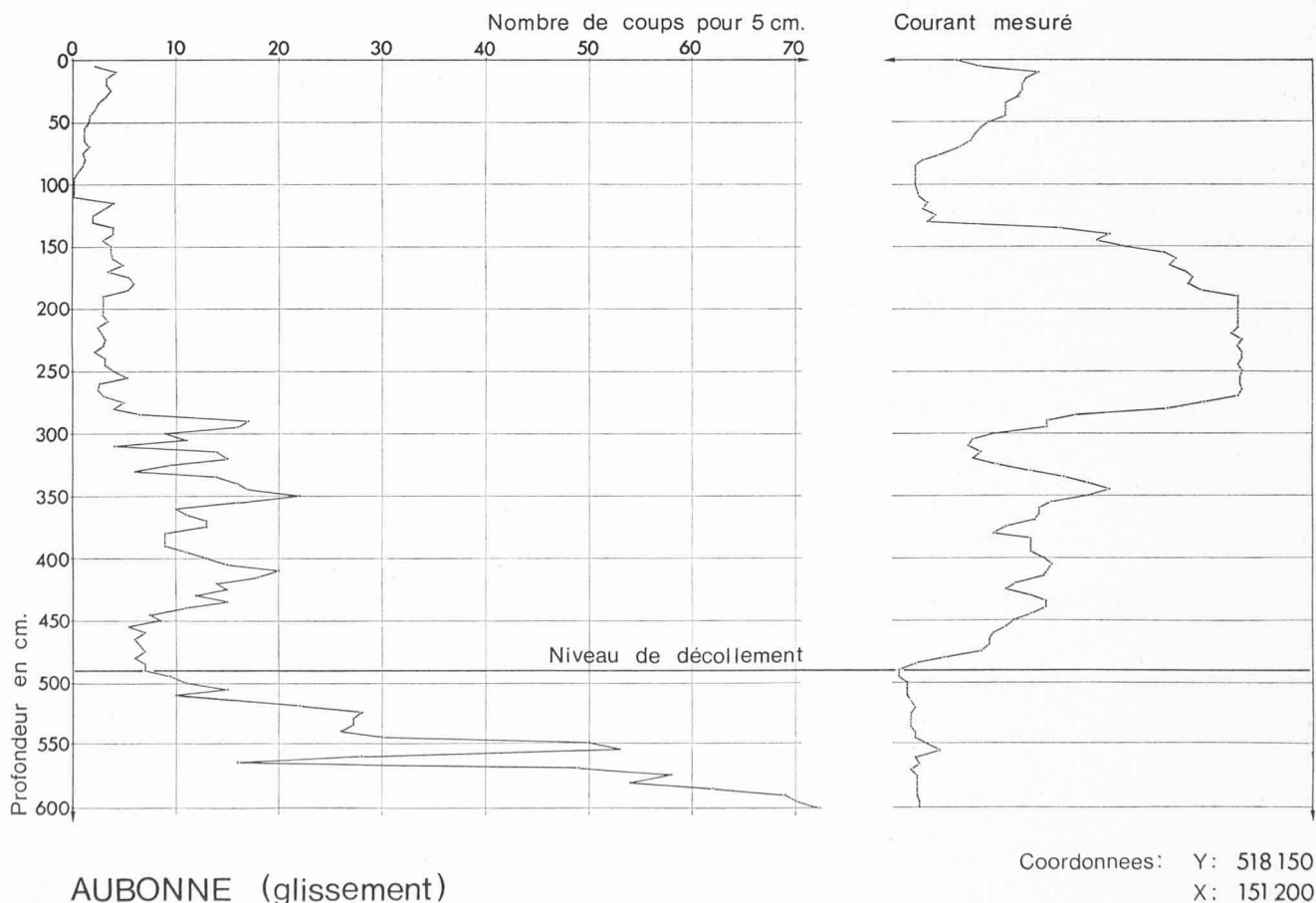


Fig. 7. — Sondage au pénétromètre-électrode sur un glissement.

l'intensité du courant sur deux circuits aboutissant à deux électrodes fixes situées dans des milieux très dissemblables. A dessein, nous avons placé le pénétrromètre près de la limite entre des terrains électriquement très résistants et des terrains conducteurs (fig. 9).

Les intensités du courant mesurées sur chacun des deux circuits sont bien semblables, à un facteur de multiplication près.

Dans une deuxième phase, nous avons voulu vérifier que seule la tête du pénétrromètre agit comme source de courant et non la tige.

A cet égard, l'expérience suivante est concluante. Nous avons successivement fait descendre dans de l'eau, électriquement homogène, une tête sur une tige normale, puis le même dispositif avec tête et tige séparées par un manchon isolant (fig. 10).

Dans un milieu homogène, le courant émis par la pointe isolée ne varie plus dès que la tête s'éloigne quelque peu de la surface.

Par contre, le courant émis par le pénétrromètre normal, sans isolant entre la pointe et la tige, continue de croître avec l'augmentation de la surface de contact entre l'outil et le milieu ambiant.

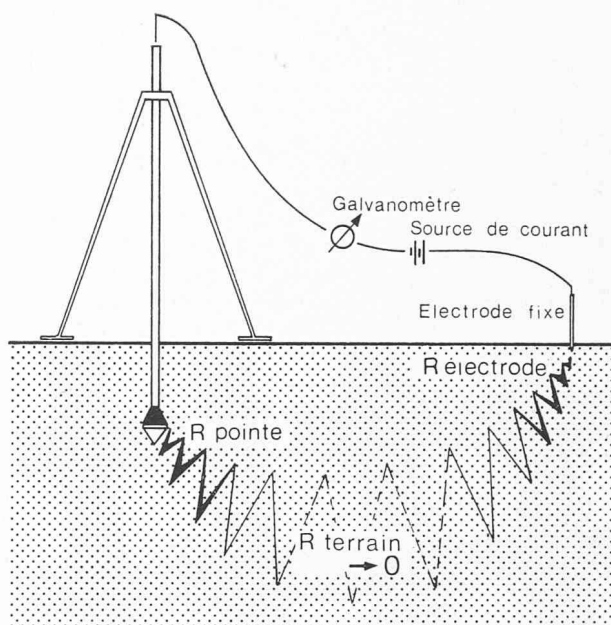
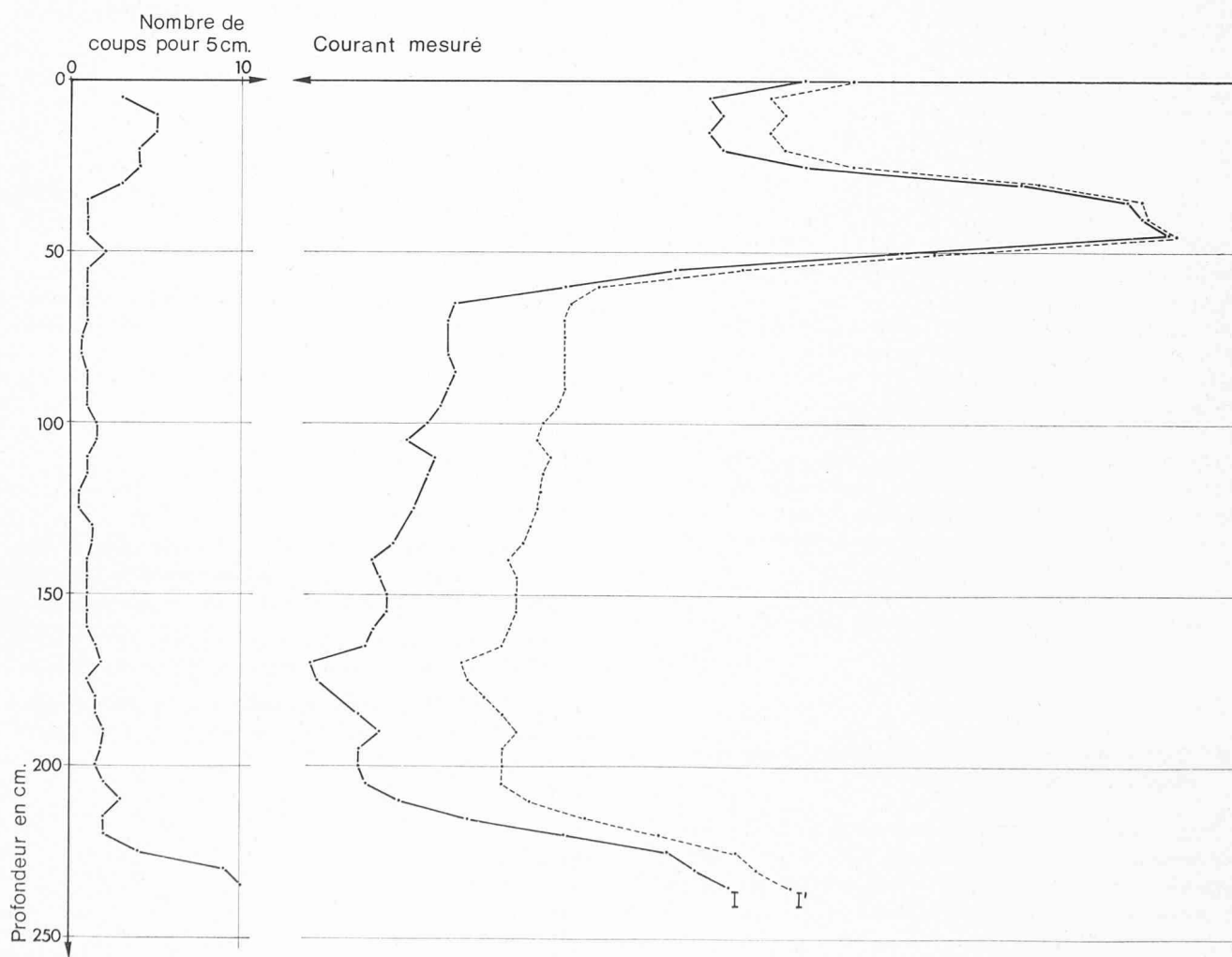


Fig. 8. — Schéma de principe du pénétrromètre-électrode.



AVENCHES - Port

Coordonnées: Y: 570 250

X: 194 375

Fig. 9. — Sondage au pénétrromètre-électrode avec deux électrodes fixes placées en terrain hétérogène.

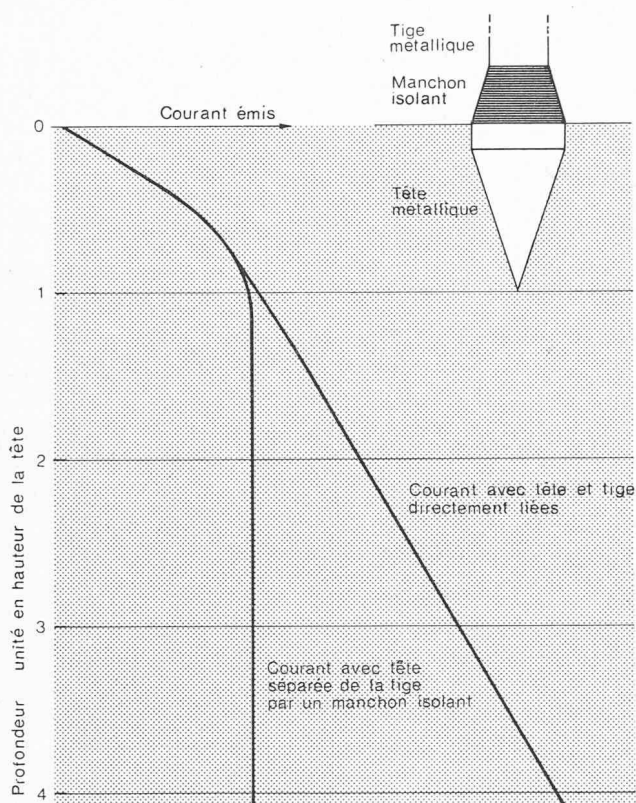


Fig. 10. — Mesure du courant émis par la tête du pénétromètre isolée ou non. Zone d'influence de l'interface sol-air.

On peut donc admettre que pour le potentiomètre-électrode, muni du manchon isolant, seule la tête émet du courant dans le sous-sol.

La même expérience permet de déterminer la profondeur qu'il faut atteindre pour que l'intensité du courant ne soit plus sensiblement affectée par la proximité de la surface. A partir de cette profondeur, tout se passe comme si le courant était émis dans un milieu infini.

On voit sur la figure 10 qu'en milieu homogène, le courant se stabilise rapidement. La présence du plan séparant le milieu résistant (l'air) et le milieu conducteur (le sol ou l'eau) se fait sentir sur une épaisseur variant entre une et six fois la hauteur de la tête.

Les variations observées d'une expérience à l'autre s'expliquent par les diverses résistivités du milieu conducteur.

IV. Calcul de la résistivité électrique vraie des terrains traversés

Nous avons démontré que la résistance totale du circuit constitué par le potentiomètre-électrode et le sol est pratiquement égale à la somme des résistances de passage de la pointe au sol et de l'électrode fixe au sol.

$$R \text{ totale} = R \text{ pointe} + R \text{ électrode fixe}$$

D'autre part, nous savons que dans un milieu infini de résistivité homogène ρ , la résistance de passage d'une électrode sphérique de rayon r vaut :

$$R = \rho \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r}$$

et que, par conséquent, pour une électrode sphérique

$$\rho = R \cdot 4 \cdot \pi \cdot r$$

Il nous reste donc, pour tirer ρ de nos mesures, à déterminer R et r_i .

Dans le cas de la pointe du pénétromètre, r doit être déterminé expérimentalement. Cette détermination, pour autant que l'on se contente d'une valeur approchée, peut se faire aisément en milieu homogène avec l'aide de deux électrodes fixes.

Quant à la résistance de la pointe du pénétromètre, on la déduit facilement après avoir déterminé pour chaque nouveau sondage la résistance de l'électrode fixe.

Les essais que nous avons effectués en divers points de la campagne vaudoise nous ont fourni des valeurs de résistivités en parfait accord avec celles que nous avons obtenues par d'autres méthodes.

Grâce aux possibilités du potentiomètre-électrode, la reconnaissance lithologique des roches meubles peut maintenant s'appuyer non seulement sur les diverses résistances à la pénétration, mais encore sur la mesure des résistivités électriques propres, souvent caractéristiques de l'une ou l'autre formation.

V. Conclusions

D'ores et déjà, le pénétromètre-électrode est susceptible d'apporter de précieuses informations dans de très nombreux cas dont nous avons cité quelques exemples.

Des études en cours permettront peut-être d'en faire un instrument capable de mesurer les porosités in situ. Une telle possibilité est évidemment d'un grand intérêt pour le génie civil et pour l'hydrologie.

VI. Remerciements

Nos remerciements vont :

— A la Maison BEVAC de Cheseaux, à qui nous devons d'avoir pu modifier et utiliser un pénétromètre P2 semi-automatique, aimablement mis à notre disposition.

— Aux responsables du Laboratoire de Géotechnique de l'EPFL, qui ont bien voulu nous prêter des tiges creuses.

— A M. H. Bögli, directeur des fouilles archéologiques d'Avenches, qui a eu l'extrême gentillesse de nous guider sur son domaine.

Adresses des auteurs :

Camille Meyer de Stadelhofen
Institut de Géophysique, Université de Lausanne
César-Roux 18, Lausanne

Dominique Chapellier
Institut de Géophysique, Université de Lausanne
César-Roux 18, Lausanne

Paul Braissant
Institut de Géophysique, Université de Lausanne
César-Roux 18, Lausanne