

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.

Mesure des caractéristiques capillaires des sols au Laboratoire central des ponts et chaussées

Measurements of the Capillary Characteristics of Soils at the Central Laboratory of «Ponts et Chaussées»

par R. PELTIER, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, directeur au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 58, boulevard Lefèvre, Paris XV^e, France

Sommaire

Il est devenu essentiel pour l'ingénieur routier de connaître les caractéristiques capillaires des sols; c'est même indispensable pour déceler la «gélivité» des chaussées.

Ces caractéristiques sont, d'une part, la perméabilité capillaire K , au sens de la loi de Darcy; d'autre part, la hauteur totale d'ascension capillaire h .

Dans cette étude sont exposées les quatre méthodes généralement utilisées dans les laboratoires français à cet effet:

la méthode du «moule: Kh »;

la méthode du tube scellé sur l'échantillon;

la méthode du capillarimètre L.C.P.C.;

et la méthode du «bicouche».

La première est de beaucoup la plus répandue, car très simple et très commode d'emploi. Elle ne donne que le produit Kh . Mais les caractéristiques capillaires K et h , n'interviennent fréquemment dans les phénomènes naturels que par leur produit.

Le capillarimètre L.C.P.C. permet de mesurer séparément: K et h . Il semble devoir être très prochainement l'appareil courant de tous les laboratoires routiers français.

Définitions

Les phénomènes de capillarité interviennent d'une façon très importante, dans les sols routiers et leurs fondations, notamment en ce qui concerne le gel des chaussées. Aussi, importe-t-il essentiellement à l'ingénieur routier de bien connaître la théorie et la pratique des phénomènes de propagation capillaire de l'eau dans les sols, et de pouvoir mesurer avec une précision suffisante les deux paramètres dont dépend cette propagation: K et h . K caractérise la perméabilité capillaire du sol, au sens de la loi de Darcy; h est la hauteur totale de remontée capillaire dans le sol.

D'une façon plus précise, si q est le débit d'eau qui passe,

Summary

It is of primary importance for a road engineer to know the capillary characteristics of soils and, in fact, it is now essential in order to estimate the extent to which frost may damage a road surface.

These characteristics are, on the one hand, the capillary permeability K as in Darcy's law; on the other hand, the maximum capillary rise h .

In this paper 4 methods generally used for this purpose in French laboratories are described:—

The method using a capillary "mould: Kh ";

The method using a tube fixed on the sample;

The method using the capillarimeter L.C.P.C.;

The "double layer" method.

The first method is now well known and commonly used as it is very simple and very convenient. Only Kh can be obtained by that method. But in natural phenomena it is only the product of the 2 factors K and h which are usually effective.

With the capillarimeter L.C.P.C., it is possible to determine separately K and h and it seems that in the near future this apparatus will be the first choice of all French highways laboratories.

par unité de temps, à travers un tube rempli de sol, de section totale S et de gradient hydraulique $\frac{dp}{dx}$, la perméabilité K est définie par la loi de Darcy

$$q = KS \frac{dp}{dx}$$

(Nous ferons, tout de suite, remarquer que la perméabilité capillaire est généralement différente de la perméabilité habituelle telle qu'on la mesure au perméamètre. Aussi, convient-il de toujours préciser: perméabilité capillaire.)



Fig. 1 Moule Kh
Mould Kh

h est une traction dans le liquide, qui se transmet dans ce dernier grâce au phénomène de la tension superficielle, mais qui a son origine réelle dans l'attraction des molécules du liquide par les grains solides du sol. h n'a en fait qu'une définition statistique, car les pores du sol sont généralement irréguliers, et donnent lieu à des remontées variables, d'où la création de «franges capillaires». h n'a un sens que si la section S du tube est grande vis-à-vis des dimensions des pores, de façon que l'on puisse adopter la moyenne des tractions dans les divers pores de la section. Dès que le sol est assez fin, cette moyenne a une valeur précise.

Il est à noter que lorsque le liquide remonte dans un tube, cette remontée étant toujours très lente, on peut admettre qu'à tout moment, la traction qui fait remonter le liquide dans le tube est h . A la limite, lorsque l'équilibre est atteint, cette traction h est alors équilibrée par la hauteur totale h de remontée. C'est pourquoi l'usage a fait désigner cette traction par h , mais il convient de ne pas oublier son origine réelle.

Appareil courant dit «moule Kh »

La plupart des applications routières de la capillarité des sols (sauf le gel) ne font pas intervenir indépendamment les paramètres K et h , mais uniquement leur produit. D'où l'intérêt d'une mesure du produit Kh .

Cette mesure s'effectue dans un tube dit «moule Kh », de 10,15 cm de diamètre intérieur et de 27,5 cm de hauteur (Fig. 1). Ce tube constitue en quelque sorte un appareil Proctor de grande hauteur. Comme celui-ci, il possède une base et un anneau-prolonge amovibles, pour permettre la préparation de l'échantillon.

Le sol à essayer est mis en place et compacté dans le tube, à l'aide d'une dame Proctor ou d'une dame C.B.R., en suivant la méthode Proctor à ce sujet, mais en choisissant le nombre de couches et de coups par couche, de façon à obtenir une compacité fixée à l'avance et régulière dans tout le tube. Ce choix peut être fait au cours d'un essai de compactage préalable.

Le sol ayant été préparé et arasé dans le tube, celui-ci est débarrassé de son embase et de sa prolonge, et l'on fixe à la base du tube une toile métallique fine, et une plaque perforée qui empêchent les grains du sol de s'échapper au cours de l'essai.

Le tube chargé de sol est alors desséché à l'étuve. (L'essai peut également être fait sur des sols partiellement humectés.) Puis il est placé verticalement dans une cuve d'eau distillée, de façon que sa base baigne dans l'eau sur une hauteur de 1 à

2 cm. (Il faut éviter que des bulles d'air en trop grand nombre restent emprisonnées sous le tube.)

A intervalles réguliers, on retire le tube de l'eau, et on le pèse pour connaître les quantités d'eau absorbées par capillarité. En portant ces quantités Q en ordonnée d'un graphique, comportant en abscisse la racine carrée du temps, on obtient une droite, dont la pente donne le produit Kh .

En effet, si x est la hauteur de remontée atteinte au bout de temps t dans le tube, et si n est la porosité du sol (pourcentage de vides par rapport au volume total), on a les relations suivantes:

$$\text{(loi de Darcy)} \quad \frac{dQ}{dt} = KS \frac{dp}{dx} = KS \frac{h-x}{x} \quad 1)$$

et (équation de continuité) $Q = nSx$,

$$\text{d'où } n \frac{dx}{dt} = K \frac{h-x}{x}.$$

Cette équation différentielle s'intègre sans difficulté; il vient

$$\frac{K}{nh} t = \log \frac{1 - \frac{x}{h}}{1 - \frac{x}{h}}$$

qui peut s'écrire, à très peu près, lorsque x est petit devant h .

$$x = \sqrt{\frac{2Kh}{n}} \cdot t$$

$$\text{ou } Q = S \sqrt{2nKht}.$$

La pratique confirme cette conclusion de la théorie. On obtient (Fig. 2) des droites avec une grande précision, sauf au départ de l'essai; mais au début de l'essai, on ne sait pas exactement ce qui se passe; notamment le gradient hydraulique étant infini, la loi de Darcy ne s'applique plus. Il n'y a donc pas lieu de tenir compte du début de l'essai.

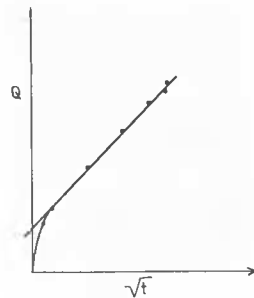


Fig. 2 Exemple de résultat pratique de l'essai Kh
Result of Practical Test Kh

Seconde méthode et mesures in situ

Cette première méthode est la plus généralement employée. Cependant elle s'applique parfois difficilement à des échantillons intacts. Aussi avons-nous mis au point une seconde méthode, qui permet, en outre, d'effectuer des mesures in situ. Nous n'en dirons ici que quelques mots.

Elle consiste à opérer sur un échantillon assez volumineux (une dizaine de litres) sur lequel on a taillé une face bien plane. Au milieu de cette face disposée horizontalement, on vient placer un tube de verre, que l'on fixe au mieux sur l'échantillon à étudier, en ayant soin d'assurer un joint étanche entre eux (Fig. 3). Par ailleurs, la surface plane de l'échantillon est imperméabilisée, en dehors du tube, par un dispositif approprié (paraffinage, par exemple).

¹⁾ La variation de pression sur la hauteur x de l'eau dans le tube est en effet $h - x$.

De l'eau (ou tout autre liquide, le cas échéant) et mise dans le tube jusqu'à un repère; et on rajoute de l'eau de temps en temps, à l'aide d'une pipette graduée, de façon à compenser l'eau absorbée par l'échantillon et à maintenir le niveau d'eau constant dans le tube. On note soigneusement les quantités d'eau rajoutées et les instants des opérations.

La théorie montre que l'eau se propage par capillarité dans l'échantillon, de telle sorte qu'à chaque instant sa surface limite est un demi-ellipsoïde de révolution d'axe vertical, dont les foyers se trouvent sur le cercle de contact du tube et de l'échantillon.

La théorie permet de calculer la quantité d'eau absorbée Q en fonction du temps t . On trouve

$$Q = + \frac{2}{3} \pi r^3 \cdot (\operatorname{tg}^3 \alpha + \operatorname{tg} \alpha) \cdot n$$

où r est le rayon du tube et a un paramètre auxiliaire, défini par

$$\frac{3K(h-h_0)}{r^2} \cdot t = a \cdot (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg}^3 \alpha) - \frac{1}{2} \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot a = \Phi(\alpha)$$

où h_0 est le niveau de l'eau dans le tube.

Pratiquement on portera les résultats sur un graphique comportant t en abscisse à l'échelle linéaire et Φ en ordonnée à l'échelle linéaire également; mais l'axe des ordonnées pourra être gradué directement en Q , grâce aux relations ci-dessus entre Q et a d'une part et Φ et a d'autre part. Cette correspondance est calculée numériquement dans le tableau ci-dessous:

Tableau 1

$\frac{Q}{\frac{2}{3}\pi nr^3}$	α	Φ
0	0	0
1	34° 18' 30"	0,366.0
2	45°	1,070.8
3	50° 30' 25"	1,908.3
4	54° 2' 52"	2,822.2
5	56° 35' 25"	3,786.3
6	58° 32' 20"	4,794.7
7	60° 6' 8"	5,830.6
8	61° 23' 50"	6,891.2
9	62° 29' 21"	7,972.0
10	63° 26' 35"	9,073
15	66° 46' 56"	14,767
20	68° 54' 4"	20,694
25	70° 24' 40"	26,774
30	71° 34'	32,973
35	72° 29' 15"	39,256
40	73° 14' 58"	45,620
45	73° 53' 36"	52,040
50	74° 26' 58"	58,510
100	77° 39' 24"	125,100

Les résultats, d'après la théorie précédente, doivent se trouver sur une droite dont la pente est

$$\frac{3K(h+h_0)}{r^2}$$

Généralement, h_0 est négligeable devant h , la pente donne alors immédiatement Kh ; sinon il suffit de recommencer l'essai avec une valeur de h_0 différente pour pouvoir calculer K et h .

Cette méthode donne, elle aussi, des résultats très précis (Fig. 4); elle n'exige pas de balance précise, mais elle est en fait plus délicate d'application que la précédente.

Nouveau capillarimètre L.C.P.C.

Description de l'appareil. Dans certains cas, dans l'étude du gel des sols routiers notamment, il est nécessaire de connaître non seulement le produit Kh , mais les deux paramètres K et h .

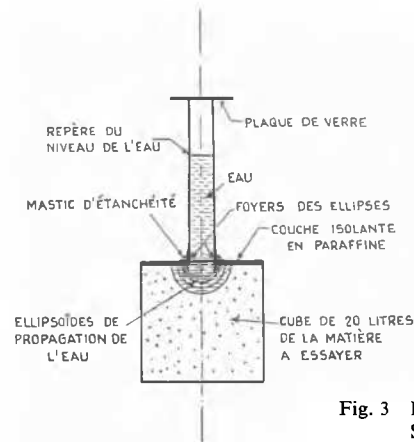


Fig. 3 Essai de capillarité des sols
Soil Capillarity Test

On se sert alors d'un appareil spécial dit capillarimètre L.C.P.C., mis au point en 1951 et 1952 au Laboratoire central des ponts et chaussées.

L'appareil se compose (Fig. 5):

- d'un «moule Kh » analogue à celui décrit plus haut, et de ses accessoires: embase, prolonge, dame Proctor...;
- d'un socle formant cuve à eau sur lequel peut être fixé rigide-ment le moule ci-dessus. Ce socle comporte notamment un fin grillage empêchant la chute des grains du sol et un dispositif permettant d'évacuer les bulles d'air qui tendraient à s'accumuler sous le moule;
- d'un tube en U en verre de 1 cm² de section environ et de 1 m de hauteur minimum. Une branche de ce tube aboutit au socle ci-dessus, et permet de faire arriver le liquide dans le sol à étudier par la base du «moule Kh ». L'autre branche légèrement plus haute est graduée, et comporte un entonnoir à sa partie supérieure.

Description de l'essai. Pour effectuer l'essai, on commence à préparer dans le «moule Kh », le sol à étudier, exactement comme dans le premier essai indiqué plus haut. Puis on fixe le moule sur son socle, et on introduit l'eau par l'entonnoir du tube en U, en ayant soin d'évacuer l'air sous le moule (on peut se servir à cet effet d'une trompe à eau, mais ceci n'est pas indispensable).

Dès que l'eau mouille la base de l'échantillon, on arrête l'évacuation de l'air, et on règle le niveau de l'eau dans la branche libre du tube en u, au zéro. Ce zéro doit correspondre exactement à la base du sol du moule. Alors l'essai commence.

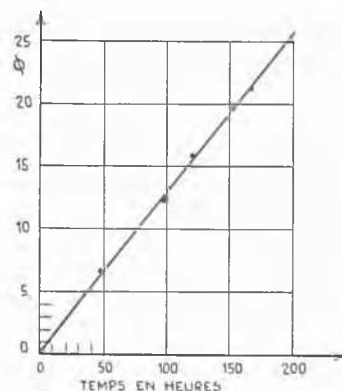


Fig. 4 Exemple de résultat pratique du second essai de capillarité
Practical Result of Second Capillarity Test

L'opérateur note à plusieurs intervalles de temps, le niveau de l'eau (au millimètre près), et le temps. Il connaît ainsi avec une très grande précision la quantité d'eau absorbée par le sol à chaque instant; cette précision est en effet de l'ordre du déci-gramme. Cette grande précision est indispensable, car ainsi que nous le verrons plus loin, c'est la vitesse d'absorption de l'eau par le sol qui intervient, soit la dérivée de la quantité d'eau absorbée, au lieu de cette quantité elle-même, comme dans les essais précédents.

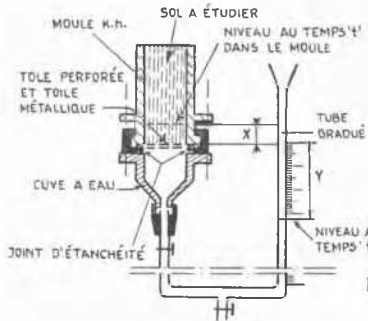


Fig. 5 Capillarimètre L.C.P.C.
Capillarimeter L.C.P.C.

Théorie de l'essai. Appelons:

- S la section du «moule Kh »;
- s la section du tube de verre;
- n la teneur en eau volumétrique du sol saturé (après essai);
- n_0 la teneur en eau volumétrique du sol avant essai;
- t le temps;
- x la hauteur atteinte par l'eau, au temps t dans le moule Kh ;
- y la baisse de niveau de l'eau dans la branche libre du tube en U , au temps t (y est compté positivement vers le bas);
- Q , quantité d'eau totale absorbée par le sol entre les instants 0 et t ;
- K la perméabilité capillaire du sol à essayer;
- h la hauteur totale de remontée capillaire de ce sol.

Par ailleurs, comme dans l'essai du «moule Kh », le début de l'essai est assez imprécis, non seulement parce que le gradient hydraulique est infini à ce moment et que la loi de Darcy ne s'applique plus, mais aussi parce que le mouillage de la base du sol peut commencer irrégulièrement. On a alors intérêt à ne commencer l'essai que lorsque l'eau a déjà remonté d'une hauteur x_0 (de l'ordre du centimètre) dans le moule. Prenons cet instant comme instant initial, et réglons à ce moment à zéro le niveau y .

En écrivant que l'eau du tube est passée dans le sol, on a une première équation:

$$S \cdot (n - n_0) \cdot (x - x_0) = sy = Q$$

D'autre part, la loi de Darcy indique que la perte de charge du mouvement ascensionnel de l'eau dans le sol est

$$p = \frac{x}{KS} \cdot \frac{dQ}{dt} = \frac{xs}{KS} \cdot \frac{dy}{dt}$$

Par ailleurs, la traction h à la surface de l'eau, doit équilibrer cette perte de charge et les dénivellations x et y .

$$h = p + x + y.$$

Finalement, en éliminant x entre ces trois équations, il vient

$$h = y + \left[\frac{s}{S} \cdot \frac{y}{n - n_0} + x_0 \right] \cdot \left[1 + \frac{s}{KS} \cdot \frac{dy}{dt} \right]$$

que l'on peut écrire, en posant

$$a_0 = x_0 \cdot \frac{S}{s} (n - n_0)$$

$$\frac{h + a_0}{y + a_0} = 1 + \frac{s}{S} x \frac{1}{n - n_0} + \left(\frac{s}{S} \right)^2 \cdot \frac{1}{K(n - n_0)} \cdot \frac{dy}{dt}$$

Sous cette forme on voit que $\frac{dy}{dt}$ est une fonction linéaire de $\frac{1}{y + a_0}$. Il suffit alors de porter les résultats des différentes lectures faites au cours de l'essai sur un diagramme comportant $\frac{dy}{dt}$ en ordonnée et $\frac{1}{y + a_0}$ en abscisse. Les résultats doivent s'aligner sur une droite (Fig. 6).

Pratiquement, cet alignement se réalise avec une précision remarquable. Il est même rare que des théories soient vérifiées expérimentalement d'une manière aussi satisfaisante, tout au moins en ce qui concerne un matériau aussi grossier que le sol. Il est à noter que a_0 doit être déterminé avec précision, sinon il en résulte une erreur non négligeable.

Sur le graphique de la Fig. 6, on voit que, si la droite coupe l'axe des abscisses en A et l'axe des ordonnées en B , l'on a, en valeur absolue

$$(h + a_0) x \overline{OA} = 1 + \frac{s}{S} x \frac{1}{n - n_0}$$

$$\left(\frac{s}{S} \right)^2 \cdot \frac{1}{K(n - n_0)} \cdot \overline{OB} = 1 + \frac{s}{S} x \frac{1}{n - n_0}$$

d'où l'on déduit K et h .

Utilisation pratique des résultats. Si h est plus petit que la hauteur du tube gradué, soit 1 à 2 m suivant les appareils, on mesure directement h lorsque le mouvement de l'eau s'arrête. L'appareil a alors surtout pour intérêt de pouvoir opérer très vite (quelques heures en général) et sur un sol bien connu;

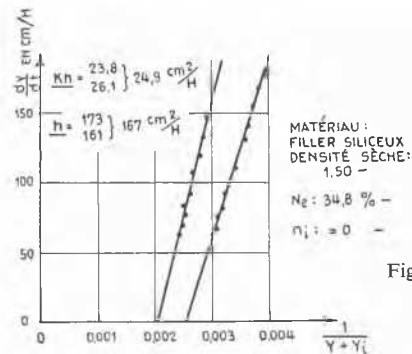


Fig. 6 Essai de capillarité au capillarimètre L.C.P.C.
Capillarity Test with Capillarimeter L.C.P.C.

tandis que si l'on voulait faire cette mesure avec un simple tube de diamètre constant, l'essai durerait longtemps, et, d'autre part, il est pratiquement impossible de réaliser l'homogénéité parfaite du sol dans un tube de grande hauteur.

L'intérêt de l'appareil est optimum pour des sols où h est compris entre 1 et 20 m, c'est-à-dire la grande majorité des sols. Au-delà de 20 m on peut encore utiliser cet appareil, à condition de lui adapter un tube en U très haut, ou de remplacer une partie de l'eau par du mercure. Mais on a généralement intérêt à utiliser plutôt le procédé du «bicouche» décrit plus loin.

A noter qu'on augmente la précision de l'appareil, en recommençant l'essai plusieurs fois. Pour cela, il n'est pas besoin de tout démonter et d'arrêter l'essai en cours, il suffit de remettre de l'eau dans la branche libre du tube pour ramener y à zéro.

On recommence ainsi un autre essai, mais où x_0 est différent du précédent, du fait de l'eau que le sol a déjà absorbée; on a ainsi une nouvelle valeur connue x_0' . L'essai peut être ainsi refait une seconde, une troisième fois, ...

Sur la Fig. 6, on a porté les résultats d'un des essais effectués avec cet appareil.

Procédé du «bicouche»

Nous ne dirons que quelques mots de cet essai qui est exceptionnel, mais permet de mesurer les propriétés capillaires des sols très fins.

Il consiste à utiliser un «moule Kh » exactement comme dans le premier essai décrit plus haut; mais en plaçant dans le moule deux sols différents, l'un, au-dessous, est un sol normal dont les caractéristiques K et h à la compacité prévue, ont préalablement été mesurées au capillarimètre L.C.P.C., l'autre, au-dessus, est le sol à étudier.

Au début de l'essai, tant que l'eau n'a pas atteint le second sol, les résultats sont analogues à l'«essai Kh » habituel, c'est-à-dire que la quantité d'eau absorbée est une fonction linéaire de la racine carrée du temps. Puis, lorsque l'eau atteint le second sol, la courbe varie brusquement; on a alors deux courbes qui se raccordent entre elles par un point anguleux.

Si l'on appelle:

- K_0, h_0, n_0 les caractéristiques du sol inférieur connu dont l'épaisseur est a ; et
- K_1, h_1, n_1 les caractéristiques du sol supérieur à essayer, la théorie montre que la vitesse d'absorption d'eau, quand on a atteint le second sol est donnée par:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{S}{a} \cdot K_0 \cdot h_1.$$

En mesurant la pente de la tangente au point anguleux de la courbe (dans les axes Q et t et non Q et \sqrt{t}), on obtient donc la valeur de $K_0 \cdot h_1$, c'est-à-dire celle de h_1 puisque K_0 est connu.

Enfin $K_1 h_1$ est connu par l'asymptote de la courbe $\frac{dQ}{d\sqrt{t}}$.

Conclusions

Ces quatre méthodes permettent de mesurer en laboratoire les caractéristiques capillaires des sols dans tous les cas qui peuvent se présenter. L'essai du «moule Kh » est actuellement le plus répandu en France, car d'un usage très commode. Mais le «capillarimètre L.C.P.C.» qui permet de mesurer rapidement et aisément les valeurs de K et h pour les sols pour lesquels ces valeurs sont utiles à connaître, paraît plus intéressant, et est sans doute l'appareil d'avenir à ce sujet.