

REMARQUES SUR QUELQUES MÉTHODES DE DÉTERMINATION DE LA VITESSE DE FILTRATION DE L'EAU DANS UN SOL

par

J.-C. TALINEAU

Chargé de Recherches (ORSTOM)

I) INTRODUCTION

La nutrition minérale et l'alimentation hydrique du végétal dépendent étroitement de l'état physique du sol. L'amélioration de ce dernier suppose la connaissance et l'estimation de certains paramètres propres à le caractériser. On s'accorde généralement pour dire que c'est l'état structural qui détermine la circulation de l'air et de l'eau dans un sol et, par voie de conséquence, le développement racinaire. La nature même du matériau et sa porosité complexe rendent difficile et fixent des conditions strictes à l'application des lois physiques classiques destinées à expliquer la circulation des fluides dans un tel milieu.

Une des méthodes d'appréciation des qualités physiques d'un sol consiste ainsi à mesurer sa perméabilité dans des conditions de saturation qui autorisent l'application de la loi de DARCY. Les techniques utilisées sont basées sur la percolation de l'eau à travers un poids de terre donné. On mesure ainsi ce que certains auteurs appellent un coefficient de perméabilité, d'autres une vitesse de filtration.

La présente étude a pour but de présenter, en les critiquant, trois méthodes tendant à estimer un tel paramètre. Les résultats obtenus à l'aide de chacune des méthodes conduisent à l'énoncé d'hypothèses cherchant à expliquer l'influence de certains facteurs sur la perméabilité du sol. Les trois méthodes utilisées sont les suivantes :

technique de percolation appliquée au laboratoire sur des échantillons remaniés issus d'un tamisage à travers une passoire de 2,5 mm à trous ronds ;

technique de percolation appliquée au laboratoire sur des échantillons non remaniés prélevés directement sur le terrain et enrobés de paraffine ;

relevés de profils hydriques à l'aide de la sonde à neutrons sur un sol en place et soumis à une irrigation.

Les deux premières méthodes sont actuellement utilisées dans le cadre d'une expérimentation multilocale ayant pour but d'étudier les interactions plante-sol dans le cas des plantes fourragères et de couverture.

II) MATERIEL D'ETUDE ET METHODES EXPERIMENTALES

A) MILIEU D'ETUDE

Les échantillons étudiés proviennent des sols de la station expérimentale du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé. Rappelons qu'il s'agit de sols ferrallitiques sableux relativement homogènes situés sur un plateau à très faible pente, dont les caractéristiques granulométriques de quelques horizons sont données au tableau I.

C. R. S. T. O. M.

- 3 (MARS 1971)

Collection de Référence

n°/3836

B

TABLEAU I

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DE QUELQUES HORIZONS DU SOL ÉTUDIÉ (TENEURS EN %)
(moyenne de 16 échantillons issus chacun de trois prélèvements; surface totale prospectée : 5.000 m²)

Horizons	0-10	10-25	30-40	50-60
Argile	8,6	9,5	13,2	16,4
Limon fin	1,6	1,9	2,0	1,8
Limon grossier	1,4	1,9	1,9	1,6
Sable fin	17,6	18,5	17,7	15,0
Sable grossier	68,6	66,6	64,5	64,4

On notera pour tous les horizons considérés le pourcentage élevé de sables grossiers dont la taille est comprise entre 0,5 mm et 2 mm. Il est permis de penser que ces sables jouent un rôle important dans les tests de perméabilité, car ce sont des éléments constitutifs de la macroporosité du sol.

B) METHODES EXPERIMENTALES

1) LE COEFFICIENT DE PERMEABILITE K

Le débit Q d'eau qui s'écoule verticalement à travers un certain volume de terre soumis à un plan d'eau en surface est donné par la loi de DARCY selon la formule :

$$Q = K. S. \frac{H}{l}$$

où :

S est la surface du sol soumise au plan d'eau,

H, la hauteur du niveau du plan d'eau par rapport à un plan de référence,

l, la hauteur de l'échantillon de sol par rapport au même plan de référence.

K a ainsi les dimensions d'une vitesse et s'exprime en centimètres par seconde si Q est évalué en centimètres cubes par seconde.

HÉNIN et ses collaborateurs (1960), reprenant les travaux de KOZENY (1932), notent que K dépend de diverses caractéristiques du sol, en particulier du quotient $\frac{Po^3}{(1 - P)^2}$ dans lequel P repré-

sente la porosité totale et Po, approximativement, la macroporosité. Nous verrons plus loin comment ces caractéristiques permettent l'interprétation des résultats.

On notera également que, d'une façon générale, la vitesse de filtration K décroît de façon sensible au cours de la filtration. Cette diminution peut s'expliquer par le fait que le matériau testé subit au cours de la percolation un gonflement et un tassement qui affectent sa porosité. Ce fait sera discuté plus loin.

2) METHODE DE MESURE SUR ECHANTILLON REMANIE

Cette méthode a été décrite par HÉNIN (1960). Elle utilise une technique de percolation sous charge constante à travers une colonne de sol obtenue par remplissage d'un tube de verre, dans des conditions standardisées. L'eau de percolation recueillie pendant les cinq premières minutes est éliminée, on mesure ensuite le volume percolé pendant une heure.

La manipulation est délicate : nous avons remarqué qu'elle est d'autant plus difficilement reproductible que le pourcentage de sables grossiers est élevé. Lors du remplissage du tube de verre, on ne peut reconstituer la macroporosité du sol en place ; en particulier, on ne dispose plus des racines des plantes qui ont été éliminées par tamisage. Etant donné que seule la microporosité du sol est respectée, l'interprétation du coefficient de perméabilité ainsi déterminé est rendue plus délicate. En effet :

d'une part, la microporosité de l'échantillon se traduit par de fins canalicules situés dans les agrégats de taille inférieure à 2,5 mm ; il convient de dire que ce ne sont que des itinéraires secondaires pour l'eau ;

d'autre part, il existe une instabilité à l'eau de tels agrégats. Elle aboutit à leur gonflement et entraîne un tassement de l'échantillon. C'est d'ailleurs pourquoi la mesure est effectuée au cours de la première heure.

Pour toutes ces raisons, il y a lieu de faire des réserves sur la valeur du coefficient K ainsi mesuré quand il s'agit de l'assimiler à une vitesse de filtration caractéristique d'un terrain donné. Il convient de noter que ce test conserve toute sa valeur quand, associé à une analyse d'agrégats, il permet une estimation de la stabilité structurale et un classement des sols selon cette caractéristique.

3) METHODE DE MESURE SUR ECHANTILLON DE SOL NON PERTURBE

Cette méthode, mise au point en 1954 par BOURRIER, porte le nom de « Méthode VERGIÈRE ». Elle consiste à mesurer des caractéristiques hydrodynamiques des sols en place à partir d'un échantillon prélevé sur le terrain, sans perturbation, dans un enrobage de paraffine. La technique est particulièrement facile à mettre en œuvre dans un sol sableux.

La représentativité de l'échantillon obtenue grâce à la conservation de la structure du sol confère à la méthode un avantage indéniable.

La méthode contribue à l'estimation de quelques caractéristiques hydrodynamiques du sol, notamment sa densité apparente et divers taux d'humidité. La vitesse de filtration est obtenue en réalisant un montage spécial tel que la perte de charge subie par l'eau traversant le massif de sol soit constante. L'application de la loi de DARCY conduit à l'estimation du coefficient K.

Cette technique permet de suivre, avec facilité et avec une moins grande perturbation de l'échantillon que la précédente, l'évolution de la vitesse de filtration dans le temps ; elle est généralement suivie pendant quatre heures.

4) EXISTENCE D'UNE METHODE NEUTRONIQUE

L'étude de l'infiltration de l'eau dans le sol et notamment la détermination d'avancement du front d'humidité est réalisable à l'aide d'un humidimètre à neutrons. Elle a déjà été mise en œuvre par RANÇON (1967) dans le cadre d'une étude de sûreté radiologique des sites.

L'appareil de mesure utilisé est un humidimètre à neutrons de profondeur du type HP 310 (source Am-Be) associé à un dispositif de comptage EC 310.

La méthode consiste à créer, autour d'un tube en alliage d'aluminium AG 3 implanté à l'avance, une cuvette d'irrigation dont la hauteur d'eau est constante. Nous avons dû prendre soin, dans notre cas, de laisser sans irrigation une zone de terrain de 10 cm de rayon autour du tube pour limiter des infiltrations préférentielles le long des parois du tube. Il suffit alors de procéder au relevé régulier des profils hydriques dans le temps pendant que l'irrigation se poursuit et de suivre la progression du front d'humidité.

Nous estimons cette méthode préférable à celle qui consiste à mesurer des doses d'irrigation. En effet, cette dernière ne rend pas compte des différences existantes entre horizons et, de plus, manque de précision dans l'expression de la quantité d'eau apportée en millimètres.

La méthode neutronique présente cependant une insuffisance : elle ne permet pas la détermination des humidités volumiques dans les horizons de surface de 0 à 15 cm.

Enfin, à partir du moment où l'on obtient le profil de saturation, elle ne permet plus de suivre l'évolution de la vitesse de filtration dans le temps.

III) RESULTATS ET DISCUSSION

Le coefficient de perméabilité K, selon la technique de percolation, a été déterminé pour quatre horizons donnés et sur seize échantillons par horizon prélevés en août 1967.

La vitesse de filtration K, selon la méthode VERGIÈRE, a été déterminée pour cinq horizons et sur seize échantillons par horizon prélevés en mars 1967.

Les mesures d'infiltration de l'eau dans le sol à l'aide de la méthode neutronique ont été effectuées en mars 1969 sur une parcelle sans végétation.

A) PRECISION DES RESULTATS OBTENUS

La comparaison porte seulement sur les deux méthodes comportant des répétitions. Quelques caractéristiques de dispersion et de précision des mesures sont données dans le tableau II.

TABLEAU II
DONNÉES STATISTIQUES SUR LA DÉTERMINATION DE K
(exprimé en 10^{-3} cm s⁻¹)

Horizon	0-10		10-20		30-40		40-50		50-60	
	Coefficient de variation (%)	Moyenne et précision *	Coefficient de variation (%)	Moyenne et précision *	Coefficient de variation (%)	Moyenne et précision *	Coefficient de variation (%)	Moyenne et précision *	Coefficient de variation (%)	Moyenne et précision *
K	45,2	2,6 ± 0,7	47,3	4,8 ± 1,8	45,5	5,8 ± 1,5			48,7	5,9 ± 1,6
Percolation										
K	33,5	6,3 ± 1,2	28,2	4,0 ± 0,6	27,0	8,1 ± 1,1	28,2	10,0 ± 1,6	41,5	7,8 ± 1,7
Vergière										

* Intervalle de confiance choisi à 95 %.

La dispersion des mesures obtenues par percolation est importante puisque le coefficient de variation dépasse toujours 45 %. La précision est la meilleure pour l'horizon 0 à 10 cm ; il est possible que l'état structural du sol soit le facteur prédominant de la perméabilité de cet horizon.

La méthode VERGIÈRE permet d'obtenir des résultats moins dispersés. Néanmoins, le coefficient de variation des mesures de l'horizon de profondeur est encore élevé. On rapprochera ce résultat d'un autre trouvé par PICARD (1969) pour la distribution des racines avec la profondeur. Les coefficients de variation calculés sur des poids secs ou surface diamétrale de racines augmentent avec la profondeur pour atteindre 50 % à partir de 60 cm.

Si l'on admet que les racines constituent une part importante de la macroporosité du sol en place, il peut donc exister un lien assez étroit entre la macrostructure, la quantité de racines et la vitesse de filtration de l'eau dans les horizons profonds.

B) COMPARAISON DES RESULTATS

Il s'agit, dans une première étape, de comparer les résultats obtenus sur échantillons remanié (technique de percolation) à ceux obtenus sur échantillon non perturbé, selon la méthode VERGIÈRE. On trouvera dans le tableau III les différentes valeurs de K obtenues par ces deux méthodes.

TABLEAU III
RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX
(K exprimé en 10^{-3} cm s⁻¹)

Horizon	0-10	10-20	30-40	40-50	50-60
K par percolation (1 heure)	2,6	4,8	5,8		5,9
K Vergière après 1 heure de filtration	7,1	5,4	11,0	14,5	12,0
K Vergière après 3 heures de filtration	6,3	4,0	8,1	10,0	7,8
Diminution de K Vergière (%)	11,3	26,0	26,4	31,0	35,0

1) COMPARAISON DES DEUX METHODES

La nature du test est sensiblement la même pour les deux méthodes puisqu'il s'agit de mesurer un écoulement au travers d'un échantillon de sol en régime permanent.

Les résultats sont relativement semblables pour les deux techniques, surtout si l'on tient compte des dates de prélèvement des échantillons. En effet, le prélèvement effectué en mars, selon la méthode VERGIÈRE, correspond à un meilleur état physique du sol que celui relatif aux échantillons remaniés qui ont été prélevés en août.

Néanmoins, la comparaison est plus rigoureuse si l'on retient le coefficient K (VERGIÈRE) après une heure de filtration, ce qui a pour effet d'augmenter les écarts. De plus, les variations observées pour les deux horizons de surface (0 à 10 cm et 10 à 20 cm) ne se produisent pas dans le même sens. Les divergences observées peuvent être ainsi expliquées :

Pour l'horizon 0 à 10 cm et la mesure effectuée sur échantillon remanié et tamisé, seule la microporosité due aux agrégats est respectée. La présence d'une quantité non négligeable de matière organique peut provoquer un gonflement et un tassement de l'échantillon. Les valeurs de K plus élevées, mesurées par la méthode VERGIÈRE, peuvent aussi s'expliquer par le respect au moment du prélèvement de l'intégrité du système racinaire. Ce dernier assure une orientation générale verticale des fissures qui constituent les itinéraires principaux pour la circulation de l'eau.

De fréquentes observations du profil cultural permettent de se rendre compte du tassement de l'horizon 10 à 20 cm : ce tassement est dû, d'une part, à la remontée au moment du labour d'une partie de l'horizon appauvri en argile, et, d'autre part, au fait que dans ce cas précis le fond du labour se trouve approximativement à 20 cm de profondeur. Le coefficient K obtenu par la méthode VERGIÈRE intègre parfaitement ces facteurs qui se traduisent par des valeurs de perméabilité les plus faibles de tout le profil.

Pour les horizons de profondeur, les écarts constatés sont également dus à des différences de macroporosité qui ne peut être celle du sol en place sur un échantillon remanié.

2) VARIATIONS OBSERVEES AU COURS DE LA PERCOLATION

Seules ont été reportées ici les variations sur les échantillons non perturbés.

On constate une faible diminution de la vitesse de filtration au cours de la percolation pour l'horizon de surface. Cela s'explique par le fait que les biopores sont en majorité occupés par les racines et que les agrégats sont enserrés dans un réseau très dense de fines radicelles. Macroporosité et microporosité ne sont donc que peu affectées par l'écoulement.

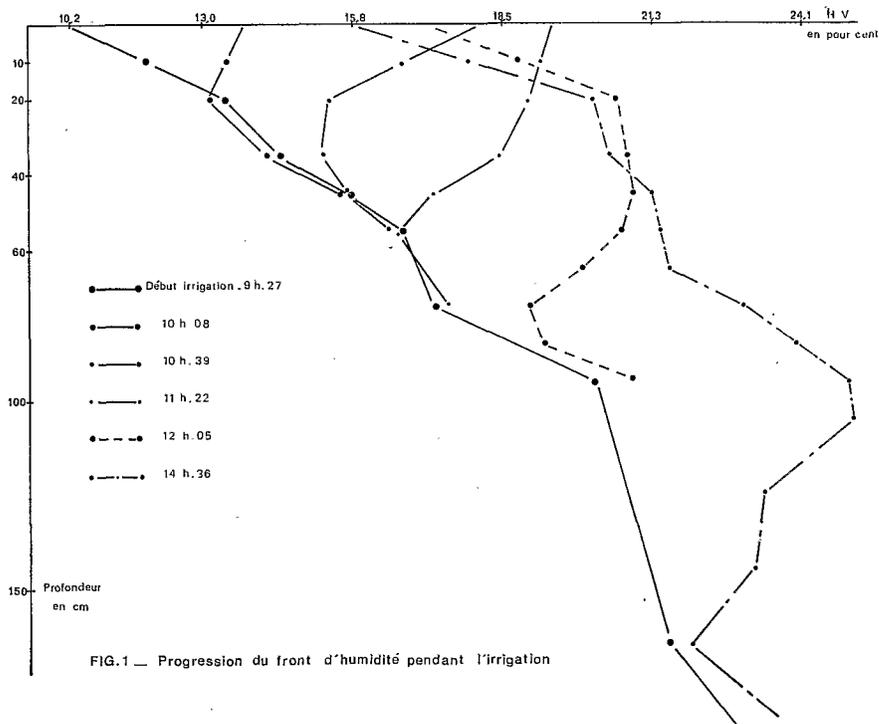
Il n'en va pas de même pour les horizons de profondeur qui présentent des diminutions de la vitesse de filtration allant de 25 % à 35 %. On peut donc parler pour ces horizons de moins grande stabilité des macropores et des micropores qui sont colmatés par éclatement et gonflement des agrégats sous l'action de l'eau, provoquant ainsi une chute importante de la perméabilité.

C) INTERPRETATION DES PROFILS HYDRIQUES

L'existence de cette troisième méthode de mesure de l'infiltration de l'eau dans le sol *in situ*, à l'aide d'un humidifère à neutrons, permet d'avoir une estimation de la représentativité des mesures effectuées par les autres tests.

La méthode neutronique présente comme avantage indéniable de restituer la superposition des différents horizons et le gradient de potentiel capillaire, donc de traduire fidèlement les mouvements d'eau entre les horizons.

Les limites de la méthode résident dans le fait qu'on ne peut déterminer les taux d'humidité des horizons superficiels. De plus, dans les sols sableux très perméables, les vitesses de filtration élevées entraînent une diminution de la précision des résultats étant donné la discontinuité des mesures due au temps mis pour relever un profil.



Sur la figure 1, il a été reporté plusieurs profils relevés au cours d'une irrigation, avec plan d'eau continu en surface, autour d'un tube placé sur un terrain nu. Sur ce graphique, il est aisé de suivre la progression du front d'humidité avec la profondeur. Ces profils confirment parfaitement les résultats trouvés par ailleurs qui notent la présence, au cours de l'infiltration de l'eau dans le sol :

d'un front d'humectation à l'humidité sensiblement constante ; l'importance de ce front varie selon les horizons ;

d'une zone à fort gradient d'humidité surmontant ce front et qui se déplace parallèlement à elle-même. C'est là une confirmation de l'existence du phénomène de translation (FÉODOROFF, 1965) : cette translation a lieu en profondeur dans le sens des humidités croissantes.

La vitesse d'avancement du front, de même que celle de la zone à fort gradient d'humidité, facilement mesurable sur de tels profils, traduit la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. Les résultats sont les suivants :

Horizon	K (en $10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$)
20 à 35 cm	10,7
35 à 55 cm	8,3
55 à 90 cm	8,5
90 à 165 cm	8,9

Les humidités initiales relativement élevées, en tout cas proches de la capacité au champ, rencontrées sur un terrain sans végétation permettent de se rapprocher des conditions expérimentales des tests de laboratoire.

Les valeurs ci-dessus sont proches de celles trouvées sur échantillons non perturbés, leur relative constance avec la profondeur montre qu'il n'y a pas d'obstacle majeur à la pénétration de l'eau dans ce type de sol et que le profil est homogène.

La mesure, effectuée sur un terrain dépourvu de racines aboutissant à des valeurs de K légèrement inférieures à celles obtenues par la méthode VERGIÈRE, permet de penser que le système racinaire des plantes constitue une partie importante de la macroporosité du milieu.

D) INTERET DES MESURES SUR ECHANTILLONS NON REMANIES

La principale utilisation du coefficient K mesuré selon la méthode VERGIÈRE est de permettre un classement des sols selon leur vocation à l'irrigation.

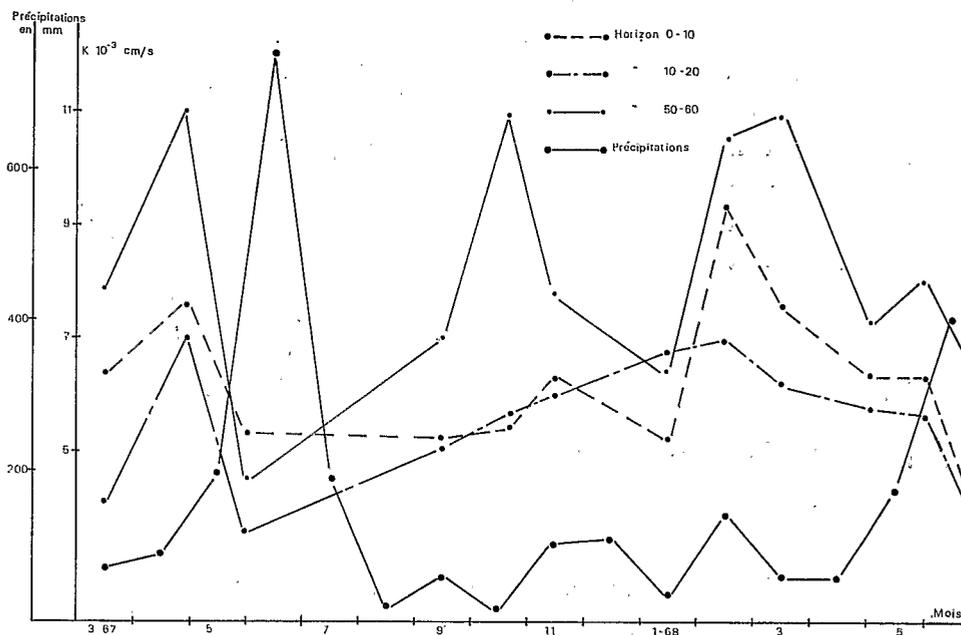


FIG. 2 — Evolution de K « Vergière » dans le temps

Une application, qui prend une grande importance en région tropicale à précipitations élevées et intenses, est la mesure du débit maximal que peut absorber un terrain. Cette quantité d'eau est tout d'abord limitée par le débit maximal que peut assurer la couche superficielle sous charge ; ce débit fixe la valeur maximale de la pluviométrie qui évite le ruissellement. Il est également possible de détecter les horizons les moins perméables d'un profil susceptibles de provoquer des engorgements temporaires.

La méthode semble également suffisamment sensible pour traduire les variations saisonnières de l'état physique du sol. Sur la figure 2 sont reportées les valeurs de K^* relatives à des échantillons prélevés de mars 1967 à juin 1968 sur une jachère à *Panicum maximum* âgée de 4 ans. Sur le même graphique, on a reporté les précipitations mensuelles pour la période considérée. On retrouve bien les résultats de COMBEAU et QUANTIN (1963), à savoir que l'état physique du sol est le plus dégradé pendant les mois les plus pluvieux, ce qui se traduit par des valeurs de K très faibles. Les variations sont très comparables pour les trois horizons considérés. La baisse très faible de K à la fin de l'année 1967 correspond à une deuxième saison des pluies à peine marquée ; pour l'horizon 10 à 20 cm, il n'y a même pas diminution. Par contre, les précipitations relativement élevées du début 1968 entraînent une chute des valeurs de K dès février pour les horizons 0 à 10 cm et 10 à 20 cm, en mars, pour l'horizon 50 à 60 cm.

IV) CONCLUSION

Les différences observées pour les valeurs des coefficients de perméabilité mesurés à l'aide des diverses méthodes peuvent s'expliquer par le fait qu'il existe plusieurs facteurs déterminant la perméabilité d'un sol.

La technique de percolation sur échantillon remanié ne respecte que la microporosité du sol due aux agrégats. Le coefficient K ainsi mesuré est donc essentiellement une caractéristique de l'état structural. Il ne peut traduire la perméabilité d'un milieu qui, dans un sol sableux à fort pourcentage de sables grossiers, dépend surtout de la macroporosité.

Le coefficient K , mesuré sur échantillon non perturbé par la méthode VERGIÈRE ou directement sur le sol en place par le méthode neutronique, intègre à la fois l'influence de la microporosité et une partie de la macroporosité (celle due aux racines et aux biopores de taille moyenne) : c'est une caractéristique hydrodynamique qui prend tout son intérêt dans des études d'irrigation ou de drainage des sols.

Loin d'entrer en concurrence, les deux méthodes sont complémentaires, mais il importe de préciser la signification des caractéristiques mesurées dans chacun des cas.

La méthode neutronique semble idéale puisqu'elle s'applique au sol *in situ*. Elle est néanmoins délicate à mettre en place, longue et coûteuse dans ses répétitions. Largement dépendante de l'hétérogénéité du terrain, elle exige pour être plus précise d'être mise en œuvre sur un sol sans végétation. Enfin, elle ne permet pas de suivre l'écoulement de l'eau dans le sol en régime permanent une fois la saturation atteinte ; sa contribution à l'estimation du drainage est donc limitée.

Les limites de chaque méthode étant ainsi précisées, il devient possible d'élaborer un protocole expérimental destiné à une étude comparative plus stricte des trois méthodes envisagées.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) BOURRIER (J.), 1965. La mesure des caractéristiques hydrodynamiques des sols par la méthode VERGIÈRE. *Bull. tech. Génie Rural*, 73, 96 p.
- 2) COMBEAU (A.), QUANTIN (P.), 1963. Observations sur les variations dans le temps de la stabilité structurale des sols en région tropicale. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, 3, p. 17-26.
- 3) FEODOROFF (A.), 1965. Etude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante. *Ann. agron.*, 16, p. 127-75.
- 4) HÉNIN (S.) *et al.*, 1960. Le profil cultural, SEIA, 320 p.
- 5) PICARD (D.). Comparaison de deux techniques de prélèvement d'échantillons de racines. *Cah. ORSTOM, Sér. Biol.*, 9 (sous presse).
- 6) RANCON (D.), 1967. Evolution de l'humidité d'un sol soumis à un apport continu d'eau sur une petite surface. *Proceedings of a Symposium, Istanbul, IAEA Vienne, 12-16 June 1967*, p. 125-35.

* K mesuré après trois heures d'infiltration pour faire abstraction de l'influence du taux d'humidité de l'échantillon au moment du prélèvement.

RESUME. — *Diverses méthodes permettant l'appréciation de l'état physique d'un sol au moyen de tests de perméabilité (dans les conditions de la loi de DARCY) sont décrites et leurs limites précisées.*

Les différences essentielles proviennent du mode de prélèvement des échantillons dont la représentativité est analysée. Dans chacun des cas, il est procédé à une étude de l'influence de divers facteurs, notamment des éléments constitutifs de la porosité, sur la valeur des coefficients de perméabilité.

Pour terminer, il est fait état de l'intérêt des différentes méthodes employées.

SUMMARY.—REMARKS ON SOME METHODS USED TO DETERMINE THE RATE OF WATER FILTRATION IN A SOIL.

Different tests on the permeability of soil (DARCY law conditions) are described and their limits outlined in order to appreciate the physical components of the soil .

The essential differences mainly result from the choosen method of extracting samples, the representativity of which is analyzed.

In each case a study is made on the influence of several factors specially the constitutive elements of the porosity as for the permeability coefficients worth.

Finally, each method used is stated in order to show its interest.

RESUMEN. — **APUNTES SOBRE ALGUNOS METODOS DE DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DE FILTRACION DEL AGUA EN EL SUELO.**

Se describen varios métodos que permiten apreciar el estado físico de un suelo mediante la realización de pruebas de permeabilidad (en las condiciones de la ley de DARCY), indicándose los límites de cada método.

Las diferencias esenciales están relacionadas con el modo de tomar las muestras cuya representatividad se analiza. En cada caso, se estudia la influencia de varios factores, especialmente los elementos constitutivos de la porosidad, en el valor de los coeficientes de permeabilidad.

Por último, se señala el interés presentado por los distintos métodos usados.

L'AGRONOMIE TROPICALE

Extrait du Vol. XXIV, n° 12
DÉCEMBRE 1969

REMARQUES SUR QUELQUES MÉTHODES DE DÉTERMINATION DE LA VITESSE DE FILTRATION DE L'EAU DANS UN SOL

par

J.-C. TALINEAU

Chargé de Recherches (ORSTOM)

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 13836

Cote : B

13836