

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Recherche des écoulements d'eau privilégiés et prélèvements intacts de sols cohérents hétérogènes

Measurement of Water Flow and Undisturbed Sampling of Cohesive Soil

par H. CAMBEFORT, Ingénieur Civil de l'Ecole Nationale des Ponts & Chaussées, Professeur à l'Ecole Spéciale des Travaux Publics

et

G. MAZIER, Ingénieur à Solétanche

Sommaire

La mesure des vitesses verticales de l'eau dans un puits filtrant pendant un pompage ou une injection d'eau localise les points d'entrée ou de sortie de l'eau dans le puits.

Ces mesures peuvent se faire avec un moulinet ou avec un anémomètre à fil chaud.

Les mesures à l'anémomètre à fil chaud, réalisées dans un piézomètre très voisin d'un puits filtrant dans lequel on pompe, donnent avec précision la position des passages privilégiés.

Le prélèvement d'échantillons intacts dans les formations argileuses soit très dures, soit constituées par des rognons ou des couches d'argile dure entourés d'argile molle se fait facilement avec un carottier double à rotation dont le tube intérieur dépasse d'une quantité variable en dessous de la couronne.

Un ressort assure automatiquement le réglage de cette avance qui permet de poinçonner le terrain sans que la carotte soit jamais au contact de l'eau en circulation.

Summary

Measurement of the vertical water velocities flowing through a filter well when the water is pumped out or injected will indicate the position of inlets or outlets in the well. Either a current meter or a hot wire anemometer can be used for these measurements.

Measurements taken with a hot wire anemometer in a piezometer close to a filter well will give the accurate position of free passages when water is pumped out of the well.

Undisturbed sampling in clay strata, comprising either very hard clay or hard clay with soft clay, can be easily carried out with a rotating double sampler, in which the inside tube extends beyond the outer tube.

The length of this extension is adjustable. A spring automatically adjusts this length so that the sample is isolated from the circulating water.

Recherche des écoulements privilégiés

Lorsqu'une roche fissurée est baignée par une nappe d'eau, celle-ci ne peut s'écouler que par les fissures qui constituent des passages privilégiés. Il en est à peu près de même pour les massifs alluvionnaires de sables et graviers, car contrairement à ce que l'on pense souvent, ces massifs ne sont généralement pas homogènes, isotropes ou anisotropes, mais hétérogènes. Les nappes d'eau les baignant s'écoulent alors en suivant les couches les plus perméables. Ce sont ces écoulements que, par extension, nous qualifions de privilégiés.

Nous avons déjà essayé de rechercher cette hétérogénéité des alluvions en nous basant sur leur granulométrie (CAMBEFORT, 1951). Mais il s'agit là d'une recherche indirecte qui, tout en étant utile, est loin d'être parfaite.

Puisque l'eau s'écoule par les horizons les plus perméables, nous avons pensé que si l'on mesurait dans un puits filtrant, dans lequel on pompe, les vitesses de l'eau en chaque point, on pourrait localiser les zones d'entrées d'eau.

Une telle mesure peut également se faire en injectant de l'eau au lieu d'en pomper.

A notre grande surprise, nous avons constaté au cours de ces essais que, dans la presque totalité des cas, il y avait dans le puits un écoulement vertical en l'absence de tout pompage ou de toute injection.

Pour illustrer ce phénomène, nous allons donner quelques exemples typiques. Les mesures ont en général été faites dans des puits de 50 millimètres de diamètre intérieur, avec un moulinet qui occupe à peu près toute la surface de l'écoulement.

Le même moulinet a également servi pour des mesures dans

des puits de 250 mm de diamètre. Dans ce cas, il est manifestement trop petit pour que ses indications reflètent fidèlement la réalité, mais le résultat des mesures fait néanmoins apparaître l'hétérogénéité des alluvions.

Sur la Fig. 1 on voit que, à l'état naturel et en toute première approximation, les couches comprises entre 12.50 et 25 m de profondeur sont le siège d'un écoulement du terrain vers le forage, alors qu'au-dessus, l'écoulement est en sens inverse.

Une injection d'eau renverse les écoulements sur une certaine hauteur. Dans ce cas particulier, il aurait fallu prolonger le tubage du forage au-dessus de la surface du sol, afin de permettre l'injection d'un débit suffisant pour renverser le sens du courant sur toute la hauteur du forage.

Sachant que la précision du moulinet est faible en dessous d'une vitesse de l'eau égale à un centimètre par seconde, ces mesures montrent qu'il y a trois couches nettement perméables : au-dessus de 2.50 m ; entre 10 et 14 m ; et au-delà de 21.50 m. La perméabilité des autres couches est due à des passages privilégiés très localisés.

Si l'écoulement naturel fait apparaître une absence d'échange d'eau entre le terrain et le forage entre 10 et 13 m de profondeur, contrairement à l'injection à fort débit, c'est que dans le premier cas la pression hydrostatique de l'écoulement vertical dans le forage est la même que celle de la nappe à ce niveau. Autrement dit, le forage considéré comme un piézomètre donne sensiblement le niveau piézométrique de la

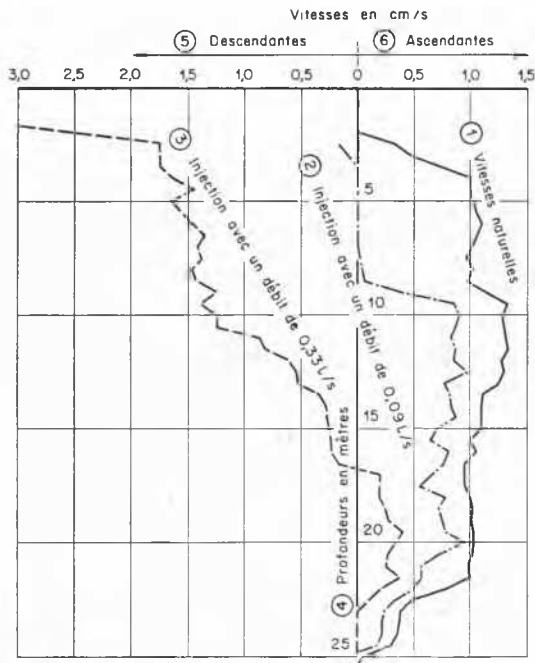


Fig. 1 Alluvions du Rhin.

Rhine alluvials.

1. Natural velocities ; 2. Injection at 0.09 lit/s per second.
3. Injection at 0.33 lit/s per second ; 4. Depths, in m ; 5. Velocities in cm/s : Downwards ; 6. Velocities in cm/s : Upwards.

nappe à 10-13 m de profondeur, le $\frac{v_2}{2g}$ de l'écoulement vertical étant négligeable.

Un cas à peu près identique au précédent (Fig. 2) correspond à une alimentation du forage par les couches situées au-dessus de 10 m de profondeur, et un écoulement du forage vers le terrain entre 15 et 23 m. L'écoulement dans le forage se fait donc du haut vers le bas.

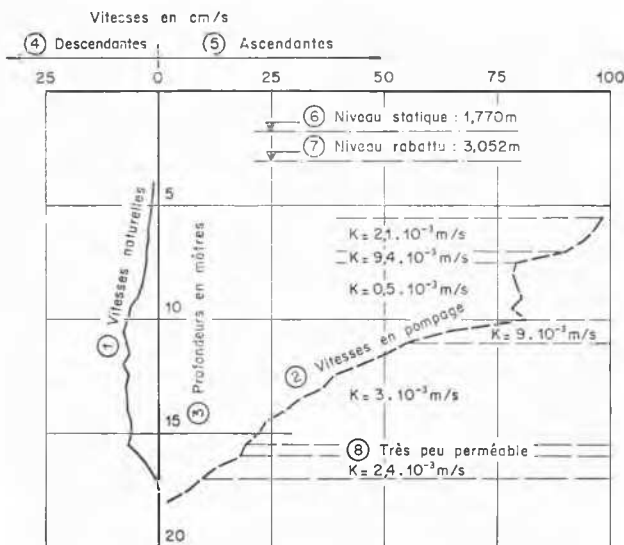


Fig. 2 Alluvions du Drac.

Drac alluvials.

1. Natural velocities ; 2. Pumping velocities ; 3. Depths in m ; 4. Velocities in cm/s : Downwards ; 5. Velocities in cm/s : Upwards ; 6. Static level ; 7. Drawdown level ; 8. Very slightly permeable.

Un pompage a permis de calculer la perméabilité des divers horizons. Entre 7.50 et 10 m de profondeur on a une couche nettement moins perméable que les autres.

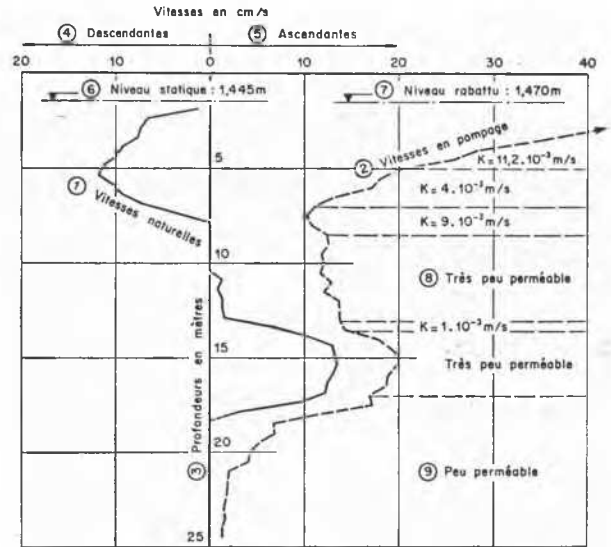


Fig. 3 Alluvions du Drac.

Drac alluvials.

1. Natural velocities ; 2. Pumping velocities ; 3. Depths in m ; 4. Velocities in cm/s : Downwards ; 5. Velocities in cm/s : Upwards ; 6. Static level ; 7. Drawdown level ; 8. Very slightly permeable ; 9. Slightly permeable.

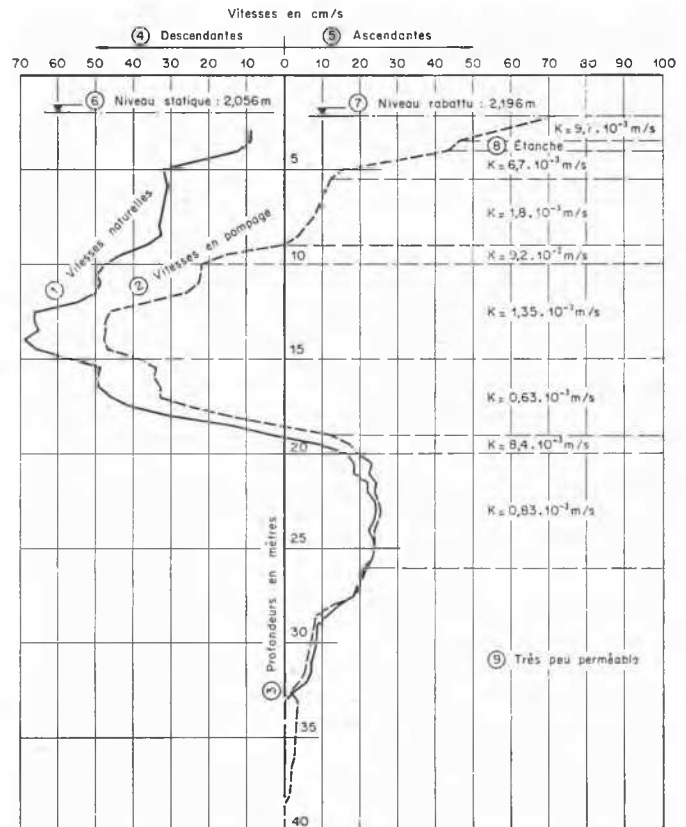


Fig. 4 Alluvions du Drac.

Drac alluvials.

1. Natural velocities ; 2. Pumping velocities ; 3. Depths in m ; 4. Velocities in cm/s : Downwards ; 5. Velocities in cm/s : Upwards ; 6. Static level ; 7. Drawdown level ; 8. Watertight ; 9. Very slightly permeable.

Une structure aussi simple aurait sans doute pu être décelée avec des essais de perméabilité ponctuels Lefranc, mais ceux-ci n'auraient pas donné l'épaisseur de cette couche peu perméable. Ces essais auraient sans doute aussi laissé échapper les couches relativement peu épaisses et très perméables qui se trouvent dans les deux exemples suivants.

Dans un premier cas, une couche à peu près étanche comprise entre 8 et 10 m de profondeur complique le phénomène à l'état naturel, indiqué par la Fig. 3.

L'écoulement de l'eau du terrain vers le forage se fait entre 2.5 m et 5 m et au-dessous de 17 m. Ce sont les couches comprises entre 5 et 8 m, 10 et 14 m qui absorbent cette eau. Cette fois un pompage a supprimé tous les écoulements descendants.

Une couche relativement mince, mais très perméable, a été ainsi repérée entre 13 et 13.50 m de profondeur. Cette couche aurait échappé à tout autre moyen d'investigation.

Un phénomène analogue au précédent fait l'objet de la Fig. 4. Mais cette fois il n'y a pas de couche étanche pour séparer les écoulements descendants et ascendants à l'état

naturel. Le pompage n'a pas été non plus d'un débit suffisant pour supprimer tous les écoulements descendants.

Ces mesures au moulinet font apparaître des couches dont la perméabilité semble constante. Mais il n'en est pas ainsi quand on étudie le phénomène plus en détail.

Pour ce faire, nous avons réalisé à 2 m d'un puits filtrant un piézomètre dans lequel on pouvait descendre un "anémomètre à fil chaud", destiné à mesurer les vitesses horizontales de la nappe, accélérées par un pompage dans le puits.

La Fig. 5 donne le résultat des mesures au moulinet dans le puits et à l'anémomètre dans le piézomètre, pendant le pompage.

Les mesures à l'anémomètre donnent des dents de scie impressionnantes et il faudrait sans doute augmenter encore le nombre de points de mesures pour que leur interprétation permette de retrouver les indications du moulinet beaucoup plus calmes.

Ces mesures ne sont pas utilisables quantitativement. Mais en tout cas elles montrent que même dans des horizons qui paraissent homogènes au moulinet, l'eau s'écoule principa-

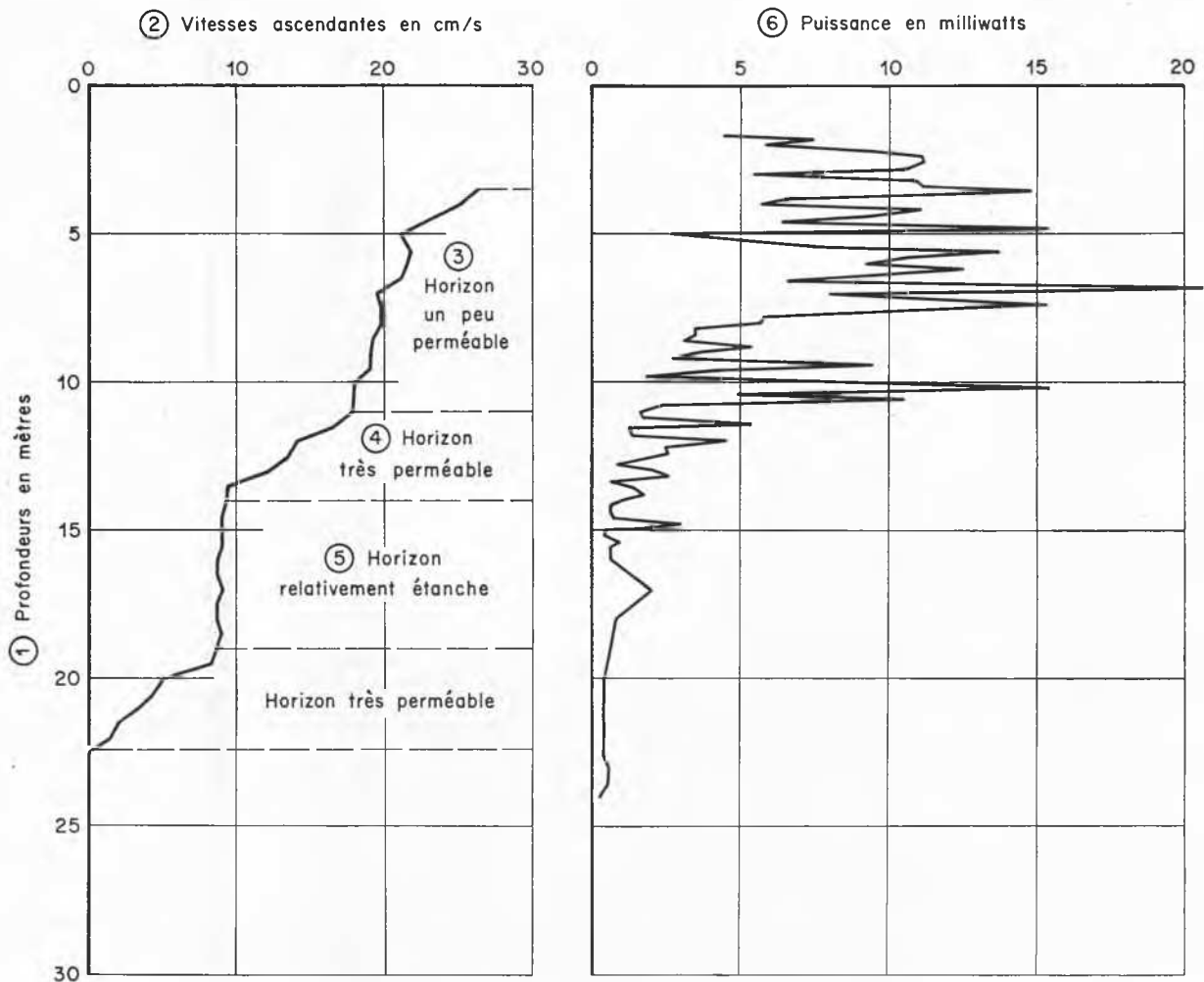


Fig. 5 Alluvions du Rhin.
Rhine alluvials.

Fig. de gauche. Vitesses verticales mesurées au moulinet (puits).
Left Fig. Vertical velocities measured with a moulinet (in the well).

Fig. de droite. Vitesses horizontales mesurées à l'anémomètre (piézomètre voisin).

Right Fig. Horizontal velocities measured with an anemometer (in the piezometer close to well).

1. Depths in m. ; 2. Rising velocities in cm/s ; 3. Slightly pervious stratum ; 4. Very permeable stratum ; 5. Relatively watertight stratum ; 6. Power in milli-watts.

lement par des passages très nombreux et plus ou moins épais. Ceci explique pourquoi des couches de granulométrie comparable peuvent avoir des perméabilités totalement différentes et sans rapport avec leur granulométrie. C'est simplement le nombre et l'épaisseur de ces couches très perméables qui imposent la perméabilité sans modifier beaucoup la granulométrie d'un échantillon toujours remanié.

Remarquons en passant que de telles structures ont une perméabilité horizontale de beaucoup supérieure à la perméabilité verticale.

Pour terminer nous donnons le résultat de mesures au moulinet faites avec et sans pompage dans un forage traversant une roche fissurée. L'allure des diagrammes est analogue aux précédents (Fig. 6).

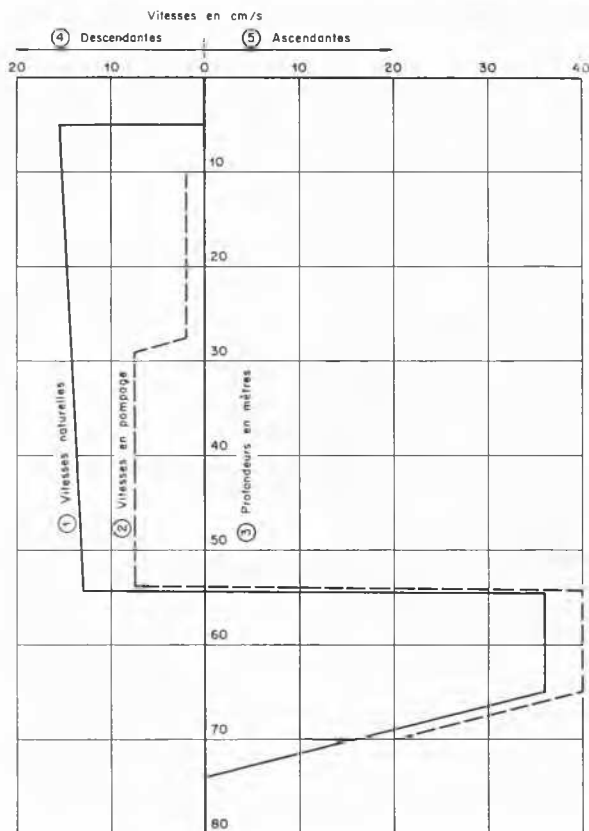


Fig. 6 Rocher fissuré (Grand Rapids, Canada).
Fissured rock.

1. Natural velocities ; 2. Pumping velocities ; 3. Depths in m ; 4. Velocities in cm/s : Downwards ; 5. Velocities in cm/s : Upwards.

Comme on le voit, ces essais précisent l'hétérogénéité des terrains en permettant de calculer un bon ordre de grandeur de l'épaisseur et de la perméabilité des différents horizons. Par ailleurs, ils donnent des indications sur la valeur des pressions hydrostatiques régnant dans la nappe aquifère. C'est la combinaison des différences de pression, de l'épaisseur des couches et de leur perméabilité qui commande les écoulements naturels dans le forage.

Carottier double pour échantillons intacts

Alors que le prélèvement d'échantillons intacts se fait aisément dans les formations de faible consistance, il n'en est plus de même lorsque celle-ci augmente. Il est ainsi difficile de prélever par battage, même avec un carottier à très minces

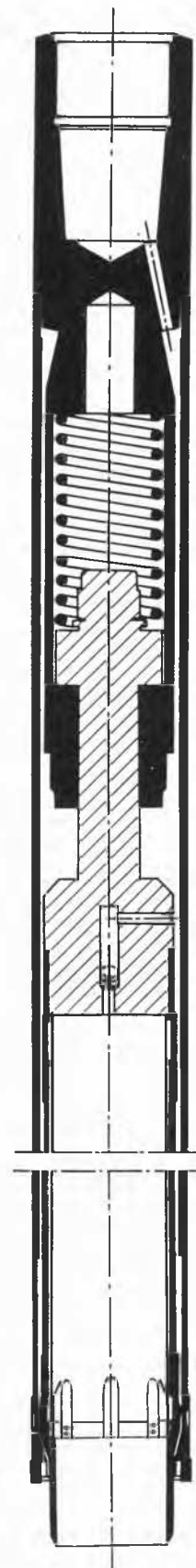


Fig. 7 Carottier à trousse dépassante automatique.
Sampling shoe with automatic extending cutting edge.

parois, un échantillon intact d'une argile dont la cohésion est supérieure à environ 1 kg/cm^2 . Les échantillons ainsi obtenus sont toujours plus ou moins remaniés par le prélèvement.

On peut évidemment opérer à rotation avec un carottier double. Mais alors la carotte se trouve au contact du fluide de circulation, eau claire ou boue, avant son entrée dans le tube intérieur du carottier. Elle s'imbibe plus ou moins profondément et il faut râcler sérieusement ses parois avant de la paraffiner.

L'emploi d'un carottier double dont le tube intérieur dépasse sous la couronne convient parfaitement. Le sabot de ce tube poinçonne le terrain et la carotte n'est jamais au contact de l'eau.

L'expérience montre cependant que pour que ce carottier fonctionne correctement il faut adapter, à la consistance du sol, la longueur dont sort le tube intérieur. Il s'agit d'une opération d'un principe simple, mais qui n'est jamais réalisée sur le chantier.

C'est pour supprimer cet inconvénient que nous avons mis au point et breveté un carottier dans lequel le réglage de cette avance se fait automatiquement en fonction de la résistance du sol à carotter.

Le tube intérieur prend appui sur la tête du carottier, par l'intermédiaire d'un système élastique, un ressort par exemple (Fig. 7).

En terrain mou, le sabot du tube intérieur se trouve à 50 mm au-dessous de la couronne. Mais lorsque la consistance du sol devient telle qu'avec la pression normalement exercée sur le carottier, le poinçonnement ne puisse pas se faire sur une hauteur de 50 mm, le ressort se comprime d'une quantité

suffisante pour que la couronne morde toujours au fond du forage.

L'emploi de ce carottier a montré qu'il était utilisable dans des cas beaucoup plus étendus que ceux pour lesquels il avait été conçu. C'est ainsi que l'on a pu carotter :

- du sable dont les grains les plus gros ne dépassaient pas 1 à 2 mm ;
- de l'argile ou de la marne ;
- des schistes demi-durs ;
- de la marne englobant des rognons de grès tendre ;
- et de la craie très fracturée contenant de très gros rognons de craie dure.

D'une manière générale, on peut avec cet appareil, prélever des échantillons intacts, dans tous les terrains dont les éléments les plus durs sont susceptibles d'être poinçonnés sur quelques millimètres de hauteur par le sabot du tube intérieur.

La carotte se trouve logée dans un étui qui n'est ouvert qu'au laboratoire. Avec les appareils existants, elle peut avoir 75 mm de diamètre pour un carottier de 100 mm de diamètre extérieur et 288 mm pour un carottier de 343 mm.

Bibliographie

- [1] H. CAMBEFORT (1951). Les alluvions graveleuses feuilletées et à structure ouverte, *IV^e Congrès des Grands Barrages*, New Delhi, Com. 5.
- [2] — (1957). La mesure in situ de la porosité du sable, *IV^e Congrès de Mécanique des Sols*, Londres, 2/1.
- [3] — (1^{er} fév. 1957). L'essai de pénétration et le Standard Pénétration Test, *Génie Civil*.



Carotte de craie prélevée dans la Région parisienne (\varnothing 288 mm).
Chalk core recovered in the Paris area.