

Mesure de la perméabilité des sols en place: un nouvel appareil pour la méthode Muntz une extension de la méthode Porchet aux sols hétérogènes

J. COLOMBANI

Directeur de Recherches, Mission O.R.S.T.O.M. en Tunisie,

J.-P. LAMAGAT

Chargé de Recherches, Bamako (Mali),

J. THIEBAUX

Hydrologue, Centre O.R.S.T.O.M. de Cotonou.

RÉSUMÉ.

L'auteur examine les méthodes de mesures de la perméabilité des sols en place, d'un point de vue hydrologique.

Dans une première partie, il décrit le nouvel appareillage mis au point avec son équipe au Centre O.R.S.T.O.M. de Lomé pour application de la méthode Muntz d'infiltration verticale sous charge d'eau constante, appareillage utilisant anneau de garde et un réglage semi-automatique du débit d'eau.

Dans une seconde partie, l'auteur procède à une analyse mathématique de la méthode Porchet d'infiltration horizontale à partir d'un trou plein d'eau; il montre que les résultats peuvent être interprétés même sur des sols hétérogènes multicouches et que les calculs sont simplifiés grâce à un programme sur ordinateur.

En conclusion, quelques résultats de mesures selon les deux méthodes décrites sont examinés sous l'analyse de la dispersion expérimentale et sous celui de l'influence des caractéristiques physiques et hydrodynamiques des sols.

ABSTRACT.

The author makes a general survey of the methods for measuring the soil permeability in the field, looking at them from the point of view of the hydrologist.

In the first part, he describes a new equipment built with his team at O.R.S.T.O.M. Center in Lomé, Togo, to apply the Muntz's method of vertical infiltration under constant charge, equipment using a double cylinder and a semi-automatic regulation of water discharge.

In a second part, the author makes a mathematical analysis of the Porchet's method of horizontal infiltration in a borehole full of water; he shows that the results may be interpreted even with heterogeneous (multilayered) soils and that the calculations are simplified using a computer program.

In matter of conclusion, dealing with some results of measurements obtained with the two described methods, the author examined their accuracy and their correlation with the physical and hydrodynamics characteristics of soils.

Le terme perméabilité que nous utilisons ici correspond en fait à la vitesse de filtration définie par DARCY et RITTER dans leur formule expérimentale $Q = KSI$ connue sous le nom de « Loi de Darcy », le coefficient K ou coefficient de Darcy a les dimensions d'une vitesse. PORCHET définissait le coefficient de perméabilité k comme la fraction du volume de sol accessible à l'eau en mouvement, c'est-à-dire comme le rapport entre le volume d'eau qui s'écoule du sol saturé (volume d'eau libre ou gravitaire) et le volume total dudit sol (assimilation à la porosité efficace). En réalité k coefficient de perméabilité a les dimensions d'une surface, dépend de la porosité et de la granulométrie du sol; il est lié à K par l'équation :

$$K = \frac{k \gamma}{\mu}$$

γ et μ étant respectivement le poids spécifique et la viscosité du fluide, ici l'eau.

Pour des raisons de commodité et de concision, nous préférons continuer à utiliser le terme « perméabilité » (ou « coefficient de perméabilité »), au lieu de « vitesse de filtration » ou de « coefficient de Darcy » pour désigner le coefficient K .

Selon les utilisateurs, l'emploi d'un coefficient de perméabilité est variable. Par exemple, l'ingénieur de Génie rural l'utilisera pour déterminer les possibilités et les modalités de l'irrigation et du drainage sur les sols travaillés. Pour les hydrologues, il s'agit essentiellement d'évaluer la capacité d'infiltration d'un sol travaillé ou naturel vis-à-vis de l'eau de pluie, et à l'occasion, d'évaluer les possibilités de déplacement de l'eau dans le sol au niveau des

nappes phréatiques. Nous nous limitons dans cet article à la mesure des perméabilités en place. En effet, si la mesure au laboratoire sur un échantillon remanié donne une valeur de la perméabilité caractéristique d'un sol et peut aider au classement des sols, la perméabilité ainsi déterminée n'a qu'un lointain rapport avec la perméabilité en place. Il y a bien des méthodes de prélèvement d'échantillons intacts en place pour la mesure au laboratoire, mais ces méthodes sont longues, délicates et coûteuses et sont en définitive peu adaptées à des mesures en grande série, nécessaires à l'hydrologue travaillant sur un bassin versant d'une certaine importance.

Deux méthodes assez dissemblables sont disponibles : la méthode de Muntz et la méthode Porchet.

Dans le cadre d'une étude de synthèse des bassins versants représentatifs de l'O.R.S.T.O.M., en Afrique de l'Ouest, les hydrologues de l'O.R.S.T.O.M. ont tenté de définir un certain nombre de paramètres du sol susceptibles d'avoir une influence sur le cycle hydrologique [1]. La perméabilité étant l'un de ces paramètres, sa mesure avait été préconisée selon la méthode Porchet pour des raisons de commodité [2]. En effet, le matériel nécessaire est simple, la méthode ne nécessite qu'une quantité d'eau raisonnable. Cependant, assez rapidement, l'emploi de la méthode Porchet nous a paru critiquable pour les raisons suivantes : l'eau utilisée s'infiltrant à partir d'un trou creusé dans le sol étudié, l'infiltration se fait horizontalement ou au moins obliquement ; la couche superficielle qui peut bien souvent être définie comme une « croûte » est détruite. Tout cela correspond plutôt mal avec l'infiltration d'une eau de pluie tombant sur un sol intact. Enfin, comme nous le verrons plus loin, l'interprétation qui était faite des essais Porchet nous a paru également insuffisante. Cela nous a conduit à mener, parallèlement aux mesures Porchet, des mesures par la méthode de Muntz qui semble suivre un schéma mieux comparable à l'infiltration de la pluie sur un bassin. Nous avons ainsi défini un nouvel appareillage de mesure Muntz décrit ci-après.

1. UN NOUVEL APPAREIL POUR LA MESURE DES PERMEABILITÉS D'UN SOL EN PLACE PAR LA MÉTHODE MUNTZ.

On mesure la hauteur d'eau infiltrée en fonction des temps sur une surface déterminée de sol, l'infiltration étant supposée se faire dans un cylindre de sol de section égale à la surface d'infiltration.

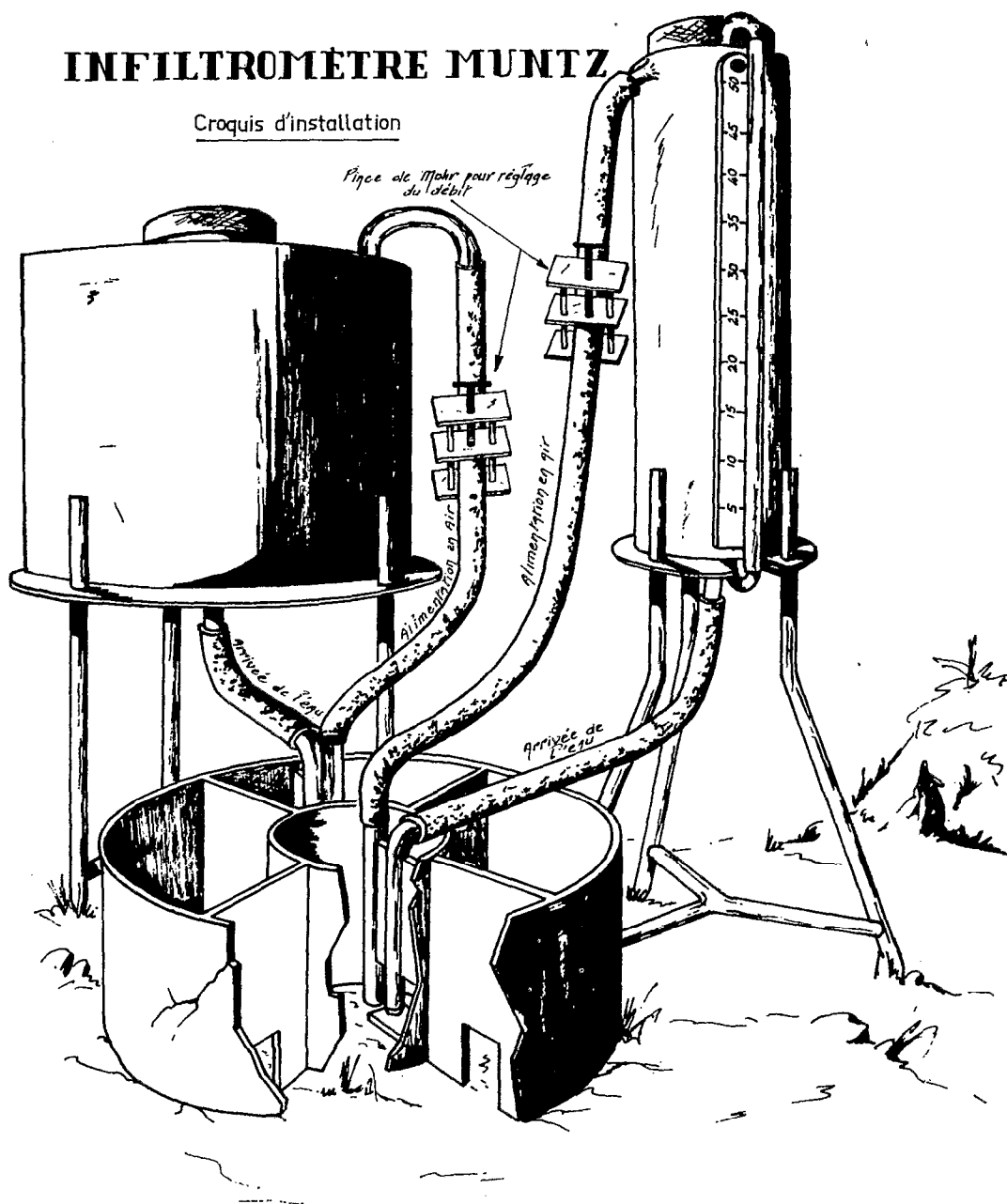
1.1. CARACTÉRISTIQUES DE L'APPAREIL UTILISÉ.

Depuis MUNTZ, FAURE et LAINE, inventeurs de la méthode, divers expérimentateurs ont repris, modifié et amélioré le premier dispositif. Les caractéristiques retenues ont été très variables et cela ne peut manquer d'influer fortement sur les résultats. Nous devons donc mettre en garde contre une comparaison sans précaution des résultats obtenus par les divers appareils utilisés. L'important est que pour une étude déterminée, l'appareillage soit standardisé afin de rendre les mesures comparables. Les principales caractéristiques de l'appareil sont pour nous : la charge d'eau constante sur le sol, la profondeur d'enfoncement des bords de l'infiltromètre dans le sol, le diamètre de la surface de mesure, le diamètre de l'anneau de garde. En ce qui concerne les deux premières caractéristiques, nous avons retenu celles déjà adoptées autrefois par MUNTZ : charge d'eau de 3 cm sur le sol, profondeur d'enfoncement de cylindres de 6 cm. L'anneau de garde est très important pour obtenir à la sortie de la surface de mesure des lignes de courant sensiblement verticales. Nous n'avons pas eu le loisir d'effectuer des mesures avec différents rapports de diamètre entre l'anneau de garde et l'anneau de mesure ; nous avons simplement constaté, dans un sol très sableux, que la perméabilité mesurée sans anneau de garde était surestimée de 100% par rapport à celle mesurée avec un anneau de garde de 320 mm de diamètre pour un anneau de mesure de 112 mm de diamètre.

Des expérimentateurs américains [3] ont montré qu'il fallait un anneau de garde d'un diamètre double de celui de l'anneau de mesure pour que la surestimation de la perméabilité soit moindre que 25%. En fait, l'accroissement du diamètre de l'anneau de garde est limité en pratique par la quantité d'eau consommée dans cet anneau et par la nécessité de disposer d'un engin maniable. Nous avons retenu pour notre appareil les diamètres de 320 mm et 112 mm indiqués plus haut (le diamètre de 112 mm était déjà celui retenu par MUNTZ qui ne semble pas, par contre, avoir utilisé d'anneau de garde). Le rapport des sections des anneaux de mesure et de garde est alors de 1 à 8. En définitive, l'appareil que nous avons mis au point avec J. P. LAMAGAT et J. THIEBAUX, au Centre O.R.S.T.O.M. de Lomé, Togo, dérive de celui de J.-L. THIAIS (O.R.S.T.O.M., Cayenne) ; des modifications très importantes ont été apportées : adjonctions d'un anneau de garde et d'un système d'alimentation automatique à deux orifices.

L'anneau de garde est rendu solidaire de l'anneau de mesure par quatre entretoises. Cela donne une plus grande rigidité à l'ensemble et réduit les risques de déformation lors de l'enfoncement dans le sol. Le contact de la base de ces entretoises avec le sol définit la profondeur correcte d'enfoncement (6 cm).

Les figures 1, 2 et 3 représentent une vue d'ensemble du dispositif de mesure et le plan d'exécution des différentes parties (voir également les photographies). L'appareil est réalisé de façon à ce que la hauteur de l'eau au-dessus du sol soit de 3 cm à 5 mm près au maximum dans le cas de perméabilités faibles entraînant un fonctionnement discontinu de l'alimentation en eau. Dans ces conditions, la profondeur de sol soumis à l'infiltration étant réputée grande par rapport à 3 cm, on admet que la charge d'infiltration est très voisine de 1. Le niveau de l'eau est réglé par l'affleurement d'un tube fixé à l'appareil et qui alimente en air par un tuyau souple le réservoir d'eau (par



d'après J. THIEBAUX (Cotonou Dec. 63)

Fig. 1.

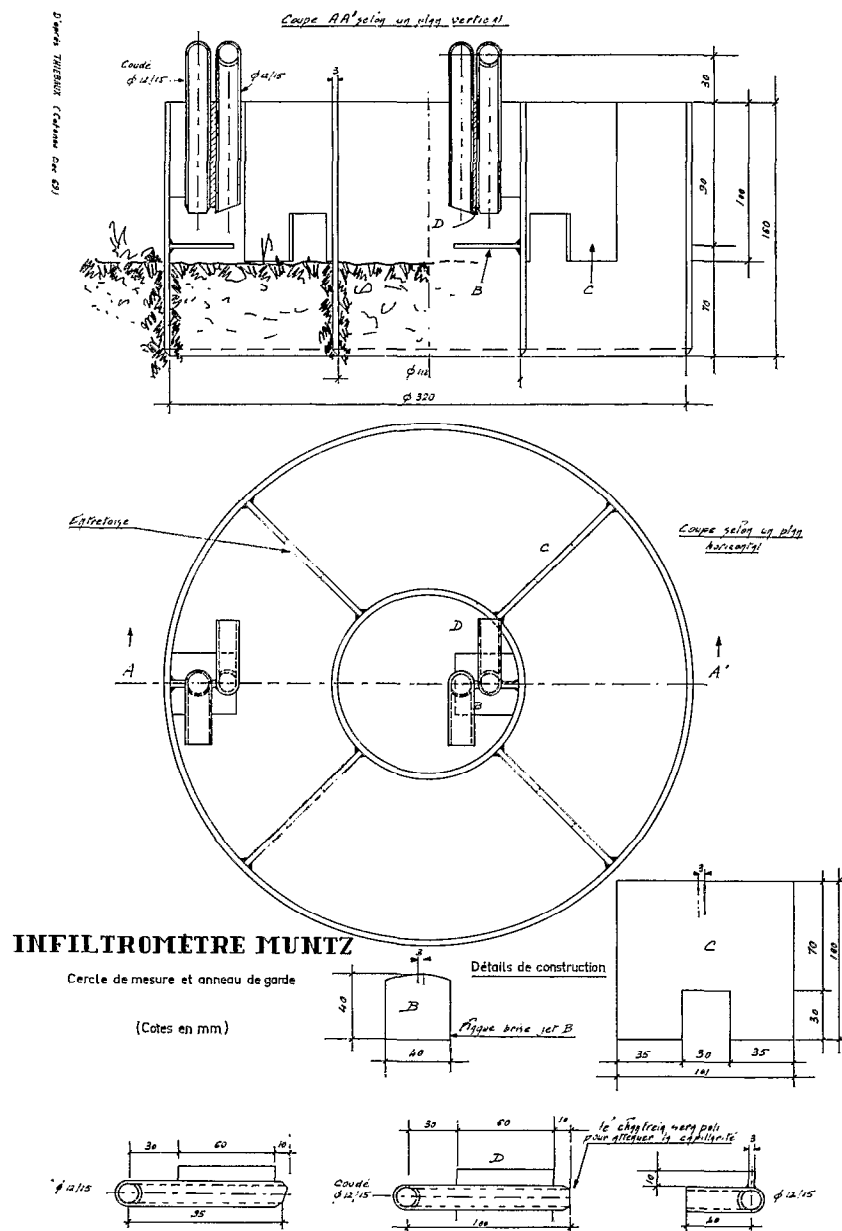


Fig. 2.

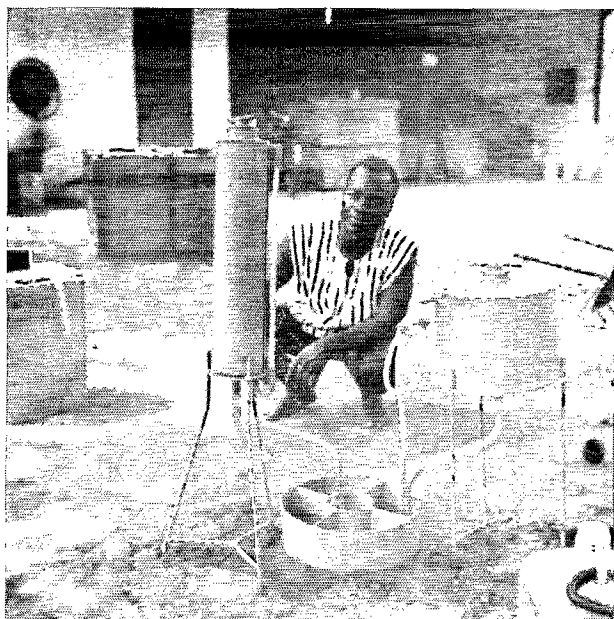


Photo 1. — Infiltromètre en position de fonctionnement avec ses réservoirs.

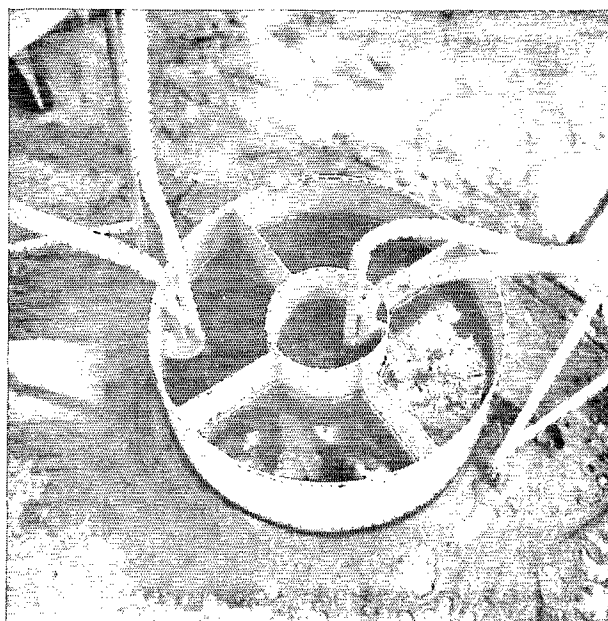


Photo 2. — Détail du cylindre et de son anneau de garde.

le sommet de ce réservoir) ; l'eau est amenée par un deuxième tuyau à partir de la base du réservoir et débouche dans l'anneau par un tube dont l'extrémité est à quelques millimètres au-dessous de l'orifice d'entrée d'air. Pour l'anneau de garde, le dispositif est analogue. Ce montage permet un réglage optimal du fonctionnement de l'appareillage quelle que soit la perméabilité, une pince de Mohr facilite le contrôle de la vitesse d'admission de l'air dans le réservoir, en vue d'éviter des oscillations trop prolongées et fortes du niveau d'eau. La hauteur infiltrée est déterminée grâce à un tube témoin transparent du niveau d'eau du réservoir, ce dernier ayant exactement le même diamètre que le cercle de mesure. Il est recommandé d'enduire l'extrémité du tube d'admission de graisse aux silicones pour réduire l'effet de capillarité. L'étanchéité des bouchons, indispensable, sera renforcée par la graisse aux silicones également.

1.2. EXÉCUTION DE LA MESURE.

1.2.1. Mise en place sur le terrain.

Il convient de choisir un emplacement à peu près plan et horizontal, la pente du terrain devant rester faible. Le cercle et l'anneau de garde sont enfoncés solidement de 6 cm ; la limite est repérée par le bas des entretoises qui doivent juste être au contact de la surface du sol. On utilise pour cela une pièce de bois disposée sur le haut de l'appareil et une petite masse en frappant de façon à enfoncer l'ensemble régulièrement sans basculement ; même dans un sol dur on arrive à enfoncer l'appareil de 6 cm, cependant, il est possible de rencontrer des difficultés sur un sol très caillouteux. Les tuyaux de raccordement ayant été branchés, les réservoirs sont remplis d'eau, les sorties d'eau des tuyaux étant obstruées avec les doigts. Lorsque les réservoirs sont pleins, on les referme et on laisse l'eau s'écouler en la freinant jusqu'à ce que le niveau d'équilibre soit atteint. Par la suite, les petites plaques de tôle fixées sous les orifices d'arrivée d'eau suffisent à éviter l'érosion de la surface du sol. L'appareil est alors en fonctionnement.

On observe la manière dont se fait l'écoulement de l'eau. Deux cas sont à considérer selon que l'on a affaire à des sols perméables ou à des sols relativement peu perméables.

1.2.2. Mesures en sols perméables.

Il s'agit de sols dont le coefficient de perméabilité K est par exemple de l'ordre de $150 \cdot 10^{-6}$ à $200 \cdot 10^{-6}$ m/s. Dans ce cas le débit est suffisamment élevé pour qu'on obtienne, en réglant l'admission d'air, un débit d'eau continu. On procède alors à la mesure des hauteurs d'eau sur l'index du réservoir toutes les 30 secondes ou toutes

INFILTROMÈTRE MUNTZ

Réervoir de 5 litres et son support

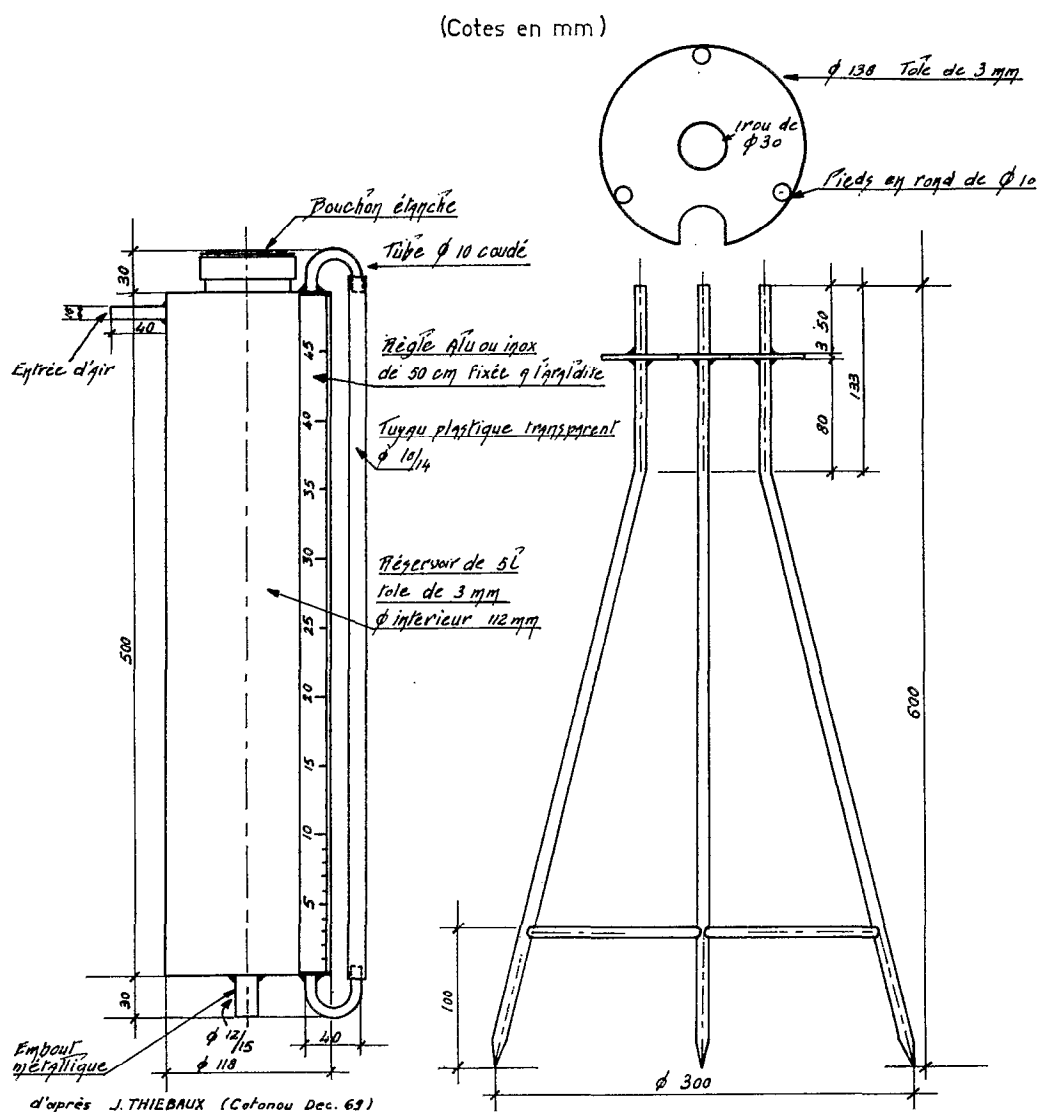


Fig. 3.

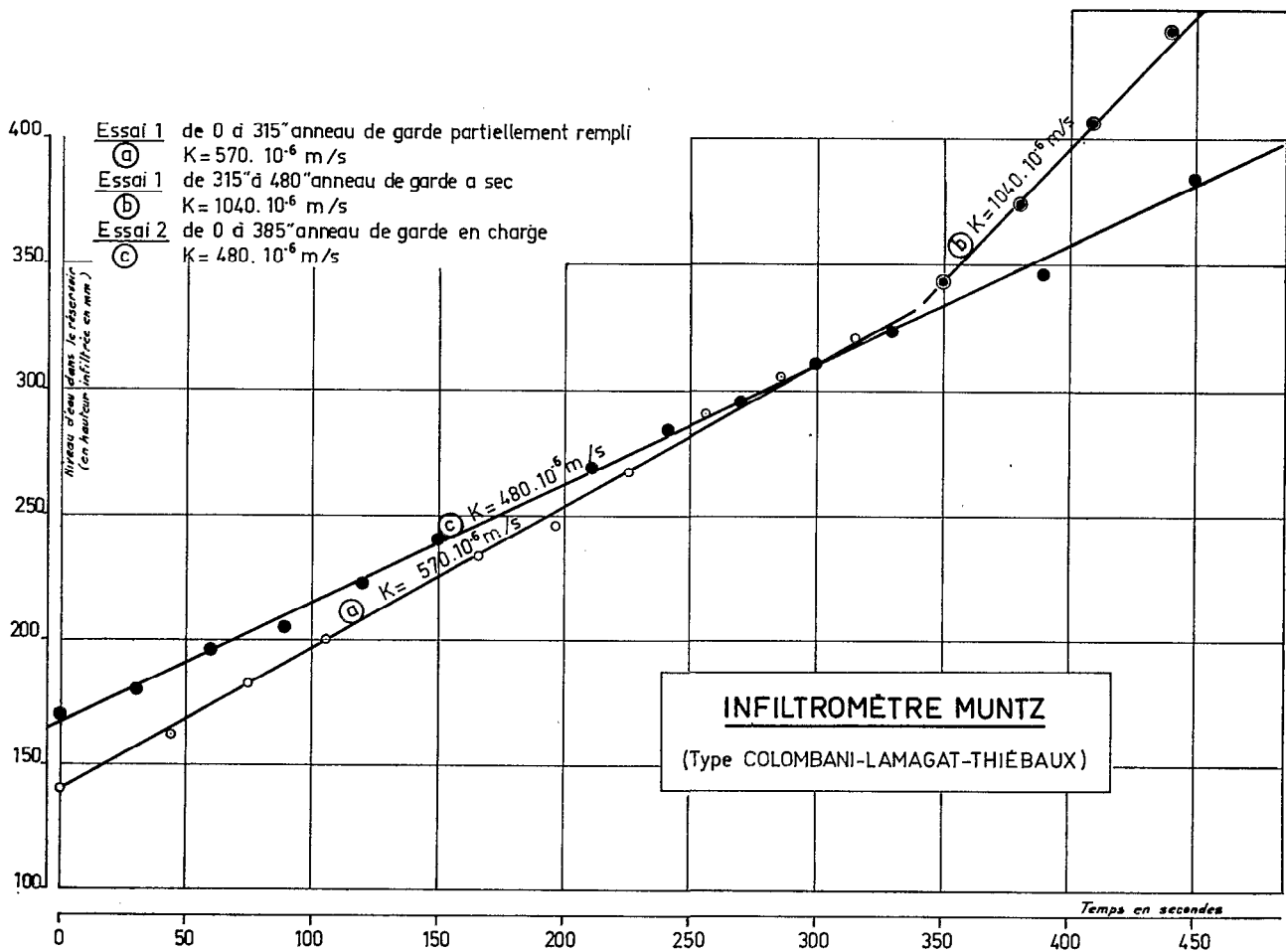


Fig. 4. — Influence de l'anneau de garde sur la perméabilité.

les minutes par exemple. La mesure se poursuit jusqu'à ce que l'on obtienne une vitesse d'infiltration stable. On reporte les points de mesure sur un graphique et il est facile de tracer un ou plusieurs tronçons de droite définissant les perméabilités (fig. 4). Il est recommandé de le faire pendant la mesure.

1.2.3. Mesures en sols relativement peu perméables.

Il s'agit de sols dont le coefficient de perméabilité K est, par exemple, inférieur à $50 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$. Nous n'indiquons pas de limite précise, car la limite expérimentale coïncide avec la possibilité d'obtenir un écoulement permanent ou non. Dans la négative, l'écoulement étant discontinu, il est préférable d'opérer une mesure de temps (déterminer le temps à la seconde près avec une montre à trotteuse centrale ou un chronomètre à deux aiguilles) et une mesure de niveau après le déclenchement des remplissages automatiques juste au moment où le niveau de l'eau dans le réservoir a repris son équilibre.

Il n'est pas interdit de ne faire des mesures que tous les trois ou quatre déclenchements ou plus même. En effet, les mesures de temps ou de niveau sont cumulatives et lorsque la vitesse d'infiltration est stabilisée, les points représentatifs de mesure sont tous sur une même droite. Cela permet éventuellement, si l'infiltration est lente, de procéder en même temps à d'autres mesures (à une certaine distance de l'appareil). Notons aussi que, pour la même raison, les erreurs de lectures de temps et de niveau se compensent automatiquement dans une série de mesures suffisamment longue.

1.2.4. *Durée de la mesure.*

La durée de la mesure est très variable : sur un sol très perméable, on obtient une vitesse d'infiltration stable en 10 mn ou moins. On peut recommencer l'opération lorsque le réservoir est vide, mais il est généralement inutile de recommencer plus de deux fois. La perméabilité mesurée sur de tels sols perméables au cours des deux ou trois premières minutes ne dépasse pas plus de 5 ou 10% celle que l'on obtient après stabilisation complète de l'infiltration entre la quatrième et la dixième minute de l'essai poursuivi.

Sur un sol moins perméable, la durée de l'opération augmente et peut atteindre une demi-heure. Dans le cas d'un sol très imperméable, on peut être amené à prolonger l'opération une heure sinon plus. La figure 5 donne un exemple d'infiltration en sols peu perméables (stabilisation après 17 mn environ).

En fait, chaque essai de terrain est un cas d'espèce et il nous paraît difficile de donner une règle de conduite unique, l'opportunité de prolonger ou de renouveler une mesure devant être appréciée au cours de la mesure.

INFILTROMÈTRE MUNTZ

(Type COLOMBANI-LAMAGAT-THIEBAUX)

Essai sur sol peu perméable

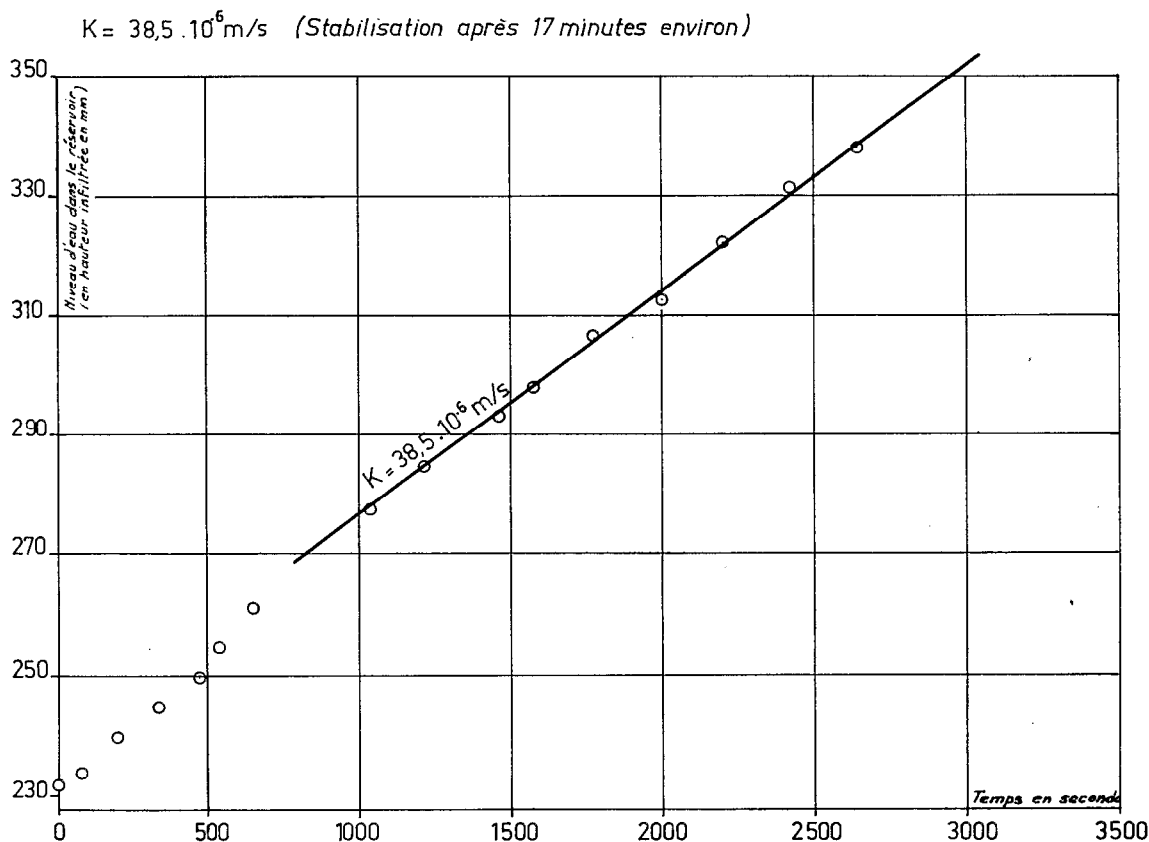


Fig. 5.

Le réservoir utilisé pour le cercle de mesure a un volume de 5 l d'eau, et tel que l'appareil est construit, on dispose d'une hauteur de mesure de 40 cm environ ; avec une perméabilité $K = 20 \cdot 10^{-6}$ m/s par exemple, cela fait une durée d'infiltration t de 20 000 s (plus de 5 h) :

$$\begin{array}{ll} \text{avec } K = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s} & t = 80\,000 \text{ s} \\ \text{avec } K = 200 \cdot 10^{-6} \text{ m/s} & t = 2\,000 \text{ s (plus de 30 mn)} \end{array}$$

En principe, ce réservoir est donc suffisant. Le réservoir de l'anneau de garde de 30 l est, lui aussi, suffisant et il est toujours possible de le remplir en cours de mesure en bouchant le tuyau de sortie de l'eau. Ainsi, en général, un volume de 35 l d'eau suffit-il pour une mesure ; c'est évidemment un volume important dans le cas où il y a peu d'eau disponible à proximité, et la méthode Muntz ne sera sans doute pas applicable partout.

1.2.5. Remarques concernant les résultats obtenus par la méthode Muntz.

Nous avons voulu nous rendre compte du volume de sol atteint par l'eau au cours de la mesure. Des coupes dans le sol, faites après la mesure, ont permis de voir que l'anneau de garde réduisait sensiblement l'étalement des filets liquides à la sortie du cercle de mesure (fig. 6) Ceci est déjà un résultat intéressant. Par ailleurs, la surface du sol est perturbée au minimum lors de l'enfoncement de l'appareil si l'opération est menée correctement. On peut évidemment craindre un tassement dans des sols très argileux et déjà humides ; mais cependant la préservation de la croûte superficielle est assurée ce qui est très important, car cette croûte peut être nettement moins perméable que le reste du sol. Le dépouillement des mesures et le contrôle sont faits simultanément avec la mesure et cela permet de recommencer l'opération, de la prolonger si nécessaire et aussi de l'arrêter au moment opportun. Les points faibles sur le plan pratique de cette méthode sont les volumes d'eau consommée et l'impossibilité de faire des mesures sur pente trop forte.

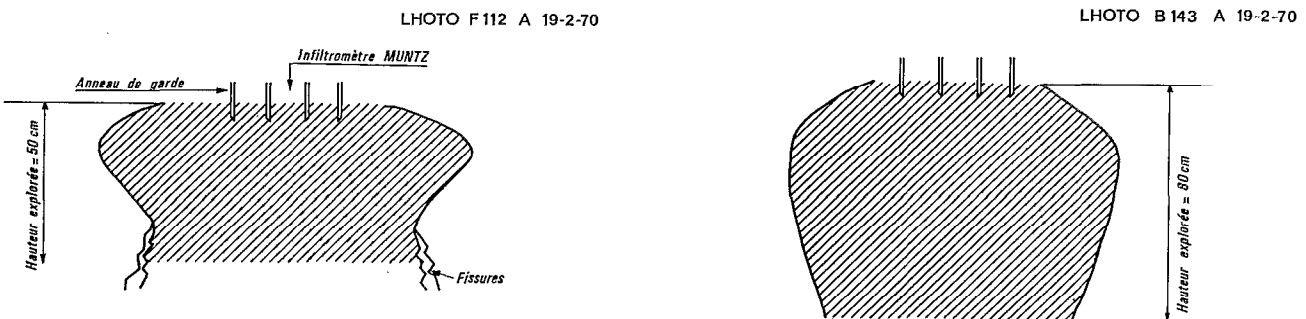


Fig. 6. — Limite de la zone humide après essai Muntz.

2. LA MÉTHODE PORCHET EXAMINÉE SOUS L'ANGLE MATHÉMATIQUE.

2.1. EXPLOITATION CLASSIQUE D'UNE MESURE PORCHET.

Ayant creusé à la tarière un trou cylindrique de diamètre $2R$ et de profondeur PM (PM étant la moyenne des profondeurs avant et après la mesure), l'expérimentateur emplit le trou une première fois, puis après infiltration, le remplit une deuxième fois et note la cote du plan d'eau en fonction du temps au cours de la deuxième infiltration. Les résultats sont portés sur un graphique semi-logarithmique (en abscisses linéaires : les temps, en ordonnées logarithmiques : l'expression $(h + R/2)$, h étant la hauteur du plan d'eau au-dessus du fond du trou). On obtient généralement des points situés sur une courbe que l'on peut décomposer en plusieurs segments de droite. L'interprétation classique consiste à déclarer que les segments de droite successifs obtenus correspondent à des états de saturation croissante du sol, la perméabilité en sol humide étant calculée d'après la pente du dernier segment de droite. C'est cette perméabilité qui est conforme aux hypothèses de la loi de Darcy, et qui correspond à la « vitesse de filtration » K . Mathématiquement, cela s'explique de la façon suivante :

Le sol est supposé être de perméabilité homogène. A un instant t la cote de la surface de l'eau au-dessus du fond est h (fig. 7).

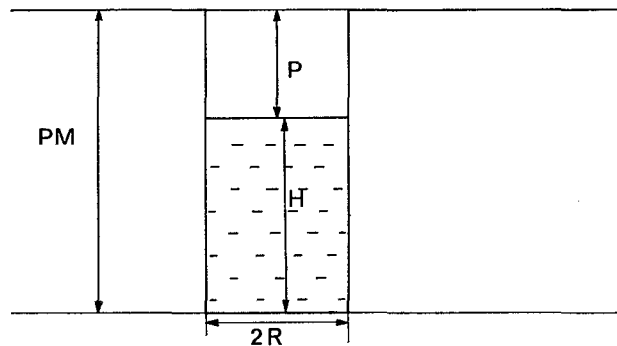


Fig. 7. — Sol homogène.

Le débit d'eau dans le trou peut s'exprimer de deux façons différentes : soit par la relation $Q = -\frac{dh}{dt} \times \pi R^2$, ($-\frac{dh}{dt}$ est la vitesse de descente du plan d'eau à l'instant t , πR^2 la section du trou), soit, d'après la loi de Darcy, $Q = K S i$, $S = 2 \pi R h + \pi R^2$ étant la surface d'infiltration, et i la charge estimée voisine de 1, la charge au-dessus du sol étant faible par rapport à l'épaisseur du sol traversé (elle serait égale à 1 rigoureusement si l'épaisseur était infinie). En égalant ces deux expressions, on a :

$$\pi R^2 \frac{dh}{dt} = K (2 \pi R h + \pi R^2)$$

$$\frac{dh}{h + \frac{R}{2}} = \frac{2 K}{R} dt,$$

soit en intégrant membre à membre :

$$L \left(h + \frac{R}{2} \right) = A - \frac{2 K}{R} t \quad (1)$$

avec :

$$A = L \left(PM + \frac{R}{2} \right)$$

$L \left(h + \frac{R}{2} \right)$ est une fonction linéaire de t , la pente de la droite représentative étant proportionnelle à K . Il est facile de déterminer K par le calcul ou graphiquement à l'aide d'une grille de droites correspondant à des perméabilités connues et convenablement échelonnées.

Critique de cette interprétation : mathématiquement, nous n'avons rien à reprocher à cette interprétation, l'approximation $i = 1$ paraissant justifiée. Mais la démonstration nécessite une hypothèse qui nous paraît davantage critiquable : le sol doit être *homogène* pour avoir une perméabilité sensiblement constante en tout point. Même sur une profondeur de 50 cm, cette hypothèse paraît injustifiée de façon très générale, au moins en Afrique de l'Ouest.

Les nombreuses mesures que nous avons effectuées au Togo et au Dahomey en 1969, 1970 et 1971 nous permettent d'affirmer que les 10 à 20 premiers centimètres du sol sont beaucoup plus perméables que les couches sous-jacentes. Au-dessous de 20 cm, le sol n'est pas non plus toujours homogène.

Notre attention avait été attirée sur ce fait par des mesures Porchet effectuées au bord d'un champ d'ignames au Dahomey. Les mesures s'effectuaient en trois points différents distants de 2 à 3 mètres ; l'un des points situé dans le champ proprement dit donnait à la perméabilité une valeur constante limite très rapidement, sans pente excessive du graphique au début de la mesure ; par contre, les mesures faites aux deux autres points situés dans le terrain en jachère bordant le champ conduisaient à des graphiques à très forte pente au début de la mesure. L'explication, à notre avis, était simple : le paysan, pour dresser ses buttes d'ignames, avait décapé le sol sur environ 15 cm, découvrant ainsi une couche bien moins perméable que celle de la surface. Un test a été fait avec la méthode Muntz employée simultanément et qui, toujours ou presque, nous donne des valeurs de perméabilité bien supérieures à celles obtenues par la méthode Porchet. Ces mesures Muntz faites en surface donnaient des valeurs de l'ordre de $300 \cdot 10^{-6}$ m/s en dehors du champ (terrain non décapé) et de $20 \cdot 10^{-6}$ m/s dans le champ (terrain décapé).

Nous avons creusé dans le sol en jachère une fosse de 15 cm de profondeur avec précaution de façon à *ne pas tasser* le sol. Puis nous avons effectué une mesure Muntz au fond de la fosse. La perméabilité mesurée n'était plus que de $40 \cdot 10^{-6}$ m/s. Plus tard, nous avons repris des essais analogues dans le Sud Togo sur les « Terres de Barre », avec des résultats identiques. Que la couche superficielle du sol soit plus perméable n'a rien d'étonnant du fait des actions auxquelles elle est soumise (travail des termites et d'insectes divers, travail des paysans qui ne labourent jamais très profondément, etc.).

Ces constatations expérimentales nous ont amené à remettre en question l'hypothèse du sol homogène et, par conséquent, à élaborer une nouvelle interprétation des mesures Porchet en faisant l'hypothèse d'un sol à couches multiples de perméabilités différentes.

2.2. ÉTUDE DU CAS D'UN SOL A COUCHES MULTIPLES (fig. 8).

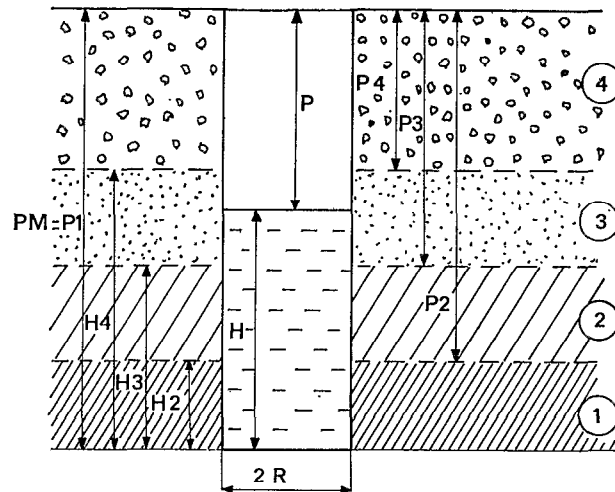


Fig. 8. — Sol à quatre couches.

Nous allons supposer dans ce qui suit que le sol est composé de n couches de perméabilités $K(n)$, les surfaces des séparations ayant des profondeurs $P_2, P_3, P_4, \dots, P(n+1)$, l'indice 1 étant affecté à la couche la plus profonde.

PM est toujours la profondeur totale moyenne du trou creusé à la tarière, $2R$ le diamètre de ce trou, $K(n)$ est la perméabilité de la couche comprise entre les surfaces de séparation n et $n+1$. On a $P_2 < P_1 \leq PM$; rien n'empêche de prendre $P_1 = PM$.

Lorsque la surface de l'eau dans le trou est parvenue au-dessous de la surface de séparation de profondeur P_2 nous retrouvons le cas d'un sol à couche unique de perméabilité homogène K_1 et, par conséquent, la formule précédente (a) est valable :

$$L \left(h + \frac{R}{2} \right) = - \frac{2 K}{R} t + A \quad (1)$$

En connaissant deux couples de valeurs des variables P et t pour cette couche soit par exemple P_2, t_2 et P_1, t_1 , on peut écrire :

$$L \left(h_1 + \frac{R}{2} \right) = - \frac{2 K_1}{R} t_1 + A$$

et

$$L \left(h_2 + \frac{R}{2} \right) = - \frac{2 K_1}{R} t_2 + A$$

En effectuant une soustraction membre à membre, on a :

$$L \left(h_2 + \frac{R}{2} \right) - L \left(h_1 + \frac{R}{2} \right) = \frac{2 K_1}{R} (t_1 - t_2)$$

soit

$$L \frac{\left(h_2 + \frac{R}{2} \right) - \left(h_1 + \frac{R}{2} \right)}{\left(h_1 + \frac{R}{2} \right)} = \frac{2 K_1}{R} (t_1 - t_2)$$

$$\text{d'où} \quad K_1 = \frac{R}{2(t_1 - t_2)} \quad L \frac{\left(h_2 + \frac{R}{2}\right)}{\left(h_1 + \frac{R}{2}\right)}$$

Ce qui peut encore s'écrire :

$$K_1 = \frac{R}{2(t_1 - t_2)} \quad L \frac{\left(PM - P_2 + \frac{R}{2}\right)}{\left(PM - P_1 + \frac{R}{2}\right)}$$

et si

$$P_1 = PM,$$

$$K_1 = \frac{R}{2(t_1 - t_2)} \quad L \frac{P_1 - P_2 + \frac{R}{2}}{\frac{R}{2}}$$

K_1 étant connu, voyons ce qui se passe lorsque la profondeur P de la surface de l'eau dans le trou est telle que $P_3 \leq P \leq P_2$. Il est toujours possible d'écrire que le débit s'exprime soit par :

$$Q = -\pi R^2 \frac{dh}{dt}$$

soit par :

$$Q = K_1 S_1 i + K_2 S_2 i$$

$$S_1 = 2\pi R h_2 + \pi R^2 \text{ est la superficie du trou dans la couche 1}$$

$$S_2 = 2\pi R (h - h_2) \text{ est la superficie du trou dans la couche 2}$$

$$Q_1 = K_1 S_1 \text{ est le débit dans la couche 1}$$

$$Q_2 = K_2 S_2 \text{ celui dans la couche 2.}$$

On peut encore écrire :

$$-\pi R^2 \frac{dh}{dt} = K_1 (2\pi R h_2 + \pi R^2) + K_2 [2\pi R (h - h_2)]$$

Après simplification on obtient :

$$-\frac{dh}{dt} = \frac{2}{R} \left[K_1 \left(h_2 + \frac{R}{2} \right) + K_2 (h - h_2) \right]$$

si on pose $C_2 = K_1 \left(h_2 + \frac{R}{2} \right) = \text{constante}$, on a :

$$-\frac{dh}{dt} = \frac{2}{R} [C_2 + K_2 (h - h_2)]$$

soit :

$$-\frac{dh}{K_2 (h - h_2) + C_2} = \frac{2}{R} dt$$

après intégration on obtient :

$$-\frac{1}{K_2} L [K_2 (h - h_2) + C_2] = \frac{2}{R} t + A$$

puis en passant aux profondeurs des couches :

$$-\frac{1}{K_2} L [K_2 (P_2 - P) + C_2] = \frac{2}{R} t + A$$

en donnant à P et t les valeurs P_2 , t_2 et P_3 , t_3

On obtient :

$$-\frac{1}{K_2} L C_2 = \frac{2}{R} t_2 + A$$

Ainsi que :

$$-\frac{1}{K_2} L [K_2 (P_2 - P_3) + C_2] = \frac{2}{R} t_3 + A$$

Enfin en soustrayant membre à membre :

$$\frac{1}{K_2} L [K_2 (P_2 - P_3) + C_2] - L C_2 = \frac{2}{R} (t_2 - t_3)$$

soit :

$$\frac{1}{K_2} L \left[\frac{K_2 (P_2 - P_3) + C_2}{C_2} \right] = \frac{2}{R} (t_2 - t_3) \text{ (Equation 2)}$$

L'équation (2) est une équation implicite en K_2 dont une racine donne la valeur K_2 recherchée ; elle peut encore s'écrire :

$$L \left[\frac{K_2 (P_2 - P_3) + C_2}{C_2} \right] = \frac{2 K_2}{R} (t_2 - t_3)$$

Nous verrons plus loin comment résoudre cette équation. Si nous supposons K_1 et K_2 maintenant connues, on pourra passer à la troisième couche de perméabilité K_3 . Il est ici aussi possible d'écrire :

$$Q = -\pi R^2 \frac{dh}{dt} = K_1 S_1 + K_2 S_2 + K_3 S_3$$

avec :

$$S_3 = 2 \pi R (h - h_3)$$

En poursuivant un calcul analogue à celui utilisé pour la couche 2 et en posant :

$$C_3 = K_1 \left(PM - P_2 + \frac{R}{2} \right) + K_2 (P_2 - P_3)$$

on obtient l'équation (3) :

$$L \left[\frac{K_3 (P_3 - P_4) + C_3}{C_3} \right] = \frac{2 K_3}{R} (t_3 - t_4)$$

équation identique à (2) en remplaçant l'indice 2 par l'indice 3 et l'indice 3 par l'indice 4.

De façon générale, la perméabilité K_m de la couche m sera racine de l'équation (4) :

$$L \left[\frac{K_m (P_m - P_{m+1} + C_m)}{C_m} \right] = \frac{2 K_m}{R} (t_m - t_{m+1})$$

dans laquelle :

$$C_m = C_{m-1} + K_{m-1} (P_{m-1} - P_m) \quad \text{(Equation 5)}$$

Si on écrit l'équation (5) pour les différentes valeurs décroissantes de l'indice à partir de m on a :

$$\begin{aligned} C_m &= C_{m-1} + K_{m-1} (P_{m-1} - P_m) \\ C_{m-1} &= C_{m-2} + K_{m-2} (P_{m-2} - P_{m-1}) \\ &\text{etc...} \\ C_4 &= C_3 + K_3 (P_3 - P_4) \\ C_3 &= C_2 + K_2 (P_2 - P_3) \\ C_2 &= K_1 (P_1 - P_2) + \frac{K_1 R}{2} \text{ si } PM = P_1 \end{aligned}$$

En additionnant membre à membre, on obtient l'équation (6) :

$$C_m = \sum_{i=1}^{i=m-1} \left[K_i (P_i - P_{i+1}) \right] + K_1 \frac{R}{2}$$

Les équations (4) et (6) permettent de calculer de proche en proche les coefficients de perméabilités K en partant de la couche la plus profonde.

Il nous reste à prouver que l'équation implicite (4) permet le calcul de K_n . On peut utiliser un calcul itératif de la façon suivante :

On pose :

$$y = L \left[\frac{x (P_m - P_{m+1}) + C_m}{C_m} \right]$$

et :

$$z = \frac{2x}{R} (t_m - t_{m+1})$$

avec :

$$x = K_m$$

y est une fonction logarithmique qui tend vers $-\infty$ pour x tendant vers $-\frac{C_m}{P_m - P_{m+1}}$, qui s'annule pour $x = 0$ (puisque $I_1 = 0$) et enfin qui tend vers $+\infty$ pour x tendant vers $+\infty$

z est une droite de pente $\frac{2}{R} (t_m - t_{m+1})$ passant par l'origine des coordonnées (fig. 9).

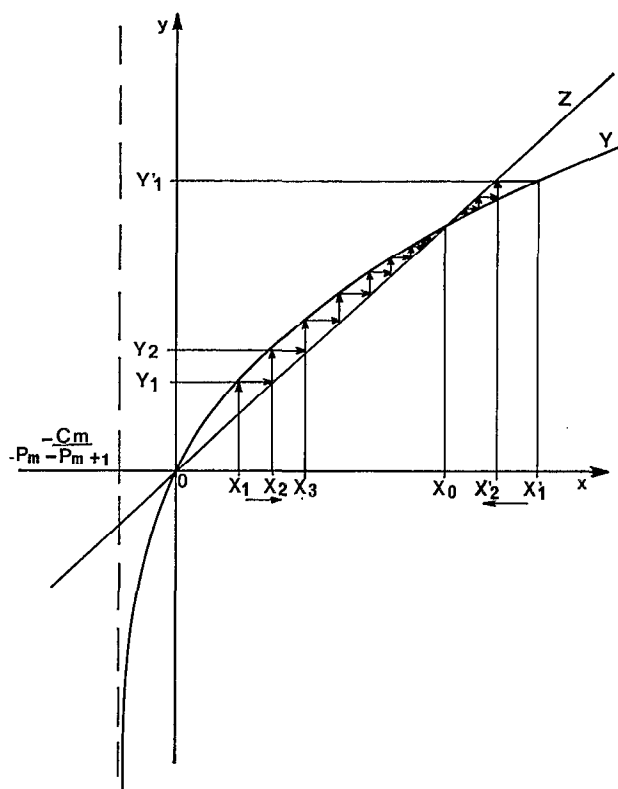


Fig. 9. — Résolution de l'équation implicite de calcul de la perméabilité K_n de la n° couche d'un sol.

L'équation $z = y$ admet une première racine $x = 0$ et une deuxième racine positive. En effet, nous pouvons démontrer facilement que les 2 courbes représentatives de y et z sont disposées comme indiqué sur la figure 9.

Il suffit pour cela que la pente de la droite z soit inférieure à la pente de la tangente à l'origine à la courbe représentative de y , soit que :

$$\frac{2}{R} (t_m - t_{m+1}) \leq \frac{P_m - P_{m+1}}{C_m}$$

en multipliant par πR^2 on obtient :

$$2 \pi R (t_m - t_{m+1}) \leq \pi R^2 \frac{(P_m - P_{m+1})}{C_m}$$

$$2 \pi R C_m (t_m - t_{m+1}) \leq \pi R^2 (P_m - P_{m+1})$$

$$\pi R^2 (P_m - P_{m+1}) = V_m,$$

volume de la portion de trou situé dans la couche m .

$$2 \pi R C_m (t_m - t_{m+1}) \leq V_m$$

Or, selon l'équation (6) :

$$C_m = \sum_{i=1}^{i=m-1} [K_i (P_i - P_{i+1})] + K_1 \frac{R}{2}$$

donc :

$$2 \pi R \left[\sum_{i=1}^{i=m-1} [K_i (P_i - P_{i+1})] + K_1 \frac{R}{2} \right] (t_m - t_{m+1}) \leq V_m$$

$$\left[K_1 \pi R^2 + \sum_{i=1}^{i=m-1} [2 \pi R K_i (P_i - P_{i+1})] \right] (t_m - t_{m+1}) \leq V_m.$$

S_i étant la surface latérale du trou à la traversée de la couche i , on peut encore écrire :

$$2 \pi R K_i (P_i - P_{i+1}) = S_i K_i$$

D'après la loi de Darcy $Q_i = K_i S_i$ débit filtrant à travers la couche i .

En définitive, étant donné que $K_1 \pi R^2$ est le débit du fond du trou soit Q_f , nous devons vérifier l'inégalité :

$$\left[Q_f + \sum_{i=1}^{i=m-1} [Q_i] \right] (t_m - t_{m+1}) \leq V_m.$$

La partie gauche de cette inégalité représente le volume V_i d'eau infiltré dans les couches 1 à $m-1$ pendant le temps $t_m - t_{m+1}$, c'est-à-dire le temps que met la surface de l'eau pour parcourir la couche $m-1$.

On doit donc vérifier l'inégalité : $V_i \leq V_m$, ce qui est évident si on admet que la couche m n'est pas totalement imperméable puisqu'une partie du volume d'eau V_m correspondant à l'épaisseur de la couche m doit s'infiltrer dans cette couche. Ceci n'est plus vérifié dans le cas où la perméabilité de la couche m est nulle. Dans ce cas limite, $V_i = V_m$ et la droite z est tangente à la courbe y à l'origine l'équation implicite admettant une racine double nulle $x = 0$, ou $K_m = 0$.

En définitive, on aura toujours une droite de pente inférieure ou égale à la tangente à l'origine à la courbe (fig. 9).

L'équation implicite admet donc une racine nulle (sans intérêt) et une deuxième racine généralement non nulle et positive.

Cette racine x_0 peut être obtenue par un calcul itératif. En effet, reportons-nous à la figure 9 ; on donne à x une valeur $x_1 < x_0$ et on calcule :

$$y_1 = L \left[\frac{x_1 (P_m - P_{m+1}) + C_m}{C_m} \right]$$

On donne à z la valeur $z_2 = y_1$ et on en déduit x_2 — on voit graphiquement que $x_1 < x_2 < x_0$.

On calcule $y_2 = f(x_2)$ puis x_3 correspondant à $z_3 = y_2$ et ainsi de suite, la valeur x_j obtenue se rapproche constamment de x_0 racine de l'équation sans jamais l'atteindre. L'écart $x_0 - x_j$ peut être rendu aussi faible que l'on veut en effectuant un nombre suffisant d'itérations.

Si x est choisi initialement égale à x'_1 supérieur à x_0 , x'_2 deuxième valeur obtenue comme précédemment sera telle que $x_0 < x'_2 < x'_1$ et là encore, nous pourrions obtenir une valeur aussi approchée que souhaitée de x_0 . Ce calcul peut se faire à la règle à calcul mais c'est évidemment une opération particulièrement longue. Nous avons donc mis au point un programme de calcul sur ordinateur (PBH 599-DRE, O.R.S.T.O.M., Tunis) qui calcule les perméabilités des couches successives d'un sol supposé composé de 5 couches de perméabilités différentes au maximum. Ce programme est donné en annexe ainsi que le modèle de carte mécanographique support des données nécessaires pour le traitement d'un essai Porchet.

Tout ce qui précède repose sur l'hypothèse que le sol est composé de couches successives de perméabilités constantes et différentes d'une couche à l'autre. Ceci est bien sûr théorique, et dans la réalité la perméabilité varie graduellement avec la profondeur. Il peut être admis que des couches de perméabilités lentement variables peuvent être individualisées après examen pédologique ; le sol est ainsi compartimenté en couches de perméabilités moyennes sensiblement différentes d'une couche à l'autre.

En pratique, on peut opérer comme suit :

L'essai Porchet est mené selon le protocole Bouchard [2]. Un premier remplissage du trou est effectué ; après écoulement, on remplit à nouveau le trou et la mesure commence immédiatement, en s'efforçant d'obtenir des mesures assez nombreuses au début de l'écoulement. Après la mesure, on porte sur un graphique semi-logarithmique $L \left(h + \frac{R}{2} \right)$ en ordonnées et t en abscisses ; on obtient une courbe telle que celle représentée sur la figure 10. En général, le bas de la courbe peut être assimilé très sensiblement à une droite. Le reste de la courbe se redresse progressivement vers le haut. La séparation entre la couche inférieure et le reste du profil est prise au point de tangence de cette droite limite avec le reste de la courbe. Il convient alors de préciser si possible les séparations des autres couches, le programme de calcul travaillant à partir des coordonnées de ces séparations. Dans le cas où un pédologue collabore avec l'hydrologue, le repérage des horizons des perméabilités sensiblement différentes doit pouvoir se faire assez facilement. Si l'hydrologue effectue ce travail seul, il peut aussi observer les matériaux retirés du trou et essayer d'en déduire les limites éventuelles des couches.

Enfin, si l'on traite des données sans aucun renseignement sur la nature du sol, on peut opérer en effectuant une séparation arbitraire en 5 couches (seule la couche inférieure étant délimitée avec une certaine précision). Un premier passage à l'ordinateur donne 5 coefficients de perméabilité K_1 à K_5 . On adopte dans ce cas pour hypothèse que la perméabilité croît de la couche inférieure à la couche supérieure, hypothèse généralement justifiée (mais il y a des exceptions bien sûr). Si dans la suite K_1 à K_5 un coefficient K_j est très nettement inférieur à un coefficient K_{i-1} , par exemple $K_i = 50 \cdot 10^{-9}$ m/s et $K_{i-1} = 120 \cdot 10^{-6}$ m/s, il faut admettre que la séparation entre les couches i et $i-1$ est injustifiée et recommencer le traitement en groupant les couches i et $i-1$ en une seule. Par ces retouches, on parvient rapidement à diviser le profil de sol de façon raisonnable du point de vue perméabilité. Cependant, il est bien évident que les résultats dans ce cas restent estimatifs et qu'il vaut mieux opérer sur des sols déjà décrits par un pédologue. Il faut également noter que la perméabilité est assez peu précise pour la couche de surface où l'infiltration est souvent trop rapide pour obtenir une mesure précise de la vitesse de descente.

2.3. REMARQUES SUR LA MÉTHODE PORCHET UTILISÉE AVEC UN NIVEAU D'EAU CONSTANT.

J. CALLEDE, hydrologue O.R.S.T.O.M. (Centre de Bangui, R C A), préoccupé par la difficulté d'effectuer des mesures dans un sol très perméable, propose une variante de la méthode Porchet dans laquelle le niveau d'eau dans le trou est maintenu constant. Bien qu'en utilisant un matériel adéquat, on puisse effectuer des mesures Porchet classiques dans des sols très perméables (perméabilités de l'ordre de $200 \cdot 10^{-6}$ m/s par exemple), il faut reconnaître que cette variante a un avantage certain : le calcul de K est très simple et peut être fait immédiatement.

Mais on peut faire à cette variante la même critique qu'à la procédure Bouchard d'exploitation des résultats, quant aux hypothèses : le sol y est supposé homogène, c'est-à-dire que l'on obtient seulement une perméabilité « moyenne » de sol. On peut voir sur un exemple ce que cela veut dire : supposons qu'un sol soit composé de trois couches de perméabilités K_1 , K_2 et K_3 d'épaisseur E_1 , E_2 et E_3 .

$E_1 + E_2 + E_3 = H$ hauteur totale du trou (K_1 est la couche la plus profonde, K_3 la couche en surface). Les surfaces d'infiltration des trois couches sont :

$$\begin{aligned} S_1 &= 2 \pi R \quad E_1 + \pi R^2 \\ S_2 &= 2 \pi R \quad E_2 \\ S_3 &= 2 \pi R \quad E_3 \end{aligned}$$

La surface totale est :

$$S = 2 \pi R H + \pi R^2 \quad (R \text{ rayon du trou})$$

Si l'on maintient le niveau constant à la hauteur H , le débit Q peut être décomposé en trois débits Q_1 , Q_2 et Q_3 dans les trois couches.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (7)$$

$$Q_1 = K_1 S_1 i, \quad Q_2 = K_2 S_2 i, \quad Q_3 = K_3 S_3 i$$

avec la charge $i = 1$

On peut définir une perméabilité moyenne K telle que :

$$Q = K S i \quad (8)$$

en rapprochant (7) et (8) on obtient :

$$K S = K_1 S_1 + K_2 S_2 + K_3 S_3$$

$$(2 \pi R H + \pi R^2) K = (2 \pi R E_1 + \pi R^2) K_1 + 2 \pi R E_2 K_2 + 2 \pi R E_3 K_3$$

ou encore :

$$\left(H + \frac{R}{2}\right) K = \left(E_1 + \frac{R}{2}\right) K_1 + E_2 K_2 + E_3 K_3$$

$$K = K_1 \left(\frac{E_1 + \frac{R}{2}}{H + \frac{R}{2}} \right) + K_2 \left(\frac{E_2}{H + \frac{R}{2}} \right) + K_3 \left(\frac{E_3}{H + \frac{R}{2}} \right)$$

On voit que K est obtenu en faisant la somme des perméabilités des trois couches pondérées par les surfaces relatives d'infiltration de ces couches, et non pas les épaisseurs relatives. Cela correspond mal à la définition d'une perméabilité « moyenne » encore que la différence ne soit pas très grande. Ce qui est plus grave, c'est que si K_3 est nettement plus élevé que K_2 et K_1 , comme cela est souvent le cas, la perméabilité « moyenne » K obtenue reflétera mal les capacités d'infiltration du sol considéré. Il n'est pas indifférent, en effet, d'avoir sur un bassin versant un sol composé d'une couche superficielle très perméable sur des couches moins perméables plutôt qu'une couche homogène de perméabilité « moyenne ». En effet, dans le premier cas, une averse assez violente sera absorbée au début en grande partie, puis après saturation de la couche très perméable, l'infiltration se ralentira et le ruissellement se déclenchera ou deviendra plus intense. Dans le deuxième cas, le ruissellement se déclenchera plus vite et sera de suite plus intense. La « réponse » du bassin à une averse ne sera pas du tout la même vraisemblablement.

Du point de vue pratique, un des avantages de la méthode Porchet, la faible consommation d'eau, disparaît car un débit à niveau constant doit conduire à un volume total consommé assez élevé.

3. COMPARAISON DES ESSAIS MUNTZ ET PORCHET SUR DES RÉSULTATS DÉJÀ OBTENUS

De nombreuses mesures ont été faites en 1969, 1970 et 1971 au Togo et au Dahomey, les deux méthodes Muntz et Porchet ayant souvent été employées simultanément. Lors de ces essais, nous avons d'abord envisagé la méthode Porchet telle qu'indiquée en 2.1., puis les résultats obtenus nous ont conduit à envisager l'hypothèse de sols multicouches ; l'interprétation telle qu'exposée en 2.2 n'a pu être appliquée qu'après la mise au point fin 1971 à Tunis du programme P B H 599.

Ce programme n'a été utilisé jusqu'à maintenant que pour 3 essais effectués en 1970 sur le bassin du lac Elia (Togo), pour lesquels nous disposons du profil pédologique établi par A. LECOQ et une première mesure a été faite en Tunisie sur une terrasse alluviale du Miliane, à titre d'essai. Les mesures vont être intensifiées en 1972 sur le bassin représentatif exploité dans le Sud tunisien où nous comptons mener, avec le plus de rigueur possible, des essais Muntz et Porchet simultanés. En attendant ces résultats, nous allons examiner quelques points particuliers des mesures déjà faites.

3.1. LES PERMÉABILITÉS MESURÉES PAR LA MÉTHODE PORCHET ET LA NATURE DU SOL.

3.1.1. Relations entre les perméabilités d'un profil et les qualités physiques du sol dans ce profil.

La figure 10 présente les courbes d'essais Porchet du profil n° 1 du lac Elia, essais faits en trois points, 1A, 1B, 1C, différents, distants de 3 à 4 mètres.

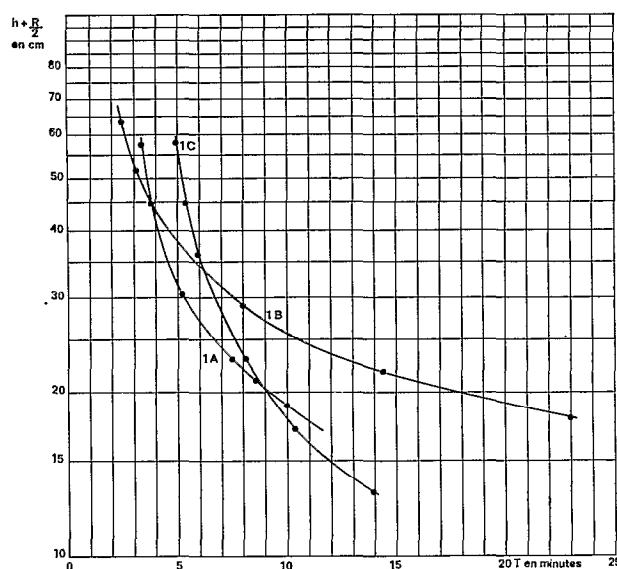


Fig. 10. — Mesures Porchet sur le bassin du lac Elia (Togo).
au profil pédologique n° 1 en trois emplacements A, B, C.

Nous avons découpé ce sol d'après la description pédologique de la façon suivante :

Profil 1A. La couche 1 correspond dans tous les cas au fond du trou à une profondeur supérieure à 35 cm. Puis nous avons, dans une première hypothèse, délimité deux autres couches de 35 cm à 13 cm et de 13 cm à la surface. Le programme nous a donné les perméabilités $K_1 = 24,5 \cdot 10^{-6}$ m/s, $K_2 = 202 \cdot 10^{-6}$ m/s et $K_3 = 673 \cdot 10^{-6}$ m/s, qui correspondraient, à peu près, aux horizons pédologiques B_1 , A_2 et A_1 . Dans une deuxième hypothèse, nous avons pris deux couches en tout, la première du fond à 35 cm, la deuxième, de 35 à la surface. Le programme nous a fourni les perméabilités : $K_1 = 24,5 \cdot 10^{-6}$ m/s, et $K_2 = 217 \cdot 10^{-6}$ m/s qui correspondent aux horizons B_1 et $(A_1 + A_2)$.

Profil 1B. Un premier découpage, en trois couches, donne :

$K_1 = 7,7 \cdot 10^{-6}$ m/s au-dessous de 42 cm, $K_2 = 80,4 \cdot 10^{-6}$ m/s de 42 à 12 cm et $K_3 = 928 \cdot 10^{-6}$ m/s de 12 cm à la surface.

Ces perméabilités correspondraient aux horizons B_1 , A_2 et A_1 respectivement.

En deuxième hypothèse, un découpage en trois couches du fond à 42 cm de 42 à 35 et de 35 à la surface donne des perméabilités :

$K_1 = 7,7 \cdot 10^{-6}$ m/s, $K_2 = 74,4 \cdot 10^{-6}$ m/s et $K_3 = 114 \cdot 10^{-6}$ m/s, correspondant respectivement à la couche B_1 , à une couche intermédiaire ($B_1 - A_2$) et à $(A_2 - A_1)$.

Profil 1C. Une première hypothèse correspondant à trois couches du fond à 42 cm, de 42 à 13 cm et de 13 cm à la surface, a donné :

$K_1 = 23,1 \cdot 10^{-6}$ m/s, $K_2 = 157 \cdot 10^{-6}$ m/s, et $K_3 = 402 \cdot 10^{-6}$ valeurs relatives à peu près aux couches B_1 , A_2 et A_1 .

Un deuxième découpage du fond à 42 cm et de 42 cm à la surface donne :

$K_1 = 23,1 \cdot 10^{-6}$ m/s et $K_2 = 162 \cdot 10^{-6}$ m/s, correspondant, à peu près, aux couches B_1 et $(A_1 + A_2)$.

On voit que si l'on isole une couche de faible épaisseur (10 à 15 cm), en surface, on obtient une perméabilité très élevée. La couche suivante est assez perméable et enfin, la couche du fond est peu perméable. Notons que les mesures faites près de la surface au début de l'infiltration, sont difficiles et certainement entachées d'erreur. Cette restriction faite, nous allons voir que ces résultats correspondent assez bien, qualitativement au moins, aux résultats des analyses physiques données dans le tableau suivant :

COMPARAISONS DE PERMEABILITÉS MESURÉES SELON DIVERSES MÉTHODES AUX
PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES DES HORIZONS PÉDOLOGIQUES
Bassin du lac ÉLIA (Togo)

	Profil 1A découpage 1	Profil 1A découpage 2	Profil 1B découpage 1	Profil 1B découpage 2	Profil 1B découpage 3	Profil 1B découpage 4	Profil 1C découpage 1	Profil 1C découpage 2	Profil 1C découpage 3	Muntz sur fosse	Mesure en	Horizons pédologiques	
0												Argile 16,5 % Sables 71 % Porosité 61 % PF 2,5 17,8 %	A1
10	$K=673.10^{-6} m/s$		$K=830.10^{-6} m/s$		$K=928.10^{-6} m/s$		$K=535.10^{-6} m/s$	$K=402.10^{-6} m/s$			$K=6,5.10^{-6} m/s$		
										$K=360.10^{-6} m/s$		ZONE DE TRANSITION	
20	$K=202.10^{-6} m/s$		$K=95.10^{-6} m/s$		$K=80,4.10^{-6} m/s$		$K=123.10^{-6} m/s$				$K=35.10^{-6} m/s$	Argile 32,5 % Sables 57 % Porosité 52 % PF 2,5 25,5 %	A2
30		$K=217.10^{-6} m/s$		$K=87,5.10^{-6} m/s$		$K=114.10^{-6} m/s$		$K=157.10^{-6} m/s$			$K=78.10^{-6} m/s$		
40			$K=74.10^{-6} m/s$			$K=74.10^{-6} m/s$	$K=73.10^{-6} m/s$			$K=\epsilon$		ZONE DE TRANSITION	
50	$K=24,5.10^{-6} m/s$	$K=24,5.10^{-6} m/s$										Argile 43 % Sables 48 % Porosité 45 % PF 2,5 27,7 %	B1
			$K=7,7.10^{-6} m/s$	$K=7,7.10^{-6} m/s$	$K=7,7.10^{-6} m/s$	$K=7,7.10^{-6} m/s$	$K=23,10^{-6} m/s$	$K=23,10^{-6} m/s$	$K=23,10^{-6} m/s$		$K=6,5.10^{-6} m/s$		
60	Profondeur Maximale												

Résultats PORCHET dépouillés
à l'ordinateur (PBH 599)

COMPARAISONS DE PERMEABILITÉS

Nous notons l'augmentation nette de la teneur en argile de l'horizon A₁ (16,5%) à l'horizon A₂ (32,5%) et enfin à l'horizon B₁ (43,3%). La porosité décroît aussi sensiblement de 61% à 52% puis 45%. Il n'est guère possible avec si peu de résultats d'établir des corrélations autres que qualitatives entre perméabilités, teneur en argile et porosité, ces deux derniers paramètres nous paraissant les plus importants. Il faudrait, peut-être aussi, considérer les valeurs des teneurs en eau à pF = 2,5 (sensiblement la capacité au champ) assez fortement croissantes avec la profondeur et qui donnent des indications sur l'eau liée qui occupe une partie des vides définis par la porosité, partie de ce fait non accessible à l'eau libre. Notons que la perméabilité mesurée au laboratoire est de l'ordre de 3,5 à 6,5 · 10⁻⁶ m/s dans la tranche de sol que nous avons utilisée et que cela ne correspond pas du tout à nos résultats sauf pour la couche B₁.

Les essais du Miliane (février 1972) ont été réalisés sur un seul trou de 66 cm dans une terrasse alluviale recouverte d'un dépôt récent, sablo-limoneux (sable fin prépondérant), dans un profil apparemment très homogène (cet essai était destiné à tester le matériel de mesure).

Nous avons effectué trois remplissages avec mesures successives, essais désignés par I, II, III. La figure 11 représente les trois courbes $L \left(h + \frac{R}{2} \right) = f(t)$ obtenues. On voit que la situation d'équilibre est longue à s'établir puisqu'il subsiste un écart encore sensible entre les courbes II et III en ce qui concerne la pente limite. En l'absence d'observations pédologiques autres que la nôtre, fort sommaire, nous avons procédé, pour chaque couche à différents essais de découpages. Le schéma (graphe 12) et le tableau ci-après donnent les résultats obtenus suivant les essais, les profondeurs et les découpages obtenus.

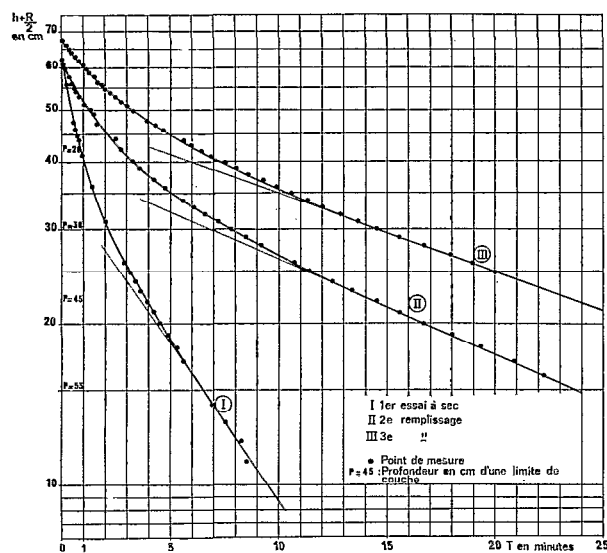


Fig. 11. — Mesures Porchet sur berge du Miliane à l'aqueduc (Tunisie).

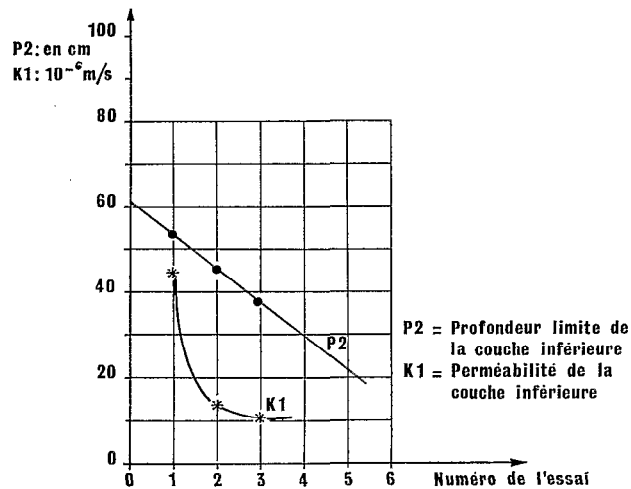


Fig. 12. — Essai de délimitation des couches (Miliane, Tunisie).

RÉSULTATS D'UN ESSAI DE MESURE PORCHET DANS UNE TERRASSE ALLUVIALE DU MILIANE A L'AQUEDUC (TUNISIE) 22-2-1972

Profondeur	1 ^{er} remplissage découpage 1	1 ^{er} remplissage découpage 2	1 ^{er} remplissage découpage 3	1 ^{er} remplissage découpage 4	2 ^e remplissage découpage 1	2 ^e remplissage découpage 2	3 ^e remplissage découpage 1	3 ^e remplissage découpage 2
6								
20		$K = 562 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$K = 307 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$			$K = 182 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$		$K = 33,8 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$
30	$K = 112 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$		$K = 242 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$K = 257 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$K = 48 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$K = 36,2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$K = 32,7 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$K = 30,7 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$
40		$K = 92,1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$K = 78,4 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$K = 78,4 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$				
50						$K = 13,8 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$K = 11,1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$K = 11,1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$
60	$K = 44,8 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$K = 44,8 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$K = 44,8 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$K = 44,8 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	$K = 13,8 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$			
66								
LES RÉSULTATS SONT DÉPOUILLÉS SUR ORDINATEUR (P BH 599)								

Nous voyons que l'essai I conduit à des perméabilités assez fortes non réalistes et à écarter (ce qui est normal, un tel essai au premier remplissage ne doit généralement pas être retenu). Par contre, les valeurs obtenues sont nettement plus faibles pour les essais II et III. Autre point à signaler : la limite de la couche inférieure (tangente droite — courbe) « remonte », de 53 cm pour I à 45 cm pour II et 38 cm pour III ; cela signifie peut-être que, dans un profil sans doute très homogène, la zone atteignant la saturation d'équilibre remonte vers le haut à chaque nouvel essai ; cependant, même dans ce cas, nous supposons qu'en multipliant les remplissages successifs, les résultats obtenus ne seraient plus très différents de ceux représentés par la courbe III. Les couches superficielles sont moins tassées et elles ne peuvent atteindre au même état de saturation que les couches inférieures ; c'est pourquoi la circulation de l'eau y est plus facile et le coefficient de perméabilité plus élevé.

En conclusion, de ces constatations, nous croyons pouvoir dire que :

- a) Un profil quelconque peut être décomposé en couches successives de perméabilités différentes.
- b) Les différences de perméabilités peuvent provenir simultanément des causes suivantes :
 - Variation dans la composition du profil du point de vue physique (granulométrie des sables, teneur en argile) ;
 - Variation dans l'état physique du sol en place : tassement plus ou moins grand des couches suivant leur position, travail des insectes, travail de l'homme, etc., qui se caractérise assez bien avec la porosité ;
 - Variations dans le comportement des sols vis-à-vis de l'eau : cela peut se caractériser assez bien à l'aide du pF. Ce paramètre n'est d'ailleurs pas indépendant des facteurs précédents. En effet, une partie des vides définis par la porosité n'est pas accessible à l'eau en mouvement car elle est occupée par de l'eau liée au sol (par effet capillaire). Cela correspond aux notions de micro-porosité et macro-porosité de A. DEMOLON [4] ;
 - Variation de l'état de saturation en eau du sol au cours des essais successifs et de haut en bas du profil. En effet, l'eau ne circule pas de la même façon dans un sol où la plus grande partie des vides est occupée par l'eau et dans un sol à moitié saturé par exemple. Cela correspond assez bien à l'idée de saturation progressive du sol conduisant à des états successifs d'équilibre et à la décomposition en segments de droite des courbes expérimentales. Cependant, il est peu vraisemblable de trouver, sur le terrain, un profil qui soit homogène à tous les points de vue, même approximativement. Il y aura toujours au moins un effet de tassement pour introduire une zonalité du profil, même après saturation complète.
- c) Dans un essai Porchet, la mince couche de battance des sols est détruite. L'infiltration se fait horizontalement ou du moins obliquement.
- d) En définitive, les perméabilités déterminées par la méthode Porchet traduisent des influences complexes et paraissent mal adaptées aux problèmes hydrologiques.

Nous poursuivrons cependant les essais Porchet de façon systématique et avec le plus de rigueur possible sur différents bassins de façon à étayer solidement notre argumentation et peut-être aussi pour parvenir à une autre utilisation des résultats relativement à la circulation des eaux.

3.1.2. Variations des perméabilités en fonction des qualités des sols de différents profils.

Nous ne pouvons, pour l'instant, utiliser tous les résultats des bassins du Togo et du Dahomey, car l'exploitation, selon la méthode exposée en 2.2., n'a été faite que pour trois essais (cf. ci-dessus 3.1.1.). Cependant, nous pouvons tenter de comparer les perméabilités des couches inférieures des essais en fonction des qualités physiques des sols, puisque ces perméabilités sont les mêmes dans l'ancienne et la nouvelle méthode.

Nous allons utiliser les résultats des bassins de la Lhoto et du lac Elia. Dans le tableau ci-après, nous avons indiqué pour chaque profil la perméabilité mesurée par la méthode Porchet selon le protocole Roederer-Bouchard, le résultat trouvé s'appliquant à la couche inférieure du trou de mesure (les cotes de profondeurs limites sont indiquées). Nous avons indiqué en correspondance la teneur en argile, la teneur en sable, la porosité et la teneur en eau au pF 2,5. En observation sont mentionnés les horizons correspondants de la description pédologique.

Les résultats sont apparemment peu concluants. Il n'apparaît guère de corrélation entre ces divers éléments et la perméabilité, moins que pour les couches successives d'un même profil. Cela peut s'expliquer d'abord par un certain manque de précision des mesures (inhérente à la méthode utilisée), mais aussi par le fait que les corrélations devraient peut-être considérer un paramètre du sol, non pris en compte. Il semble en effet que l'aspect général du sol n'est pas forcément bien caractérisé dans une description pédologique. Le travail des insectes en particulier peut modifier très sensiblement la perméabilité apparente sans que cela puisse être apprécié par les teneurs en argile et en sable, ni même par la porosité. En effet, la porosité est définie par la formule $P\% = 100 \frac{D - D'}{D}$ dans

laquelle on a D densité réelle et D' densité apparente. Cela peut encore s'écrire $P\% = 100 \left(1 - \frac{VR}{VA}\right)$, avec VR volume réel et VA volume apparent.

Supposons que le volume apparent soit déterminé par le prélèvement d'un volume de 500 cm³ de sol en place, valeur vraisemblable ; supposons qu'un insecte ait creusé à travers ce volume une galerie de 4 mm de diamètre et 8 cm de long, cela représente un volume vide d'environ 1 cm³. Le volume réel en est réduit d'autant. La variation résultante de P est $\Delta P = 100 \Delta \frac{VR}{VA}$ soit ici 0,2% en valeur absolue. Cela est négligeable par rapport à P et probablement inférieur aux erreurs de détermination. Cependant, une telle galerie d'insectes débouchant dans un trou de mesure Porchet y perturbera l'écoulement de l'eau en l'accéléralant. Si la galerie présente une section de 1 cm² sur 10 cm de long, on aura un vide supplémentaire de 10 cm³ qui augmente la porosité de 2%, augmentation encore peu sensible, alors que le débit de fuite sera augmenté dans de bien plus grandes proportions. En outre, dans un trou de 50 à 80 cm, il pourra y avoir plusieurs galeries, qui risquent fort de passer inaperçues lors de la percée du trou. Il nous semble que cela constitue un élément perturbateur important de nature à modifier fortement les résultats des mesures de perméabilité. Nous pourrions définir l'influence de ces vides par le terme de « porosité discrète » qui viendrait s'ajouter aux micro et macro-porosité définies par A. DEMOLON. Nous espérons pouvoir préciser ces relations qualités du sol — perméabilité par les mesures qui doivent être entreprises dans un proche avenir. Du point de vue pratique, il est possible et même probable que les mesures soient perturbées par le dépôt sur les parois et au fond du trou d'une fine boue d'argile et de limon qui doit colmater les pores. En effet, quelles que soient les précautions prises pour verser l'eau dans le trou, on met en suspension une quantité importante de boues.

COMPARAISON DES PERMÉABILITÉS PORCHET MESURÉES SUR DIFFÉRENTS PROFILS DU TOGO ET DU DAHOMEY ET DES QUALITÉS DES SOLS DE CES PROFILS

Bassin de la Lhoto	Profondeurs limites (cm)	K en 10 ⁻⁶ m/s	A %	S %	Porosité %	W % à pF 2,5	Observations
Profil 51	A 25,5-63	2	8,3	67,3	46	6,9	
	B 27 -65	2	8,3	67,3	46	6,9	
	C 21 -46,5	2,1	8,3	67,3	46	6,9	
Profil 413	A 12,5-78	0,6	5,3	74,2	45	7,2	
Profil 143	A 37,5-60	5,7	6	73,8	51	7,3	
	B 39 -65	3	6	73,8	51	7,3	
	C 30,5-55	7,5	6	73,8	51	7,3	
Profil F 112	A 20,5-75	1,7	10,5	61,8	4,6	16,2	
	B 36,5-77	4,1	10,5	61,8	4,6	16,2	
	C 29,5-68	2,7	10,5	61,8	4,6	16,2	
Profil F 24	A 0 -32	34	7	60	48	10,1	Sol décapé sur 10 cm d'épaisseur
	B 36 -62	18	15	51,5	46	13,4	
	C 35 -57	21	15	51,5	46	13,4	
Profil F 56	A 38 -63	21	5,8	75,5	45	6	
	B 35 -59	19,5	5,8	75,5	45	6	
	C 48 -87	7,5	37	48	49	20,6	
Profil F 63	A 33 - 75	0,7	10	74	44	8	
	B 55 -113	12,7	22	61	40	13,6	
	C 25,5- 41	37	4,5	77	48	0	
Profil F 15	A 22 -127	1,3	48	46	—	20	
	B 37 -185	0,5	55	27	—	35	

K coefficient de perméabilité du fond du trou.

A % : teneur en argile ; S % : teneur en sables.

Bassin du lac Elia	Profondeurs limites (cm)	K en 10^{-6} m/s	A %	S %	Porosité %	W % à pF 2,5	Observations
Profil n° 1	A 37 -55,5	24	43	48	45	27,7	Horizon B 1
	B 42 -65	7,5	43	48	45	27,7	Horizon B 1 et B 21
	C 41 -55,5	12	43	48	45	27,7	Horizon B 1
Profil n° 2	A 42 -55	13,3	(38) *	(52) *	(48) *	(26) *	Horizon A 2 et B 21
	B 30 -59	30	(38) *	(52) *	(48) *	(26) *	Horizon A 2 et B 21
	C 45 -62,5	60	46	44	46	29	Horizon B 21
Profil n° 3	A 39,5-62	3,6	54	38	61	21	Horizon B 21
	B 46 -57,5	6,0	54	38	61	21	Horizon B 21
	C 29,5-59,5	29	(44) *	(48) *	(64) *	(17) *	Horizon AB et B 21
Profil n° 4	A 41,5-60,5	14	28	54	38,5	14	A B g
	B 34,5-53,5	19	28	54	38,5	14	A B g
	C 34,5-62	15	28	54	38,5	14	A B g
Profil n° 5	A 33,5-59,5	12	45	42	22	27	C 21 g
	B 43 -59,5	10	45	42	22	27	
	C 33,5-61,5	23	45	42	22	27	
Profil n° 6	A 43,5-67	42	54,5	31	58	39,2	C 21 g
	B 36,5-61	15	54,5	31	58	38,2	
	C 37,5-57,5	18	54,5	31	58	39,2	
Profil n° 7	A 24,5-60	1,3	66	7	63	(68) *	A B et B 1 st
Profil n° 8	A 32 -70	5,5	66	11	56	62	B 1 st
	B 39,5-70	4	66	11	56	62	
	C 28 -65	2,6	66	11	56	62	

* Valeur moyenne estimée.

NB 1 : l'indice g désigne un horizon à pseudo-gley.

NB 2 : B 1 st est un horizon B structural et non d'accumulation.

3.2. LES PERMÉABILITÉS MESURÉES PAR LA MÉTHODE MUNTZ ET LA NATURE DU SOL.

Dans les tableaux ci-après, nous avons récapitulé les mesures Muntz effectuées sur le bassin de la Lhoto et sur celui du lac Elia en indiquant certaines caractéristiques pédologiques du profil pour différentes profondeurs : teneurs en argile et en sable, porosité, teneurs en eau à pF 2,5. Les mesures sont faites généralement en surface, sauf pour les profils Lhoto F 24 et le lac Elia n° 1 où des fosses à différentes profondeurs ont été creusées. On note dans ces derniers cas une grande réduction de la perméabilité et de la porosité lorsqu'on considère sur des couches de plus en plus profondes : à F 24 sur la Lhoto, on passe d'une perméabilité de $185 \text{ à } 337 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ en surface à une perméabilité de $20 \text{ à } 40 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ à 10 ou 15 cm de profondeur, la porosité variant simultanément de 57% à 48% ; au profil n° 1 du lac Elia, on passe de $234 \text{ à } 324 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ en surface, à $52 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ à 15 cm et $8 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ à 27,5 cm de profondeur, la porosité variant simultanément de 61% à 52%, puis 45%.

COMPARAISON DES PERMÉABILITÉS OBTENUES PAR LA MÉTHODE MUNTZ
ET DES QUALITÉS PHYSIQUES DU SOL

Bassin de la Lhoto	Profondeur	K 10 ⁻⁶ m/s	A %	S %	Porosité %	W % à pF 2,5	Horizons
Profil 51	Surface	95					
	0-8		4,25	80	39	4,6	A 1
	25-33		8,25	67	46	6,9	B 21
	40-50		23,5	52	39	18,4	A 22 g
	80-90		36	43	34	25,0	B st g

Sol modal halomorphe à structure dégradée, alcalis lessivés, solonetz à horizon B massif sur migmatites. (B st g : horizon B structural à pseudo-gley.)

Profil 413	Surface	63					
	1-10		5,25	74	45	7,2	A 1
	20-30		6,5	72	48	7,9	A 21
	40-50		20,8	49	40	29,1	A 22
	100-110		33	38	39	40	B st

Remarque. — 63 trouvé après variation continue de 318 à 63.

Sols halomorphes à structure dégradée, alcalis lessivés, solonetz à structure en colonnettes, sur migmatites.

Profil B 143	A	Surface	129				
	B	Surface	60				
		0-10		6,0	74	59	A 1
		10-40		6,0	74	51	A 2
		40-60		15,0	64	63	B 1
		60-150		36,3	42	51	B 2
		150-180		53	18	—	C
		180	roche altérée				
	C 1		19				
	C 2		117				

Sols fersiallitiques ferrugineux tropicaux lessivés, à concrétions, dans altérations montmorillonitiques.

Profil F 112	A	Surface	265				
	B	Surface	208				
	C	Surface	456				
		0-15		12,3	46	52	A 1
		20-30		10,5	52	46	A 2 g
		35-45		21,5	46	42	A 3 g
		50-60		31,0	44	39	A C g
		90-100		50,5	27	43	C G
		100	roche altérée				

Sols hydromorphes, peu humifères, à gley d'ensemble sur argile d'altération des migmatites. (C G : horizon C à gley).

Bassin de la Lhoto		Profondeur	K 10 ⁻⁶ m/s	A %	S %	Porosité %	W % à pF 2,5	Horizons
Profil F 24	A	Surface	19,5					
	B	Surface	337					
	C	Surface	185					
	D	fosse 15 cm	40					
		0-10		5,8	60	57	10,7	A 1
		10-30		7,0	60	48	10,1	A 2
		30-60		15,0	52	46	13,4	B 1
		70-90		—	—	—	—	B 2
		100	concrétions nombreuses et plus ou moins cimentées					
	A, champs d'ignames décapés sur 10 cm environ ; B et C, sol en jachère ; D, fosse de 15 cm creusée dans le sol en jachère : sols fersiallitiques, ferrugineux tropicaux lessivés, à concrétions dans altération kaolinitique.							
Profil F 56	A	Surface	182					
	B	Surface	152					
	C	Surface	100					
		2-10		9,0	71	54	9,2	A 1
		30-40		5,8	76	45	6,0	A 2 g
		60-70		37,5	48	49	20,6	A B g
		100-100		—	—	—	—	B g
	Sols hydromorphes peu humifères à pseudogley, à carapace et cuirasse dans migmatites.							
Profil F 63	A	Surface	26					
	B	Surface	27,5					
		0-10		2,3	86	43	3,2	A 1
		10-60		4,5	77	48	5,0	A 2
		60-90		22,0	61	40	13,6	B 21
		90-100		19,5	64	36	12,9	B 22
	Sols fersiallitiques, ferrugineux tropicaux lessivés, sans concrétion dans colluvions sableuses sur migmatites.							
Profil F 12	A	Surface	572					
	B	Surface	111					
		0-20		24,8	52	65	19,4	A 1
		20-50		27,8	43	41	17,2	A C
		50-120		21,5	45	—	16,3	C 21
		120-140		17,0	41	—	15,5	C 22
		140	roche peu altérée					
Sols bruts d'origine non climatique d'érosion, régosols sur granite, sols peu évolués.								
Profil F 15	A	Surface	156					
	B	Surface	81					
		0-10		7,5	72	55	10,1	A 1
		10-25		7,5	75	46	9,0	A 2
		25-40		13,5	72	—	12,2	A B
		40-50		61,0	25	—	37,6	B 2 g
		60-70		51	29	40	33,5	C 2 g
		110	roche altérée					
Sols fersiallitiques, ferrugineux tropicaux lessivés, peu évolués, sur migmatites.								

Bassin du lac Elia	Profondeur	K 10 ⁻⁶ m/s	A %	S %	Porosité %	W % à pF 2,5	Horizons
Profil 1	A	Surface	284				
	B	Surface	324				
	C	Surface	234				
	D	fosse 15 cm	52				
	E	Surface	286				
	F	Surface	253				
	G	fosse 13 cm	430				
	H	fosse 12 cm	354				
	I	fosse 27,5 cm	8				
	J	fosse 37 cm	très faible 1				
		0-10	16,5	71	61	17,8	A 1
		15-30	32,5	57	52	25,5	A 2
		40-60	43	48	45	27,7	B 1
		65-100	55	39	48	25,5	B 21
		100-160	59	29	—	31,7	B 22
		175-190	52	30	49	26,8	B 3 g

Sols fersiallitiques, faiblement désaturés, appauvris, modaux, sur argile sableuse.

Profil 2	A	Surface	392				
	B	Surface	240				
	C	Surface					
		0-15	25	63	54	20	A 1
		20-40	30	60	50	25	A 2
		50-80	47	44	46	29	B 21
		100-150	54	35	47	27	B 22

Sol fersiallitiques, faiblement désaturés, appauvris, modaux, sur argile sableuse.

Profil 3	A	Surface	182				
	B	Surface	357				
		0-15	22	66	53	23	A 1
		20-35	33	58	67	14	A B
		40-60	54	38	61	21	B 21
		80-120	46	43	—	20	B 22
		120	argile sableuse ou sable argileux plus ou moins consolidé				

Sols fersiallitiques, faiblement désaturés, appauvris, indurés sur argile sableuse.

Profil 4	A	Surface	80				
	B	Surface	73				
	C	Surface	35				
		0-15	13	69	50	10	A 1
		15-35	15,5	67	40	10	A 2 g
		35-70	28	54	38,5	14	A B g
		80-100	46	36	40	20	B 2 g
		100-160	43	34	37	19	B 3 g

Sols fersiallitiques, faiblement désaturés, appauvris, hydromorphes sur argile sableuse.

Bassin du lac Elia	Profondeur	K 10 ⁻⁶ m/s	A %	S %	Porosité %	W % à pF 2,5	Horizons
Profil 5	Surface	157					
	0-15		35	44	65	—	A 1
	15-30		52	32	70	29	A 2 g
	35-70		45	42	22	27	C 21 g
	75-85		44	41	—	24	C 22 g
	90-120		42	23	—	27	C 23 g
	130-135		67	15	—	45	C 3 g

Sols hydromorphes, peu humifères, à pseudogley, à carapace ou cuirasse, sur argile colluviale.

Profil 6 A	Surface	89					
	0-20		50	22	66	54	A 1
	20-35		62	18	65	38	A C g
	40-70		55	31	58	39	C 21 g
	70-130		51	29	52	36	C 22
	130-140		36	47	58	28	C 3 g

Sols hydromorphes, peu humifères, à gley d'ensemble sur argile alluviale.

Quand on passe d'un profil à l'autre, la tendance à une variation simultanée de même sens de la perméabilité et de la porosité se maintient, bien que la relation soit moins nette. Il est normal d'ailleurs d'observer une relation plus lâche entre perméabilité et porosité lorsqu'on change de sol. En effet, d'autres paramètres peuvent intervenir et, en particulier, les vides définis par la porosité peuvent être de nature différente, les pores étant de taille plus ou moins grande par exemple, ce qui ne manquera pas d'influer sur la circulation de l'eau. Dans le cas des mesures Muntz, l'influence de ce que nous avons appelé « porosité discrète » est moins grande car il y a moins de chance de voir déboucher un trou d'insecte dans le cercle de mesure de 100 cm² que dans un trou Porchet dont la surface totale pour 50 cm de profondeur est de l'ordre de 1 300 cm². L'eau en charge dans le cercle de mesure ne sera donc généralement pas en communication directe avec un de ces trous. Cependant, il y a une autre cause d'erreur dont l'opérateur doit se méfier : si un ou plusieurs cailloux de taille importante sont inclus dans le cylindre de terre découpé par le cercle de mesure, la section de passage de l'eau d'infiltration peut être très sensiblement réduite. Cela conduira à des résultats trop faibles si la présence de ces cailloux est fortuite et ne constitue pas un caractère général du terrain d'expérience.

En conclusion, il semble, dans l'état actuel de nos mesures, qu'il y ait une meilleure correspondance entre les perméabilités mesurées selon Muntz et les caractéristiques des sols qu'avec celles obtenues par la mesure Porchet.

3.3. COMPARAISON DES RÉSULTATS DES MESURES PORCHET ET DES MESURES MUNTZ.

Le dépouillement des mesures Porchet par notre nouvelle méthode dans l'optique des sols à multicouches n'ayant porté que sur très peu de mesures, il nous est difficile de faire une comparaison sérieuse des deux types de mesures.

Nous noterons seulement que sur le profil du lac Elia où les mesures Porchet ont été dépouillées selon notre méthode, les perméabilités Porchet de la couche superficielle seraient plutôt plus élevées que les perméabilités Muntz.

Ceci est tout à fait normal puisque dans la mesure Porchet on suppose avoir isolé la couche superficielle alors que la mesure Muntz intéresse l'ensemble du profil globalement. Une autre raison de ce fait peut être aussi la suppression de la croûte superficielle du sol dans la mesure Porchet et sa conservation dans la méthode Muntz. Cette couche est généralement moins perméable que le sol sous-jacent. De façon générale, nous pensons que la méthode Muntz permet d'assurer une infiltration de l'eau plus proche de celle d'une pluie et que, par conséquent, elle devrait être plus représentative que la méthode Porchet pour les besoins de l'hydrologue.

Pour clore cette comparaison, nous allons faire une étude rapide de la dispersion des mesures dans un même profil.

Nous avons généralement effectué pour chaque profil pédologique une détermination de la perméabilité en trois emplacements distincts dans un rayon de 3 à 4 m autour du profil. La question se pose de savoir si cela suffit à obtenir une valeur moyenne représentative de la perméabilité.

En ce qui concerne la méthode Porchet, l'étude de la dispersion des résultats est prématurée du fait de la nouvelle méthode de dépouillement des résultats qui n'a été appliquée jusqu'ici que pour un profil. Remarquons que pour faciliter les comparaisons qui doivent se faire aux différents niveaux du profil, il est préférable d'opérer sur des trous de profondeurs égales pour un même profil, ce qui n'a généralement pas été le cas jusqu'à maintenant.

Pour la méthode Muntz, nous disposons d'un petit nombre de résultats qui, bien qu'insuffisant pour obtenir des conclusions sûres, permet d'avoir une idée de la dispersion. Ces résultats sont récapitulés dans le tableau « Dispersion des mesures Muntz ».

Pour caractériser la dispersion des résultats, on a calculé pour chaque profil la moyenne des perméabilités, puis la moyenne des écarts relatifs des résultats à cette moyenne. Cet écart relatif moyen peut être parfois réduit sensiblement en éliminant une des trois mesures.

Plusieurs cas peuvent se présenter :

a) *Élimination évidente d'une mesure.*

Une mesure donne un résultat très différent des deux autres qui sont au contraire proches l'une de l'autre. Dans ce cas, l'élimination de la mesure très différente s'impose. Une quatrième mesure permettrait de vérifier le bien-fondé de cette élimination. L'opérateur sur le terrain doit se méfier en présence d'un tel cas et effectuer une quatrième mesure en cherchant la raison de cette mesure aberrante (cela peut être des cailloux obstruant le cercle de mesure ou une crevasse cachée du sol).

b) *Élimination arbitraire d'une mesure.*

Dans ce cas, une mesure est assez différente des deux autres bien groupées sans que l'écart soit important. On peut alors l'éliminer mais une quatrième mesure serait souhaitable.

c) *Pas d'élimination possible.*

Les trois mesures sont très divergentes, cela pouvant être dû à l'hétérogénéité du terrain, ou bien à l'imprécision des opérations de mesures.

d) *Élimination inutile.*

Les trois résultats étant bien groupés, il est inutile de chercher à améliorer la moyenne par une élimination.

DISPERSION DES MESURES MUNTZ

Bassin Profil	Perméabilité Muntz K en 10^{-6} m/s	K moyen	ΔK % moyen	Observations
Lac Élia (Togo)				
Profil 1	A 293	297	7,4	Il n'y a pas lieu ici d'éliminer une des trois valeurs. Les résultats sont convenablement groupés.
	B 330			
	C 268			
Tero (Dahomey)				
Profil P 177	A 26	32	16,5	Il n'est pas possible d'éliminer a priori un des résultats. La dispersion est un peu élevée. Il aurait fallu un 4 ^e point de mesure.
	B 41			
	C 30			
Tero (Dahomey)				
Profil P 18	A 118	92	27	Il paraît justifié d'éliminer la mesure C (une 4 ^e mesure eut été intéressante).
	B 104			
	C 55			
Même profil en éliminant C		111	6,3	Après élimination de C, la dispersion est nettement moins forte.
Tero (Dahomey)				
Profil P 22	A 18,5	53	43	Il y a dispersion très grande sans possibilité d'élimination d'un résultat. Il eut fallu une 4 ^e mesure.
	B 54			
	C 86			
Tero (Dahomey)				
Profil P 103	A 15	25	28,5	La dispersion est élevée sans possibilité d'élimination d'une mesure. Il eut fallu une 4 ^e mesure.
	B 24			
	C 35			
Tero (Dahomey)				
Profil P 23	A 3	8	83	Dispersion trop grande, il paraît justifié d'éliminer la mesure C a priori. Une 4 ^e mesure aurait permis de confirmer.
	B 3			
	C 17			
Même profil en éliminant C		3	0	

Bassin Profil	Perméabilité Muntz K en 10 ⁻⁶ m/s	K moyen	ΔK % moyen	Observations
Tero (Dahomey)				
Profil P 138 A	103			
B	125	119	8,7	La dispersion reste raisonnable et l'on pourrait se dispenser d'éliminer la mesure A.
C	128			
Même profil en éliminant A		126,5	1,2	La dispersion devient faible mais cela n'est pas significatif.
Tero (Dahomey)				
Profil P 175 A	13			
B	26	25	31	La dispersion est forte. Il n'y a pas d'élimination a priori possible. Il eut fallu une 4 ^e mesure.
C	35			
Lhoto				
Profil B 143 A	129			
B	60	86	34	La dispersion est forte mais il paraît justifié d'éliminer A. Il eut fallu une 4 ^e mesure pour confirmation.
C	68			
Même profil en éliminant A		64	6,3	L'amélioration est nette.
Lhoto				
Profil F 66 A	100			
B	152	145	20,5	La dispersion est forte mais il n'y a pas d'élimination possible a priori. Il eut fallu une 4 ^e mesure.
C	182			
Lhoto				
Profil F 112 A	914			
B	460	578	39	Dispersion élevée mais il paraît justifié d'éliminer A. Il eut fallu une 4 ^e mesure.
C	361			
Même profil en éliminant A		410	12,2	L'amélioration est assez nette quoiqu'il subsiste une assez forte dispersion.
Lhoto				
Profil F 24 A	20			Cas particulier:
B	336	sans signification		A est fait sur un sol décapé de 10 cm (champ d'ignames) et doit être rapproché de D fait au fond d'un trou de 15 cm de profondeur.
C	182			
D	40			
A	20	30	33	
D	40			La dispersion est forte dans les deux cas et il aurait fallu au moins deux mesures de plus, car les conditions étaient légèrement différentes : hauteur de sol décapé de 10 cm pour A et 15 cm pour D. Sol probablement piétiné en A au cours du travail des paysans.
B	336			
C	182	259	30	

On peut se fixer si l'on veut des limites de dispersion. Si l'écart relatif moyen est inférieur à 5%, on estime avoir un très bon résultat. Un écart compris en 5% et 15% est considéré comme convenable, éventuellement on cherchera à le réduire, de 15 à 25% le résultat est considéré comme médiocre, au-dessus de 25% le résultat est mauvais. Une forte dispersion, bien que peu souhaitable, peut être dans certains cas due à une très forte hétérogénéité du sol et non à un accident localisé ou à des erreurs de manipulation.

Dans ce cas, une quatrième, voir une cinquième mesure ne permettront pas forcément d'obtenir un écart relatif plus faible mais permettront de préciser un peu les limites de fluctuation de la perméabilité sur le profil.

Sur la figure 13, nous avons indiqué les écarts relatifs ΔK % sans et avec élimination d'un point. L'échantillon malheureusement est bien trop faible (13 valeurs) pour que l'on puisse en conclure avec certitude que l'amélioration des résultats est évidente et importante. Cependant, on observe une très nette tendance vers ce résultat.

Nous voyons aussi que sur 13 résultats après élimination de points aberrants 2 écarts relatifs sont très bons ($\Delta K < 5\%$), 4 sont convenables ($5\% < \Delta K < 15\%$), 2 médiocres ($15\% < \Delta K < 25\%$) et mauvais ($\Delta K > 25\%$) ; 8 mesures sur 13 (61,5% au total) sont acceptables.

En conclusion, nous devons constater la nécessité d'un nombre minimum de 3 mesures pour un profil, une quatrième étant souvent souhaitable (sinon une cinquième). L'échantillon disponible est évidemment très faible et il est indispensable que nous disposions de davantage de mesures pour préciser toutes ces tendances.

Les points correspondent aux différents profils sans ordre.
La courbe tracée pour les relier ne sert qu'à visualiser
l'amélioration des résultats et n'a pas de signification en
elle-même.

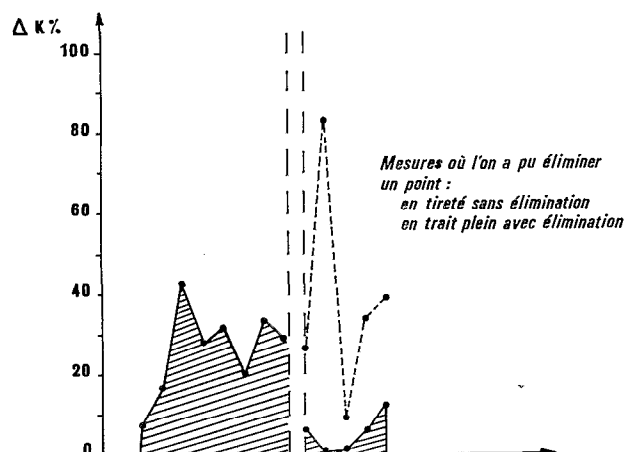


Fig. 13. — Amélioration des résultats des mesures Muntz
lorsque l'on peut éliminer une mesure sur trois d'un profil.

4. CONCLUSION.

Nous nous étions posé la question de savoir quelle était la méthode de mesure de la perméabilité la mieux adaptée à nos préoccupations d'hydrologue. Au terme de ces quelques réflexions, nous pensons que la méthode Muntz est préférable du fait de la plus grande analogie du phénomène naturel de l'infiltration des pluies et de l'infiltration artificielle utilisée dans cette méthode, c'est-à-dire infiltration verticale sous faible charge et sur un sol perturbé le moins possible. Outre cet avantage important, la méthode Muntz présente un caractère de simplicité fort appréciable quant au dépouillement des mesures. Les inconvénients sont d'une part la consommation d'eau parfois grande en sol perméable, d'autre part, le doute que l'on peut avoir sur l'état d'équilibre atteint au cours de la mesure. En effet, il n'est pas certain que l'ensemble du profil soit saturé. Nous essayerons d'éclaircir cette question par des mesures sur sol sec doublées de mesures sur le même profil après une averse suffisante pour saturer le sol. Cependant, même si nous constatons une différence entre ces deux mesures, il se révélera peut-être que la mesure sur sol sec constitue quand même un indice de perméabilité utile dans l'étude du ruissellement d'un bassin.

Nous avons beaucoup critiqué la méthode Porchet pour des raisons variées :

a) Incertitude plus grande du point de vue théorique de l'interprétation des résultats, car nous pensons devoir introduire dans le calcul la notion de variation de la perméabilité suivant la profondeur, cette variation de la perméabilité provenant à la fois de la nature et de l'état physique du sol suivant les horizons et de la saturation en eau plus ou moins forte des couches successives au cours de la mesure. La méthode de dépouillement que nous avons utilisée est imprécise du fait que l'on doit découper préalablement le sol en couches supposées homogènes en se guidant si possible à l'aide de l'analyse pédologique.

b) Différence nette, à notre avis, entre l'infiltration des pluies et l'infiltration au cours d'une mesure Porchet, l'infiltration se faisant dans ce cas horizontalement et subhorizontalement (il n'est pas impossible d'ailleurs que, parfois, le sol présente une certaine anisotropie du point de vue de l'infiltration). La couche superficielle du sol est détruite et des boues fines peuvent colmater le fond du trou.

Cependant, la méthode Porchet présente des avantages :

a) La consommation d'eau est assez faible.

b) Si nous arrivons de cette façon à évaluer la perméabilité des différents horizons, cela peut être intéressant pour l'étude hydrologique d'un bassin.

Nous continuerons donc, parallèlement aux mesures Muntz, à effectuer des mesures Porchet, en essayant d'établir, outre des comparaisons d'ordre général, des comparaisons avec des mesures Muntz faites sur des fosses aux différents horizons d'un sol.

ANNEXE

Programme de calcul des perméabilités des couches successives d'un sol à partir des mesures Porchet (P BH 599).

Nous avons vu précédemment que les résultats des mesures de niveau et de temps au cours de l'essai Porchet sont portés sur un graphique ayant pour abscisses les temps et pour ordonnées $L \left(h + \frac{R}{2} \right)$, h hauteur d'eau au-dessus du fond du trou, $2R$ diamètre du trou. La courbe obtenue est découpée en tronçons en nombre variable (de 1 à 5), en s'aidant si possible de la description pédologique du profil. Les surfaces de séparation des couches sont définies par les coordonnées des points correspondants sur la courbe soit (P_2, t_2) , (P_3, t_3) , ..., (P_5, t_5) . En outre, le tronçon du bas est défini par le point (P_1, t_1) et la surface de l'eau au début de la mesure $(0, 0)$ ou (P_6, t_6) si la mesure commence au-dessous de la surface du sol. On note que : $P = PM - h$, avec PM moyenne des profondeurs totales du trou avant et après la mesure. Les résultats sont reportés sur une carte du modèle ci-après. P_1 est en centimètres et T_1 en secondes.

Lorsque le découpage comporte moins de 5 tronçons et qu'on s'arrête à P_i avec $i < 6$, l'emplacement P_{i+1} doit contenir la valeur 700 conventionnelle.

La carte porte de plus le nom du bassin (en alphanumérique sur 8 colonnes), le numéro du profil (en alphanumérique sur 3 colonnes), la date (jour 2 colonnes, mois 2 colonnes, année 4 colonnes), la profondeur du trou avant la mesure PD , la profondeur après la mesure PF et, enfin, le diamètre du trou D en millimètres.

Station	Profil	Jour	Mois	An	P ₁	T ₁	P ₂	T ₂	P ₃	T ₃	P ₄	T ₄	P ₅	T ₅	P ₆	T ₆	PD	PF	D
00000000	0000	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
11111111	1111	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
22222222	2222	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
33333333	3333	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
44444444	4444	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
55555555	5555	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
66666666	6666	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
77777777	7777	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
88888888	8888	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88
99999999	9999	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99

Le texte du programme est donné ci-dessous :

La feuille imprimée portant les résultats pour chaque profil comporte : l'identification du bassin et du profil, la date, les perméabilités des différents horizons calculées à $0,1 \cdot 10^{-6}$ près en m/s. Accessoirement, le nombre d'itérations (limité à 300) est indiqué pour chaque couche, cette indication pouvant être supprimée en retirant l'ordre d'impression correspondant.

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] DUBREUIL (P.) - 1967 - Point de vue théorique sur le rôle du sol dans le cycle hydrologique. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. IV, n° 1.
- [2] DUBREUIL (P.) - 1967 - Détermination des paramètres du sol influant sur le cycle hydrologique dans les bassins représentatifs et expérimentaux (Protocoles de mesures). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. IV, n° 3.
- [3] OLSON, SWARTZENDRUBER - 1960 - Model study of the double ring infiltrometer in layered systems. *7^e Congrès de Science du sol*. Madison, USA, vol. VI, n° 5.
- [4] DEMOLON (A.) - - Dynamique du sol. Edit. Dunod, Paris.

```

C          CALCUL DES COEFFICIENT DE PERMEABILITE DES SOLS          PRH594
C          OBTENUS PAR LA METHODE PORCHET MODIFIEE                PRH599
C          SUBROUTINE YTER                                          PRH599
COMMON H,DIAH,P(6),T(6),C(5),V(5)
120 FORMAT(1H,5X,K(1),11,'=','E11.3,M/S')          PRH599
121 FORMAT(1H,5X,'PRECISION 0.1E-06 NON ATTEINTE,LA VALEUR APPROCHEE PRH599
10E K(1),11,' EST','E11.3,LE CALCUL SE POURSUIT','5X,'AVEC CETTE V PRH599
122 FORMAT(1H,5X,'NOMBRE DE CYCLES ITERATIFS N=',13)
X0=0.5E-4
EPSIL=0.1E-06
R=X0*0.01
N=1
30 AZ=ALOG((X0*(P(N)-P(N+1))+C(N-1))/C(N-1))
S=DIAH/4.
Y=C*AZ/(T(N)-T(N+1))-X0
U=ABS(Y)
IF(U.LE.EPSIL)GO TO 11
X0=X0+Y
N=N+1
R=X0*.J.31
IF(N.GT.300) GO TO 31
GO TO 30
31 WRITE(3,121)M,R,U
V(N)=R
GO TO 12
11 V(N)=R
WRITE(3,122)N
WRITE(3,120)M,V(N)
12 C(N)=C(N-1)+X0*(P(N)-P(N+1))
RETURN
END

```

```

C          PROGRAMME PRINCIPAL                                     PRH599
C          COMMON H,DIAH,P(6),T(6),C(5),V(5)                   PRH599
100 FORMAT(24A,4A,2A2,A4,6(F3.0,F4.0),2F3.0,F3.1)
101 FORMAT(1H1,////,6X,'BASSIN',2X,2A4,/,6X,'PROFIL',2X,A3,/,6X,'DAT PRH599
1E DE LA MESURE PORCHET',2X,A2,/,6X,'A2',/,6X,'PROFONDEUR DEBU PRH599
2T',1X,F4.0,/,6X,'PROFONDEUR FIN',1X,F4.0,/,6X,'DIAMETRE',1X,F3.1)
102 FORMAT(1H,5X,K(1),1X,E11.3,M/S')
105 FORMAT(1H,5X,6('P=',F4.3,1X,'T=',F5.0,2X))
108 FORMAT(1H,/,2X,'CALCUL TERMINE,SOL A',1X,11,1X,'COUCHE(S) DE PERM
1EABILITE(S)',/,2X,5('K(1),11,'=','E11.3,1X))
130 FORMAT(1H,5X,'CALCUL ARRETE,PROFONDEURS INCOHERENTES')
110 FORMAT(1H,2X,'PERMEABILITE EN METRE/SECONDE')
C          LECTURE CARTES ET ECRITURE DONNEES                   PRH599
1 READ(1,100,END=20)ASTA1,ASTA2,PR,JO,MO,IAN,(P(I),T(I),I=1,6),PD,PF PRH599
1,DIAH
2 WRITE(3,101)ASTA1,ASTA2,PR,JO,MO,IAN,PD,PF,DIAH
WRITE(3,105)(P(I),T(I),I=1,6)
C          CALCUL DE K1
N=1
PN=(PD+PF)/2.
IF(P(1).GT.PN)GO TO 40
Y1=PN-P(1)* DIAH/4.
Y2=PN-P(2)* DIAH/4.
Z=Y1/Y2
ZL=ALOG(Z)
V(1)=(DIAH/4.)*ZL/(T(2)-T(1))*0.01
WRITE(3,102)V(1)
C(1)=V(1)*(PW-P(2)*DIAH/4.)*100
4 IF(M.EQ.5)GO TO 39
N=N+2
W=1
IF(P(F).EQ.700) GO TO 39
IF(P(F).GT.P(N))GO TO 40
C          CALCUL DE K2,K3,K4,K5 PAR ITERATION
N=N+1
CALL YTER
GO TO 4
39 WRITE(3,103)M,11,V(1),L=1,N
WRITE(3,110)
GO TO 1
40 WRITE(3,130)
GO TO 1
20 STOP
END

```

BASSIN LAC ELIA

PROFIL 1C

DATE DE LA MESURE PORCHET 11.03.1970

PROFONDEUR DEBUT 56.

PROFONDEUR FIN 56.

DIAMETRE 6.0

P= 45. T= 546. P= 42. T= 366. P= 13. T= 36. P= 0. T= 0. P= 700. T= 0. P= 0. T= 0.

K1= 0.231E-04M/S

NOMBRE DE CYCLES ITERATIFS N= 16

K(2)= 0.157E-03M/S

NOMBRE DE CYCLES ITERATIFS N= 54

K(3)= 0.402E-03M/S

CALCUL TERMINE,SOL A 3 COUCHE(S) DE PERMEABILITE(S)
 K(1)= 0.231E-04 K(2)= 0.157E-03 K(3)= 0.402E-03 K1
 PERMEABILITE EN METRE/SECONDE