

— pour les tubes longs, humectés par le haut, c'est l'inverse qui se produit. La diminution de débit est plus forte que celle prévue.

Pour juger de la position des points par rapport à la première bissectrice, on considère les secteurs limités par les droites passant par l'origine de pente 0,85-1,15 et 0,9-1,1.

Dans le secteur 0,85-1,15, on trouve 25 p. 100 des tubes longs et 42 p. 100 des tubes courts. On retrouve les différences déjà signalées entre tubes longs et tubes courts (Section 2. 11). On peut avancer des explications à cet état de fait. Rappelons d'abord qu'il est plus facile de mettre en évidence l'effet d'un élément grossier sur l'infiltration pour un tube court que pour un tube long. La présence d'un élément grossier peut favoriser l'emprisonnement d'air définitif en limitant la section par laquelle l'air peut s'échapper ; cet emprisonnement peut être plus important pour les tubes longs humectés sans précaution. Ces hypothèses n'expliquent pas les mesures aberrantes qui proviennent certainement des difficultés que l'on a pour tasser de façon homogène le sable au voisinage de l'élément grossier.

En conclusion, les perturbations apportées par l'élément grossier, tant à la porosité du sable placé à son voisinage, qu'au remplissage du filtre par l'eau, ne permettent pas de vérifier la validité de l'explication par les résistances hydrauliques.

2. 22. Infiltration verticale avec plan d'eau.

Le tube est rempli d'un matériau meuble dont la porosité est P (p. 100 volume apparent) et la perméabilité K_1 . Nous allons considérer le déplacement du front humide dans chacun des tronçons AB, BC et CD (fig. 16), en désignant par z_1, z_2, z_3 ses cotes dans ces différents tronçons ; les origines de ces cotes se trouvent respectivement en A, B et C.

Dans le tronçon AB de longueur l_1 et avec les notations définies au début du chapitre, on a :

$$D = \frac{PS}{100} dz_1/dt = KS \left(\frac{\psi + a + z_1}{z_1} \right)$$

$$Sdz_1/dt = \frac{100}{P} \cdot \frac{\psi + a + z_1}{z_1/K_1S}$$

On ne simplifie pas par S pour conserver au dénominateur du 2^e membre l'expression complète de la résistance hydraulique. A partir de maintenant, nous écrirons les équations caractéristiques de chaque situation sous la forme précédente.

Au-delà du point B, pour le tronçon BC, la section utile devient $(S - u)$ et la résistance hydraulique J_2 est la somme de celle du tronçon AB et du tronçon de longueur z_2 .

$$(S - u) dz_2/dt = \frac{100}{P} \cdot \frac{\psi + a + l_1 + z_2}{l_1/K_1S + z_2/K_1(S - u)}$$

$$dz_2/dt = \frac{100}{P} \cdot \frac{\psi + a + l_1 + z_2}{l_1(S - u)/K_1S + z_2/K_1}$$

Pour le tronçon CD, on obtient par un raisonnement analogue :

$$dz_3/dt = \frac{100}{P} \cdot \frac{\psi + a + l_1 + l_2 + z_3}{l_1/K_1 + l_2S/K_1(S - u) + z_3/K_1}$$

On retrouve la vitesse du front humide en l'absence d'obstacle, en écrivant que $u = 0$ dans les deux dernières expressions.

Lorsque le front humide est au niveau de l'élément rigide, il y a accélération par rapport au témoin sans élément, car la résistance hydraulique en présence d'élément : $l_1(S - u)/K_1S + z_2/K_1$ est plus petite que lorsqu'il n'y a pas d'élément : $l_1/K_1 + z_2/K_1$, puisque $(S - u)/S < 1$.

Par contre, après avoir dépassé l'élément, le front humide marque un ralentissement par rapport au tube sans élément. En effet, avec élément, la résistance hydraulique : $l_1/K_1 + l_2S/K_1(S - u) + z_3/K_1$,

est supérieure à ce qu'elle était sans élément :

$$l_1/K_1 + l_2/K_1 + z_3/K_1, \text{ puisque } S/(S - u) > 1.$$

Pour obtenir la loi $z = f(t)$, on intégrera les équations différentielles précédentes dans les intervalles BC et CD seulement, la solution étant déjà connue pour l'intervalle AB.

Ces équations étant analogues, on pose :

Pour l'intervalle BC :

$$\begin{aligned} A &= \psi + a + l_1 \\ B &= l_1(S - u)/K_1S \\ C &= l_1/K_1 \end{aligned}$$

Pour l'intervalle CD :

$$\begin{aligned} A &= \psi + a + l_1 + l_2 \\ B &= l_1/K_1 + l_2S/K_1(S - u) \end{aligned}$$

L'équation prend alors la forme générale :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{100}{P} \cdot \frac{A + z}{B + Cz} \quad \frac{(B + Cz) dz}{A + z} = \frac{100}{P} dt$$

$$\frac{B + Cz}{A + z} = \frac{B}{A + z} + \frac{Cz}{A + z} = \frac{B}{A + z} + \frac{C(A + z - A)}{A + z} = \frac{B}{A + z} + C - \frac{AC}{A + z}$$

Sous cette forme, l'expression peut être facilement intégrée. La valeur de la constante d'intégration est déterminée en écrivant que pour $t = 0, z = 0$.

En définitive, on obtient :

— pour le tronçon BC :

$$z_2 + \left[\frac{l_1(S - u)}{S} - (\psi + a + l_1) \right] \text{Log} \frac{\psi + a + l_1 + z_2}{\psi + a + l_1} = \frac{100 K_1}{P} t$$

— pour le tronçon CD :

$$z_3 + \left[l_1 + \frac{l_2S}{S - u} - (\psi + a + l_1 + l_2) \right] \text{Log} \frac{\psi + a + l_1 + l_2 + z_3}{\psi + a + l_1 + l_2} = \frac{100}{P} K_1 t$$

Nous avons signalé, dans la section 2. 21, que les difficultés expérimentales compliquaient la mise en évidence de l'effet des éléments grossiers sur la filtration. En particulier, on a constaté que le calcul des résistances hydrauliques ne donnait un accord convenable entre la réalité et l'expérience que pour certains tubes, ce qui constitue un indice de bonnes conditions expérimentales. C'est sur ceux-ci que nous tenterons d'expliquer les modifications de la courbe $z = f(t)$ relative à l'infiltration.

La constante $A = [z - \gamma I \log(1 + z/\gamma I)] t^{-1}$ s'évalue à partir des points expérimentaux obtenus avant que le front humide n'ait atteint l'élément grossier ; aussi avons-nous utilisé seulement les résultats des tubes longs, qui permettent, en plaçant

l'élément rigide plus bas, d'avoir plus de points expérimentaux pour le calcul de A.

Nous présentons donc ici les résultats concernant deux tubes longs pour lesquels l'accord entre la théorie et l'expérience est convenable en percolation.

Sur la figure 18, on constate un accord très satisfaisant entre les cotes mesurées et calculées. Pour le même tube, l'accord est excellent entre les débits mesurés et calculés. Ces constatations montrent que le calcul de la résistance équivalente permet de rendre compte de l'effet des éléments grossiers d'une façon quantitative. Sur la figure 19, on constate que l'accord est déjà moins bon, ce qui correspond également au fait que, pour cette expérience, les débits prévus en filtration ne sont pas très proches des débits réels.

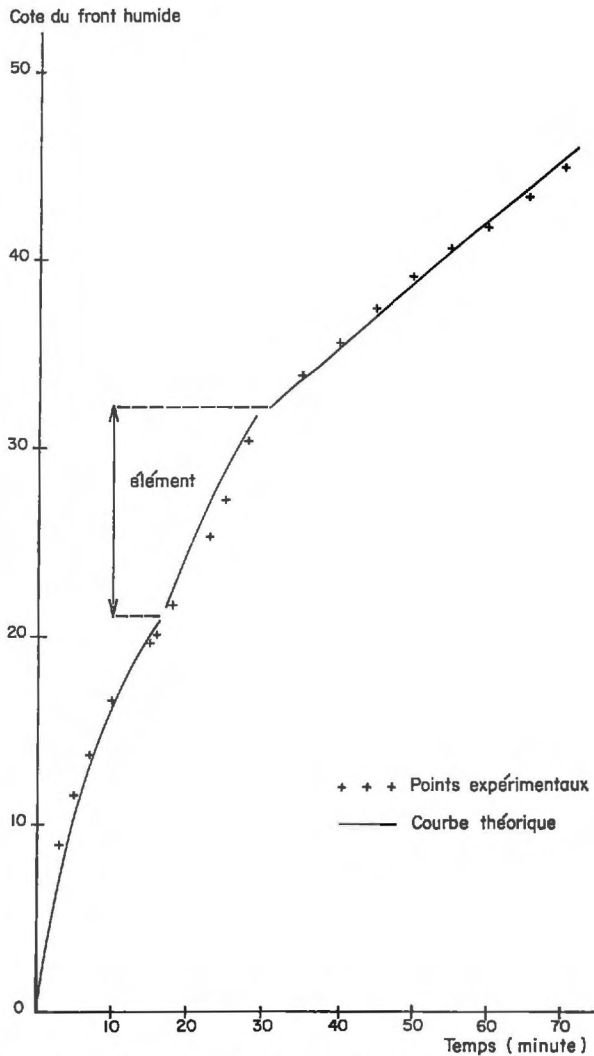


FIG. 18. — Influence d'un élément grossier non poreux sur l'infiltration

Comparaison entre les valeurs observées et calculées en utilisant la composition des résistances hydrauliques ; cylindre, hauteur 11 cm et 12,7 cm² de surface de section.

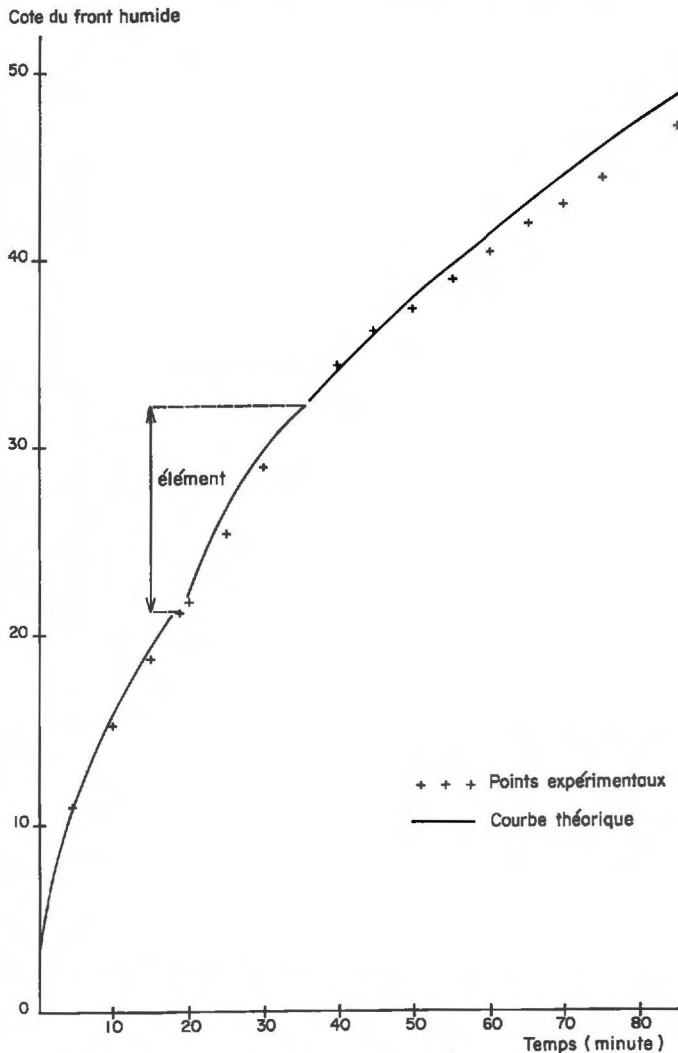


FIG. 19. — Influence d'un élément grossier non poreux sur l'infiltration

Comparaison entre les valeurs observées et calculées en utilisant la composition des résistances hydrauliques ; cylindre, hauteur 11 cm et 10,7 cm² de surface de section.

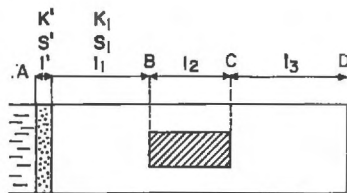


FIG. 20. — Calcul de la formule de déplacement du front humide en humectation horizontale : alimentation par l'intermédiaire d'une plaque de verre fritté

2. 23. *Humectation horizontale.*

Les formules donnant l'abscisse du front humide x en fonction du temps t seront établies dans les deux cas d'alimentation en eau.

Lorsque celle-ci se fait par l'intermédiaire d'une plaque de verre fritté de perméabilité K' , de section S' et de longueur l' (fig. 20), on a :

— pour le tronçon AB :

$$S(dx_1/dt) = (100 \psi/P) \frac{1}{l'/K'S' + x_1/K_1S}$$

Après séparation des variables et intégration :

$$2x_1 (l'K_1/K') + x_1^2 = (200 K_1 \psi/P)t$$

— pour le tronçon BC correspondant au niveau de l'élément :

$$(S - u)(dx_2/dt) = (100 \psi/P) \frac{1}{l'/K'S' + l_1/K_1S + x_2/K_1(S - u)}$$

$$dx_2/dt = (100 \psi/P) \frac{1}{l'(S - u)/K'S' + l_1(S - u)/K_1S + x_2/K_1}$$

En comparant cette vitesse à celle qui existerait en l'absence d'élément (obtenue en faisant $u = 0$ dans l'expression), on constate que la vitesse du front humide augmente au niveau de l'élément, puisque $(S - u)/S' < S/S'$ et $(S - u)/S < 1$.

Par intégration, on obtient :

$$2x_2 (K_1 l' (S - u)/K'S' + l_1 (S - u)/S) + x_2^2 = (200 K_1 \psi/P)t$$

— pour le tronçon CD, on aurait de même :

$$S(dx_3/dt) = (100 \psi/P) \frac{1}{l'/K'S' + l_1/K_1S + l_2/K_1(S - u) + x_3/SK_1}$$

La vitesse est inférieure à ce qu'elle serait sans élément, puisque $S/(S - u) > 1$.

$$2x_3 (K_1 l'/S/K'S' + l_1 + l_2 S/(S - u)) + x_3^2 = (200 K_1 \psi/P)t$$

Lorsque le tube horizontal est alimenté par un tube coudé de section S , de longueur moyenne l' , la charge qui intervient est $\psi - h$, h étant la différence de cote entre le niveau du plan d'eau et l'axe du tube (fig. 21).

— Pour AB :

$$S(dx_1/dt) = (100/P) \frac{\psi - h}{l'/K_1 S + x_1/K_1 S}$$

$$d'où : 2 x_1 (l'/S) + x_1^2 = (200 K_1 (\psi - h)/P) t$$

— Pour BC :

$$2x_2 (l'(S - u)/S + l_1 (S - u)/S) + x_2^2 = (200 K_1 (\psi - h)/P) t$$

— Pour CD :

$$2x_3 (l' + l_1 + l_2 S/(S - u)) + x_3^2 = (200 K_1 (\psi - h)/P) t$$

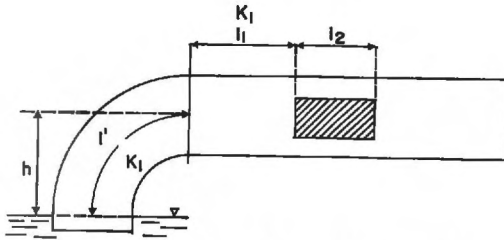


FIG. 21. — Calcul de l'équation de déplacement du front humide en humectation horizontale, alimentation par un tube coudé

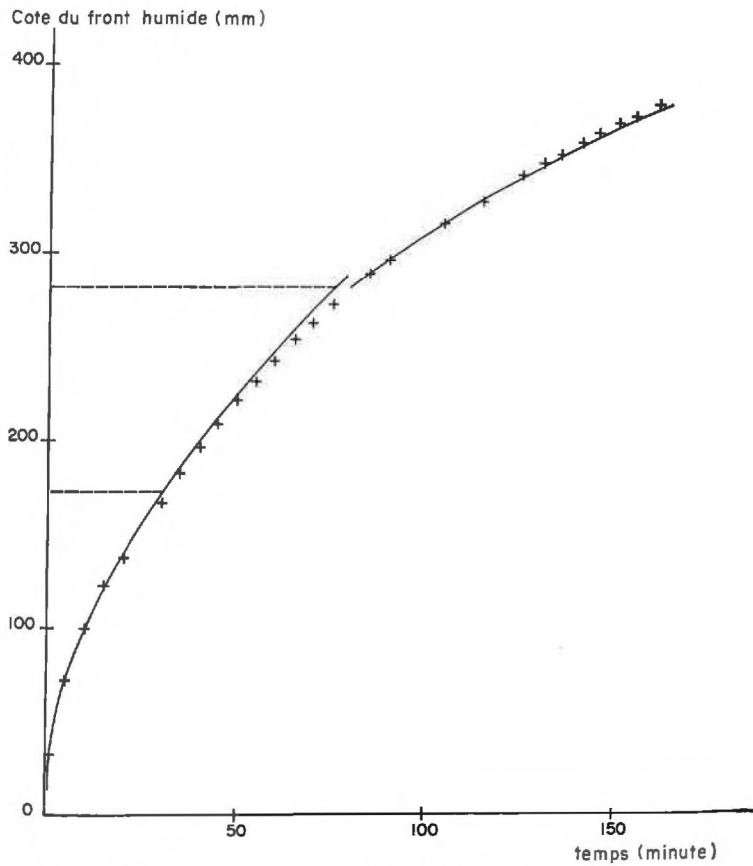


FIG. 22. — Influence d'un élément grossier non poreux sur l'humectation horizontale

Comparaison entre les valeurs observées et calculées en utilisant la composition de résistances hydrauliques; cylindre de 11 cm de hauteur et de 5,9 cm² de surface de section.

Les figures 22 et 23 montrent que l'accord est convenable entre calcul et observation. On remarquera que dans cette série de manipulations l'accord avec la théorie est beaucoup plus satisfaisant qu'avec les autres séries.

Comme il ne paraît pas *a priori* y avoir de raison pour que l'homogénéité de remplissage soit meilleure dans ces manipulations, on peut penser qu'il y a un moindre emprisonnement d'air dû à la progression plus lente du front humide.

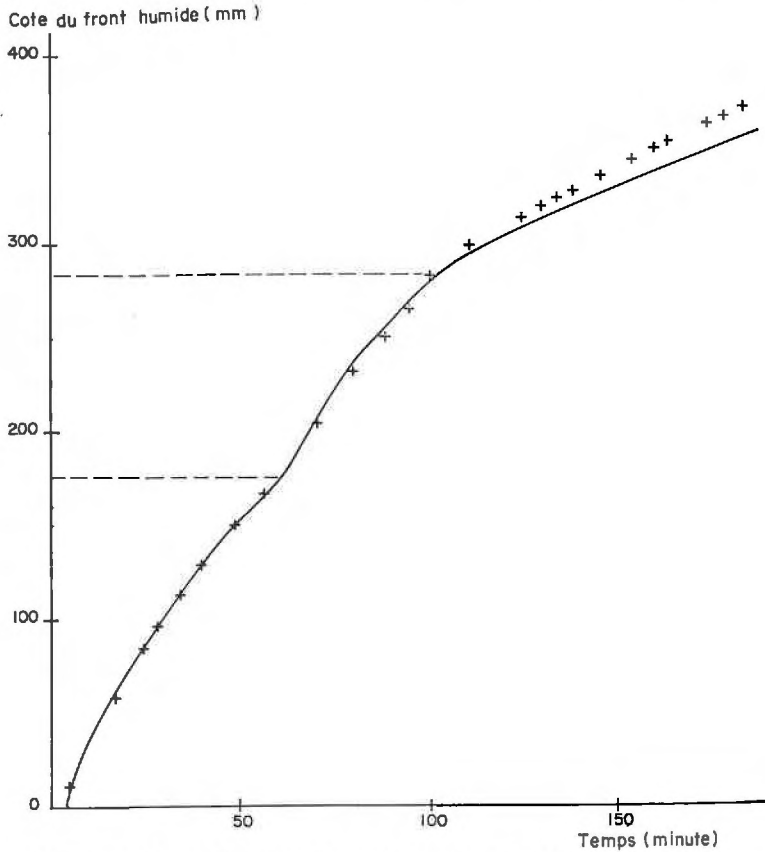


FIG. 23. — Influence d'un élément grossier non poreux sur l'humectation horizontale

Comparaison entre les valeurs observées et calculées en utilisant la composition de résistances hydrauliques ; cylindre haut de 11 cm et de 12,7 cm² de surface de section.

2. 3. — Essai d'explication dans le cas de l'humectation verticale sans plan d'eau

On ne peut utiliser ici les lois de l'hydrodynamique en les transposant du capillaire au filtre, puisqu'elles donneraient une loi $z - t$ curviligne, ce qui est en contradiction avec les résultats expérimentaux.

Nous avons donc tenté une explication plus directe, fondée sur des considérations géométriques.

Rappelons qu'on peut distinguer trois vitesses d'avancement du front humide :
 V_0 vitesse du front humide avant son passage au niveau de l'élément grossier ;
 V_1 vitesse au niveau de l'élément grossier ;
 V_2 vitesse après que le front humide ait dépassé l'élément grossier.

Ces vitesses sont sensiblement constantes pour chacun des intervalles. Nous avons tenté de relier les rapports $V_1V_0^{-1}$ et $V_2V_0^{-1}$ au rapport des sections de tube occupées par le sable ; si S est la section intérieure du tube et u la section de l'élément grossier, la section occupée par le sable est S en l'absence d'élément et $(S - u)$ en présence d'élément. Nous avons considéré le rapport inverse $S/(S - u)$, puisque la vitesse augmente lorsque la section diminue. V_0 , V_1 et V_2 sont les pentes des différents segments de la courbe $z = f(t)$. Ces pentes ont été évaluées par la méthode des moindres carrés en n'utilisant que les parties rectilignes de cette courbe, ce qui exclut les portions de courbe correspondant à l'établissement des vitesses constantes V_0 et V_2 .

La figure 24, représentant la variation de $V_2 \cdot V_0^{-1}$ en fonction de $S \cdot (S - u)^{-1}$, indiquerait une légère tendance à la diminution de la vitesse V_2 . Cependant, la pente négative de la droite de régression est inférieure à 0,1, la régression n'étant pas significative. On peut donc admettre en première approximation que la présence d'un

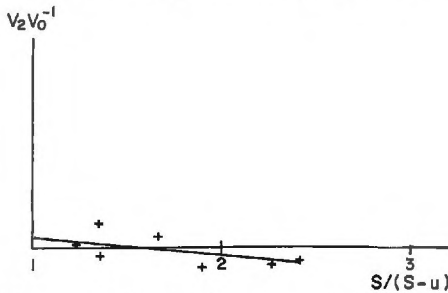


FIG. 24. — Influence d'éléments grossiers non poreux sur l'humectation verticale sans plan d'eau

(V_0) Vitesse du front humide avant le passage au niveau de l'élément, après le passage de l'élément (V_2)
 S : section intérieure du tube
 u : section de l'élément

élément grossier ne diminue pas sensiblement la vitesse du front humide une fois que celui-ci a dépassé l'élément grossier. Si l'on admet, en outre, qu'excepté au voisinage du front humide où existe un gradient net d'humidité, celle-ci est sensiblement la même dans la colonne, la présence de l'élément grossier ne modifie pas à son niveau le débit transmis. Il faut donc qu'au passage de l'élément grossier, il y ait un ou des mécanismes de compensation assurant un débit constant.

Le graphique 25 suggère une relation curviligne croissante entre $V_1V_0^{-1}$ et $S \cdot (S - u)^{-1}$, ce qui traduit l'augmentation de vitesse au niveau de l'élément grossier. La courbe traduisant la liaison précédente doit passer par le point de coordonnées 1,1. En effet, lorsque $u \rightarrow 0$, $V_1 \rightarrow V_0$, ce qui entraîne $V_1V_0^{-1} \rightarrow 1$, et $S \cdot (S - u)^{-1} \rightarrow 1$. Pour l'ensemble des points expérimentaux et du point de coordonnées 1,1, on peut calculer une régression linéaire hautement significative ($P : 0,01$) entre $V_1V_0^{-1}$ et $\log [S \cdot (S - u)^{-1}]$:

$$V_1V_0^{-1} = 1,374 \log [S \cdot (S - u)^{-1}] + 1,121,$$

relation valable pour le sable utilisé et le débit indiqué précédemment. Il est vraisemblable que si la courbe ainsi ajustée ne passe pas par le point de coordonnées τ, τ , c'est à cause de l'ajustement imposé. La courbe représentative peut en première approximation, être assimilée, pour $\tau < S/(S - u) < 1,5$ à la première bissectrice : $V_1 V_0^{-1} = S \cdot (S - u)^{-1}$ ou $V_1(S - u) = V_0 S$, formulation rappelant celle de l'équation de continuité.

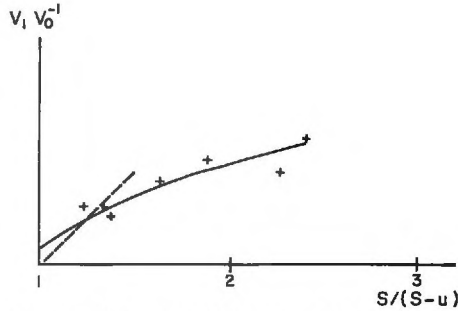


FIG. 25. — Influence d'éléments grossiers non poreux sur l'humectation verticale sans plan d'eau

V_1 : vitesse du front humide avant le passage au niveau de l'élément (V_0), sur niveau de l'élément (V_1)
 S : section intérieure du tube
 u : section de l'élément

On peut indiquer la nature des mécanismes compensateurs assurant la constance du débit. Tant que la réduction de la section utile est faible, la quantité d'eau transmise par le sable dans l'unité de temps est maintenue constante par l'augmentation de la vitesse V_1 du front humide, ce qui doit se traduire par une augmentation de la vitesse de l'eau dans les capillaires. Mais pour maintenir un débit constant lorsque $S \cdot (S - u)^{-1} > 1,5$, la vitesse V_1 croît moins que ne l'implique la diminution de section ; il faut alors imaginer un autre mécanisme pour que le débit reste constant. Peut-être l'eau circule-t-elle dans une fraction plus importante de la porosité totale.

III. — INFLUENCE DES ÉLÉMENTS GROSSIERS POREUX SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU

Placé dans un sable en voie d'humectation, un élément grossier poreux peut se comporter de façon différente au cours de l'humectation du système sable - élément grossier :

- avant d'être lui-même saturé d'eau, l'élément grossier peut absorber de l'eau à cause de la succion qu'il exerce ; il retarde ainsi l'humectation du sable ;
- une fois saturé, l'élément grossier peut, du moins théoriquement, transmettre l'eau au sable qu'il contribue alors à humecter.

Pour un élément grossier donné, l'importance de l'absorption et de la transmis-

sion est en quelque sorte inverse : des pores étroits ont pour conséquence une succion élevée, qui va de pair avec une faible perméabilité.

Par ailleurs, les conséquences de ces mécanismes sur l'humectation du sable dépendent aussi des valeurs relatives de la succion du sable et de celle de l'élément rigide, et il en va de même pour les perméabilités.

Nous avons donc porté notre attention sur des éléments rigides de propriétés différentes : un cylindre de craie de 4 cm de diamètre, haut de 5,3 cm, un prisme à base carrée (2,6 cm \times 2,6 \times 4 cm) constitué de billes de verre agglomérées d'un diamètre compris entre 1 000 et 1 250 μ . On a utilisé aussi un cylindre de calcaire à milioles (diamètre 4 cm, hauteur 6,8 cm), qui présente la particularité de s'humecter lentement.

Nous donnons, dans le tableau I, les caractéristiques de ces matériaux.

TABLEAU I

Caractéristiques des matériaux poreux rigides

	Succion, exprimée en hauteur d'ascension capillaire (cm)	Coefficient K de Darcy (cm \cdot mn ⁻¹)
Craie.....	2 200 ⁽¹⁾	0,000 9 à 0,003 ⁽²⁾
Calcaire à milioles.....	1,8	0,0003 2 ⁽²⁾
Massif de billes de verre	2,5 ⁽¹⁾	15,5

⁽¹⁾ Valeur théorique calculée.

⁽²⁾ Valeurs approximatives, la perméabilité de la craie ne suivant pas la loi de DARCY (Annexe 6).

⁽³⁾ Matériau contenant certainement de l'air lors de la mesure.

Rappelons que la perméabilité du sable est de 0,07 cm/mn et sa succion 70 cm d'eau.

Les modifications de la cinétique du front humide induites dans le sable par les divers éléments grossiers ont été étudiées en utilisant le dispositif déjà décrit de tubes pleins de sable, longs de 48 cm (Section 1. 1).

Par ailleurs, on a observé les déplacements relatifs des fronts humides dans le matériau grossier et le sable au moyen d'un dispositif spécial que nous décrirons par la suite.

3. I. — Résultats des expériences

3. II. Filtration en tube vertical avec plan d'eau.

Les tubes ont été humectés par le haut, en établissant rapidement une lame d'eau, dont l'épaisseur (1 cm) était maintenue constante à l'aide d'un vase de Mariotte. Le débit a été mesuré par pesée de l'eau recueillie à la base du tube.

Les quantités d'eau percolée lorsque le tube contient un cylindre de craie ou de calcaire à milioles sont inférieures à celles du tube témoin plein de sable.

Dans le cas du prisme de billes de verre, on a utilisé des tubes très courts pour que l'effet de ce prisme sur la résistance hydraulique soit appréciable (cf. Section 2.21). Comme le sable a tendance à remplir les espaces entre les billes, tant au moment du remplissage avec du sable sec qu'au cours de la percolation de l'eau, le système sable massif de billes est instable. On a limité cet inconvénient en coiffant la partie supérieure de l'élément par de la toile à bluter. Mais même lorsque le tube est humecté avec précaution par la base (cf. Section 1.31), il est extrêmement

difficile de remplir d'eau le massif de billes de verre. On pouvait imaginer que le sable était peut-être humecté par capillarité au voisinage du massif de billes de verre avant que le plan d'eau libre soit parvenu à son niveau (le sable est peu perméable), emprisonnant ainsi de l'air dans le prisme de billes de verre. On a donc modifié la façon de remplir le tube de sable : on élève successivement le niveau du sable, puis le niveau de l'eau, ce qui revient à jeter le sable dans l'eau. Comme les grains de sable s'arrangent d'une façon différente de celle du remplissage à sec, la perméabilité du filtre ainsi constitué diminue : 0,037 cm/mm au lieu de 0,07. La perméabilité a été calculée à partir du débit d'un filtre complexe comprenant 9,5 cm de sable de Fontenay surmontant 2 cm de sable grossier de perméabilité K' connue.

La comparaison des débits des tubes témoins et de ceux contenant un prisme de billes de verre montre que la présence de ce dernier augmente le débit, lorsqu'on prend les précautions particulières ci-dessus pour le remplir d'eau.

3. 12. *Infiltration en tube vertical avec plan d'eau.*

On utilise la phase infiltration de l'expérience précédente. Le déplacement du front humide est suivi par l'enregistrement de sa cote z en fonction du temps t . La courbe $z = f(t)$ est représentée sur les figures 26, 27 et 28. Pour mieux juger de l'influence éventuelle du corps poreux, on a placé sur la même figure la courbe du déplacement du front humide en l'absence d'élément. Comme nous l'avons vu, cette courbe est construite par extrapolation, à partir des points expérimentaux obtenus avant que le front humide dans le sable soit arrivé au niveau de l'élément grossier.

Craie. — Lorsqu'il a atteint le niveau du cylindre de craie, le front humide dans le sable avance en moyenne moins vite que dans le témoin. Une fois que la cote de la base du cylindre de craie a été dépassée par le front humide, sa vitesse moyenne est inférieure à celle qui existerait en l'absence d'élément. Un examen détaillé révèle une diminution de vitesse plus accentuée juste après le passage au niveau de la craie. La quantité d'eau fournie au dispositif diminue dès que le front humide parvient à la partie supérieure de l'élément rigide.

Calcaire à milioles. — Le déplacement du front humide du sable au niveau du cylindre de calcaire à milioles est différent de celui de la craie : la vitesse augmente comme si l'élément n'était pas poreux (cf. Section 2. 12). Cette différence entre la craie et le calcaire à milioles s'explique en partie par la comparaison des quantités d'eau qu'ils ont absorbées : exprimées en cm³ d'eau pour 100 cm³ de volume apparent, elles sont de 11,1 et 40,2 pour le calcaire à milioles et la craie respectivement. Une fois l'élément dépassé, le front humide avance moins vite comme dans le cas de la craie. Il y a également ici diminution de la quantité d'eau fournie au dispositif comme pour la craie.

Massif de billes de verre. — La cinétique du front humide est analogue à celle du calcaire à milioles : la vitesse augmente au niveau du massif comme si l'élément n'absorbait pas d'eau ; on n'a effectivement pas trouvé dans l'élément une quantité d'eau appréciable à la fin de l'expérience.

Indiquons enfin qu'on a aussi fait des expériences avec des parallélépipèdes de brique et de verre moussé.

Les effets des éléments grossiers sur la cinétique du front humide du sable au voisinage de l'élément peuvent se résumer ainsi :

- une diminution de la vitesse moyenne pour la craie et la brique, qui exercent une forte succion et s'humectent rapidement ;
- une augmentation de la vitesse moyenne pour le calcaire à milioles, le verre

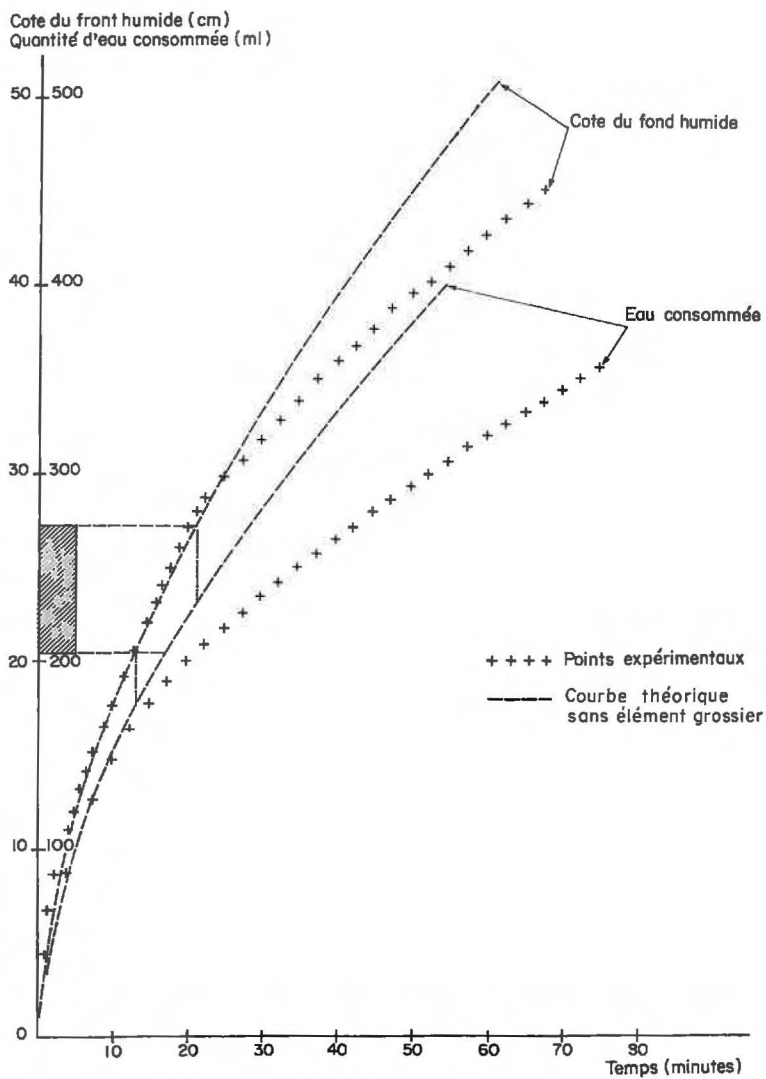


Fig. 26. — Influence d'un cylindre de calcaire à millioles (hauteur : 6,8 cm surface de section : 12,5 cm²) sur l'infiltration avec plan d'eau

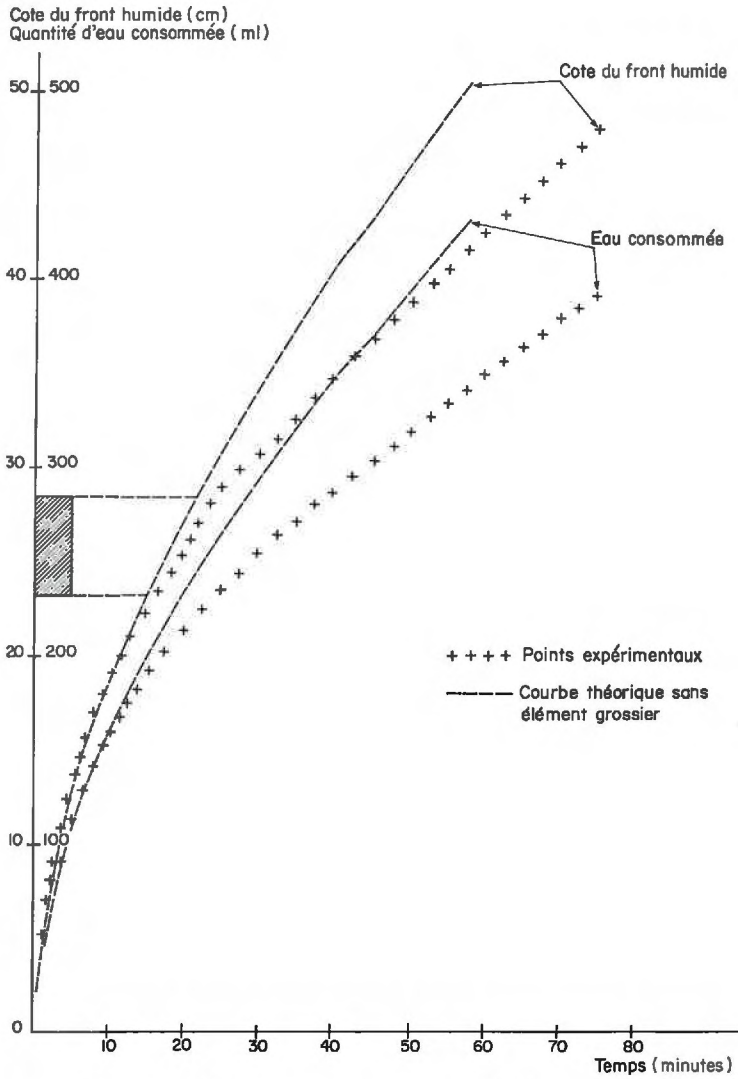


FIG. 27. — Influence d'un cylindre de craie (hauteur : 5,3 cm, surface de section : 12,5 cm²) sur l'infiltration avec plan d'eau

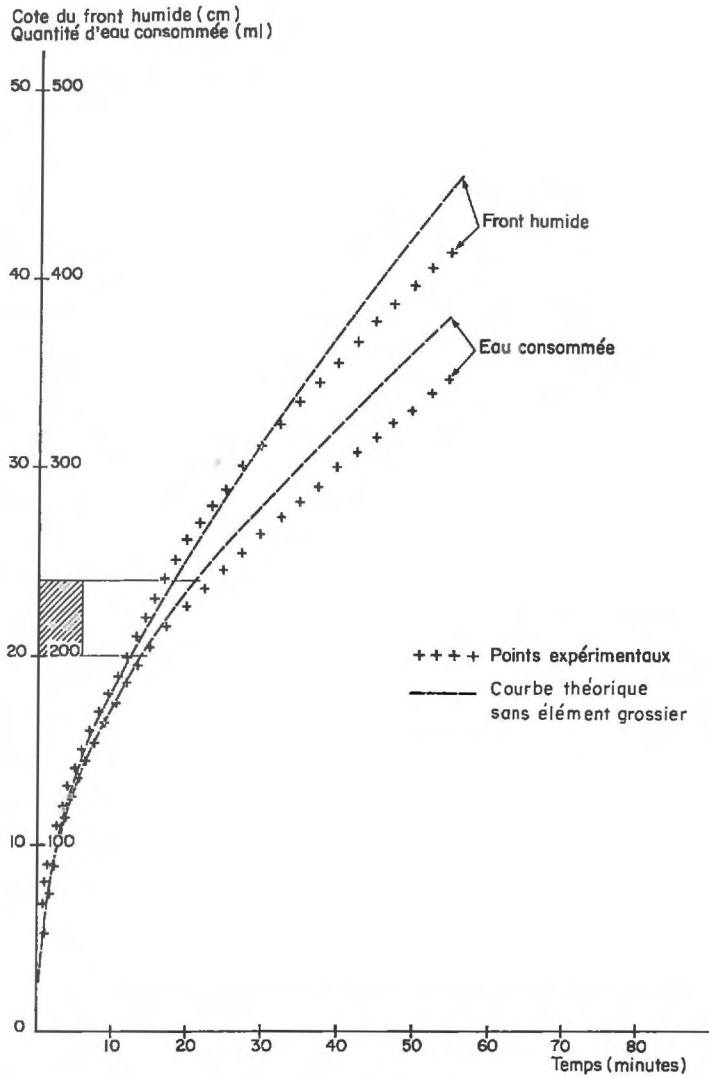


FIG. 28. — Influence d'un prisme à base carrée (hauteur : 4 cm, section : 6,8 cm,²) constitué de billes de verre, sur l'infiltration avec plan d'eau
Diamètre de billes variant entre 1 mm et 1,25 mm

mousse et le massif de billes de verre. Tous ces matériaux qui ont une succion assez faible absorbent peu d'eau et se comportent donc de façon analogue à des éléments non poreux.

Dans tous les cas, une fois l'élément dépassé, la vitesse du front humide diminue.

3. 13. Humectation verticale sans plan d'eau.

On a utilisé les mêmes tubes pleins de sable que pour les éléments grossiers non poreux. Nous avons déjà vu que, pour les éléments non poreux, la formule reliant la variation de vitesse du front dans le sable au changement de section utile du sable était simple,

$$\text{pour } \tau < S \cdot (S - u)^{-1} < 1,5.$$

Afin de mieux saisir, et, éventuellement, mieux analyser les effets des éléments grossiers poreux, nous nous sommes placé dans ces conditions : la section carrée des éléments étudiés avait 25 mm de côté pour la craie, le calcaire à milioles, le verre mousse et 27 mm pour le massif de billes de verre ; on a utilisé aussi un prisme de brique (20 × 20 × 50).

Ces prismes étaient disposés de façon que leurs axes de symétrie longitudinaux coïncident avec celui du tube. Le débit d'eau apporté était de l'ordre de 48 ml par heure (soit une lame d'eau de 20 mm par heure environ). La cote du front humide est notée en fonction du temps sur 4 génératrices du cylindre.

Les courbes représentant la cote du front humide dans le sol (moyenne de quatre mesures) en fonction du temps peuvent être classées en deux groupes du point de vue du sens de la variation de vitesse au niveau de l'élément (fig. 29) : pour le calcaire à milioles, le verre mousse et le massif de billes de verre, cette vitesse augmente, tandis que pour la craie et la brique elle diminue. La description de ces diverses courbes est donnée ci-dessous.

Calcaire à milioles. — La vitesse V_1 au niveau de l'élément rigide est constante et supérieure à la vitesse V_0 existant avant le passage de l'élément ($V_1 \cdot V_0^{-1} = 1,240$). L'augmentation de la vitesse V_1 est toutefois légèrement moindre que celle qui est provoquée par un élément non poreux de mêmes dimensions :

$$V_1 \cdot V_0^{-1} = 1,248$$

Verre mousse. — Il y a également augmentation de vitesse au niveau de l'élément

$$(V_1 \cdot V_0^{-1} = 1,208)$$

Massif de billes de verres. — L'augmentation de vitesse au niveau de l'élément est telle que $V_1 \cdot V_0^{-1} = 1,470$, rapport élevé à cause de la section plus grande de l'élément.

Craie. — Lorsque le front humide passe au niveau de l'élément, la diminution de vitesse, très nette, présente une forme particulière : elle s'accroît avec le temps, puis cesse brusquement avant que le front humide ait atteint la base du parallélépipède. La valeur V_1 étant calculée après ajustement linéaire de la courbe cote du front-temps, on a V_1 moyen. $V_0^{-1} = 0,705$. La brique se comporte de façon analogue à la craie, mais le phénomène est moins accentué.

Dans tous les cas, V_1 reprend progressivement la valeur initiale V_0 lorsque le front humide a dépassé la base de l'élément rigide.

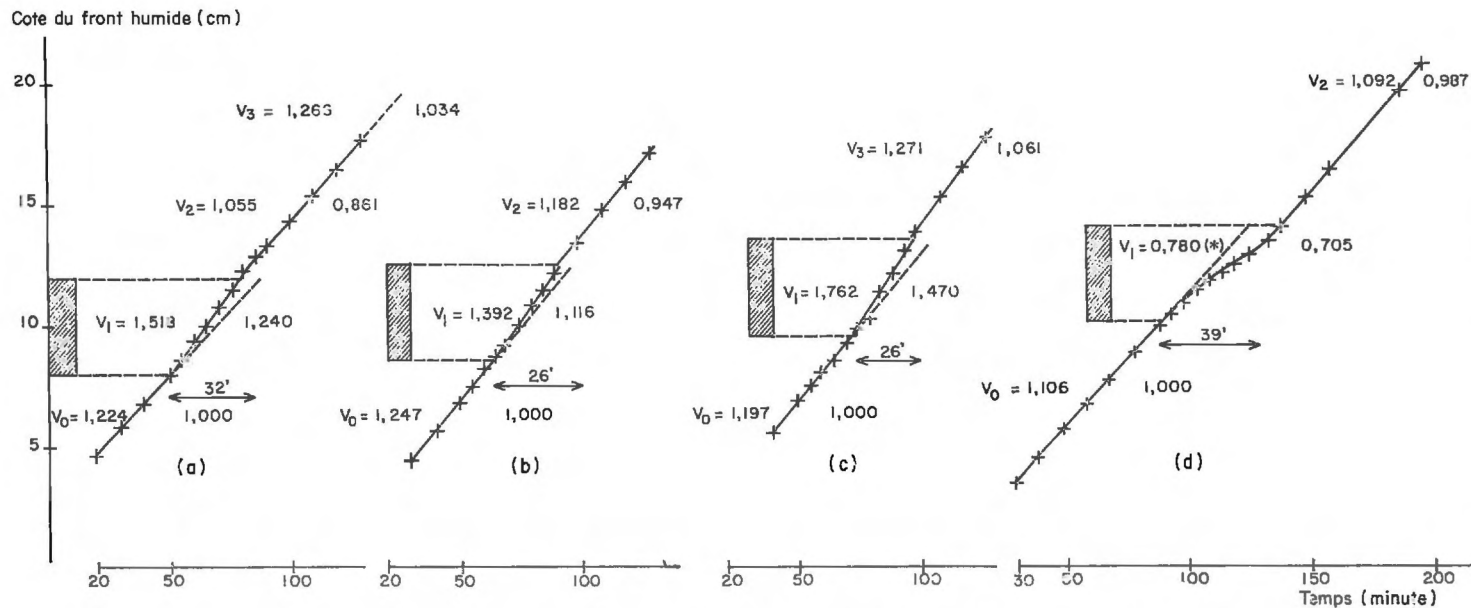


FIG. 29. — Influence des éléments grossiers poreux sur l'humectation verticale sans plan d'eau

- a : calcaire à milloles = hauteur : 4 cm, section : 6,2 cm²
 b : verre mousse = hauteur : 4 cm, section : 6,2 cm²
 c : billes de verre = hauteur : 4 cm, section : 7,3 cm²
 d : craie = hauteur : 4 cm, section : 6,2 cm²

A droite de la courbe, indices V_i/V_0 obtenus en faisant $V_0 = 1,000$

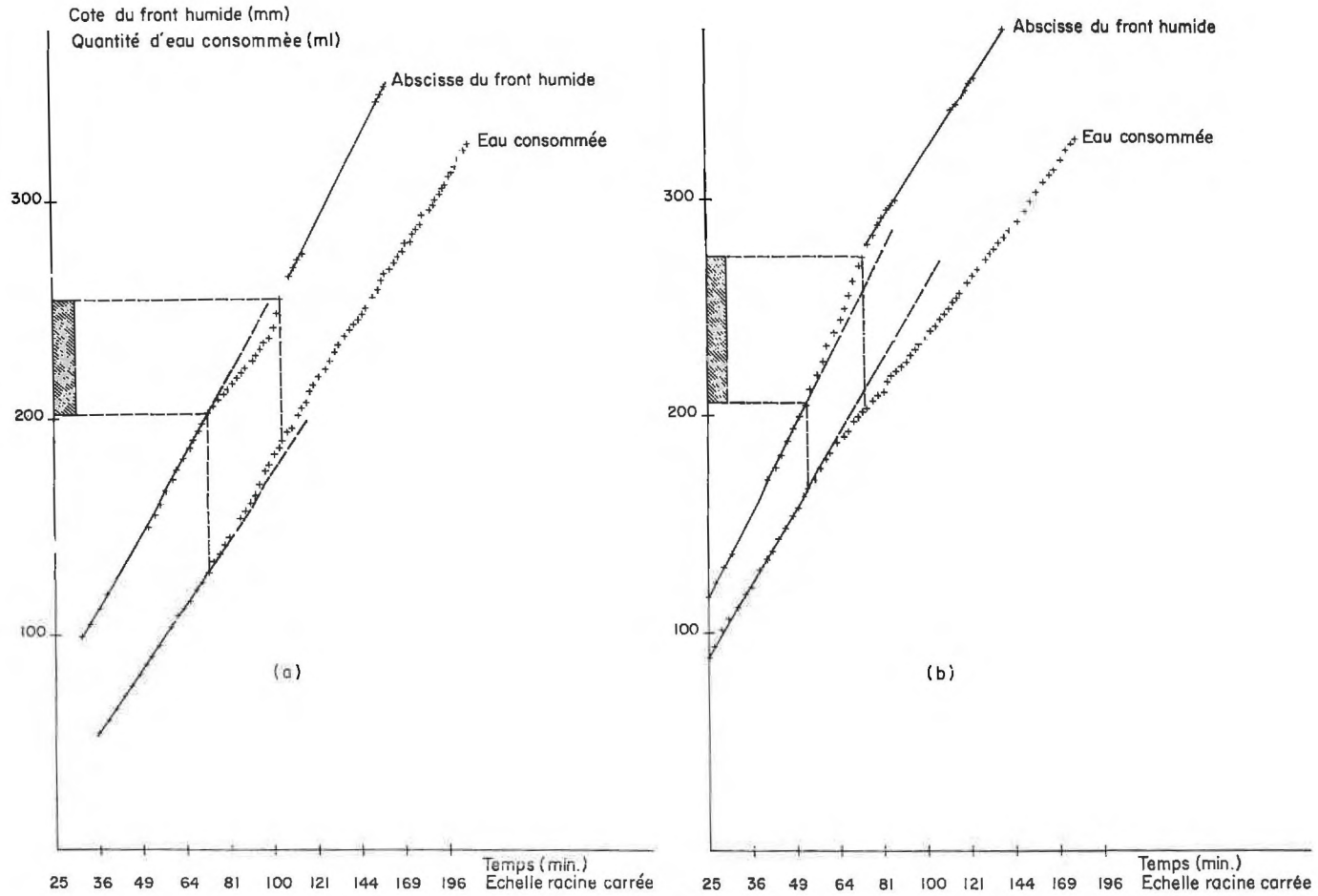


FIG. 30. — Influence d'éléments grossiers poreux sur l'humectation horizontale

a : craie = hauteur 5,3 cm, section 12,6 cm²
 b : calcaire à miliolites = hauteur 6,8 cm, section 12,6 cm²

3. 14. Humectation horizontale.

C'est le dispositif déjà utilisé pour les éléments non poreux qui a été mis en œuvre. On a placé dans le sable un cylindre de craie ou de calcaire à milioles.

La linéarité de la relation $x = f(\sqrt{t})$, où x est l'abscisse du front humide et t le temps, permet de constater facilement les modifications de vitesse apportées au déplacement du front humide (fig. 30).

Pour la craie, la forme de la courbe présente des analogies avec celle obtenue lors des infiltrations et humectations verticales. Au niveau de l'élément, diminution très sensible de vitesse, puis augmentation. Une fois l'élément dépassé, la vitesse diminue. La quantité d'eau fournie au dispositif diminue légèrement à partir du moment où le front humide du sable aborde l'élément.

Dans le cas du calcaire à milioles, il y a une augmentation de la vitesse du front dans le sable au niveau de l'élément et ensuite un léger ralentissement lorsque le front humide a dépassé l'élément. La quantité d'eau fournie au dispositif diminue dès que le front humide est arrivé à l'élément.

3. 2. — Observation des déplacements relatifs des fronts humides dans le sable et l'élément rigide

Le dispositif comprend un tube ayant une paroi plane transparente contre laquelle on place une face de l'élément rigide (fig. 31) : on peut ainsi suivre en même temps le déplacement du front humide dans le sable et dans l'élément rigide.

Au cours du montage du dispositif, il faut éviter que du sable ne se place entre l'élément rigide et la paroi transparente ; par ailleurs, l'eau ne doit pas s'introduire dans les interstices de dimensions capillaires existant entre la paroi plane transparente et la face observée de l'élément ; cela perturberait l'observation du front humide.

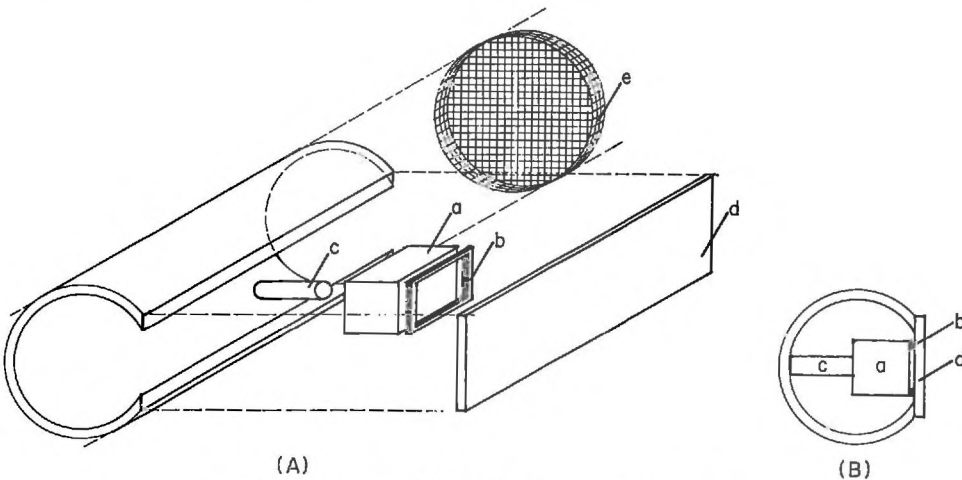


FIG. 31. — Dispositif expérimental pour l'observation des déplacements relatifs des fronts humides dans le sable et dans l'élément

A : vue en perspective du dispositif démonté

B : coupe normale à l'axe :

a : élément grossier b : joint de caoutchouc

c : bouchon de caoutchouc jouant le rôle d'un ressort

d : paroi plane transparente

e : grillage

Les colliers de serrage maintenant l'ensemble ne sont pas représentés.

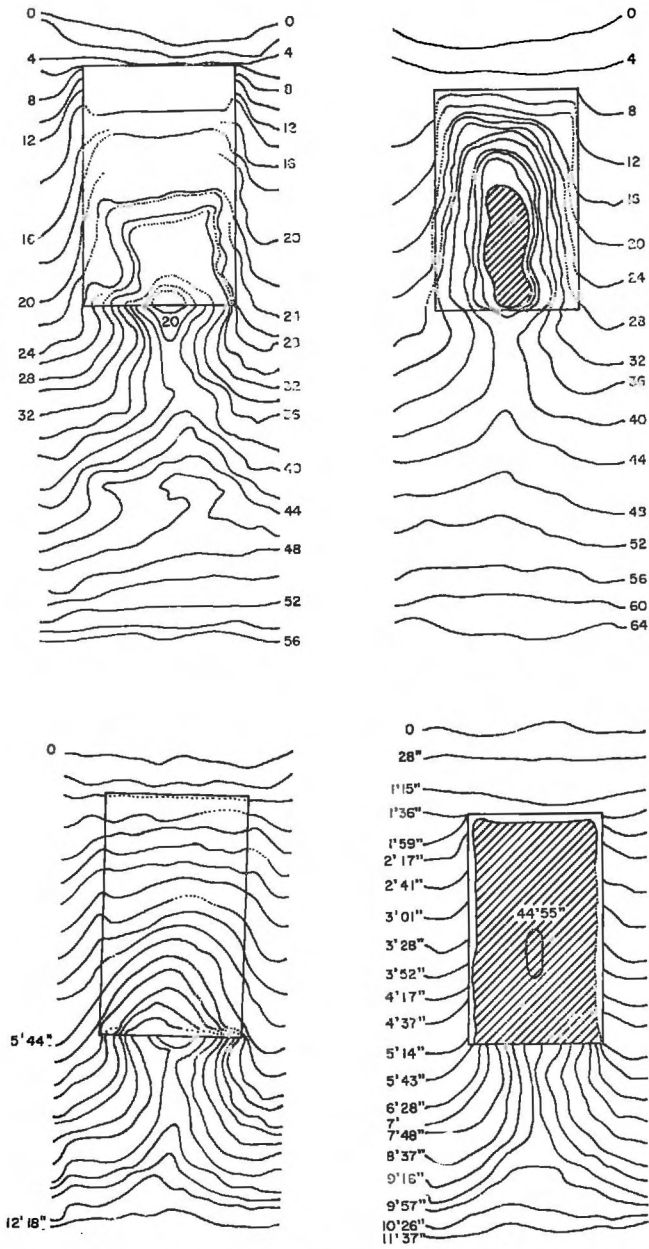


FIG. 32. — Déplacements relatifs des fronts humides dans le sable et dans l'élément

à gauche : craie
à droite : calcaire à milioles
en haut : humectation verticale
en bas : infiltration

Les parties hachurées n'étaient pas humectées à la fin de l'expérience. Les durées sont exprimées en minutes et secondes.

Les inconvénients précédents ont été évités en utilisant un joint de caoutchouc rectangulaire, comme le montre la figure 31, qui représente le dispositif démonté : un bouchon de caoutchouc jouant le rôle d'un ressort, maintient l'élément rigide contre la paroi, le contact élément-paroi se faisant par l'intermédiaire du joint de caoutchouc.

L'étanchéité entre le tube et la plaque était assurée par du mastic.

Des observations ont été effectuées sur la craie et le calcaire à milioles pour l'infiltration avec plan d'eau, l'humectation verticale sans plan d'eau et l'humectation horizontale.

Il était tentant de suivre la progression du front humide par enregistrement photographique. La différence de teinte entre la craie sèche et la craie humide étant très faible, on a coloré l'eau ; mais comme on a observé une zone humide incolore en avant de la zone colorée (ce qui indiquait une séparation de la solution colorée en deux phases), nous n'avons pu retenir ce procédé. On s'est donc limité à l'observation visuelle en dessinant avec un marqueur à feutre les formes successives du front humide.

Dans la figure 32, les résultats sont placés dans une grille à double entrée comprenant horizontalement les matériaux et verticalement les deux catégories d'expériences (infiltration avec plan d'eau, humectation verticale sans plan d'eau). Les schémas auraient été plus comparables si les observations avaient été faites aux mêmes époques dans les deux types de percolation : en fait, cela n'était pas possible, les vitesses de déplacement du front humide étant très différentes pour l'infiltration et l'humectation. La figure 33 représente l'allure des fronts humides dans le cas de l'humectation horizontale.

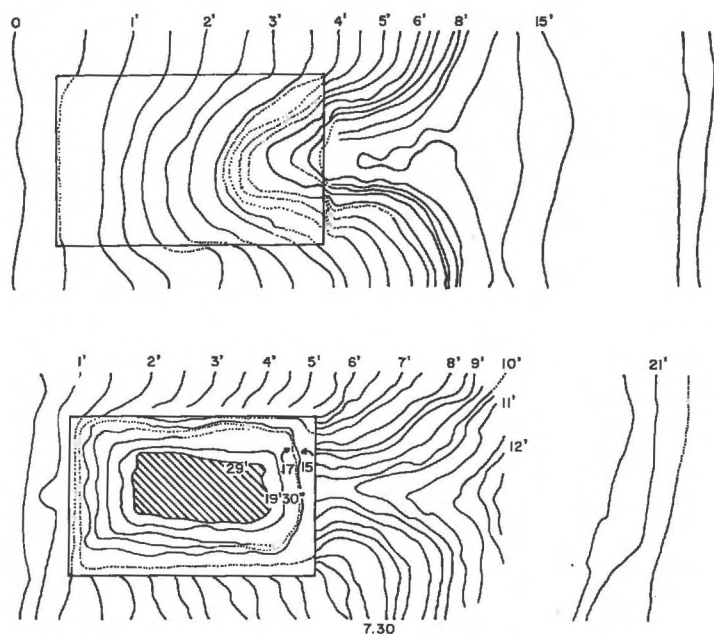


FIG. 33. — Déplacements relatifs des fronts humides dans le sable et dans l'élément grossier. Humectation horizontale

En haut : craie ; en bas : calcaire à milioles

Sur la figure 32, on constate ceci :

— L'humectation est plus rapide dans la craie que dans le calcaire à milioles, certaines parties de ce matériau étant encore sèches à la fin de l'expérience.

— Pour la craie, il existe une différence dans la forme du front humide selon

les expériences : avec l'humectation sans plan d'eau, la trace du front humide est à peu près une droite, ce qui indique que l'alimentation en eau de la craie se fait surtout par la face supérieure horizontale, le front humide avançant assez lentement dans le sable. Dans le cas de l'infiltration avec plan d'eau, la trace du front humide dans la craie prend progressivement une allure courbe ; en effet, le front humide avançant beaucoup plus vite dans le sable que dans la craie, les parties latérales de la craie reçoivent de l'eau à la fois par le haut (front humide de la craie) et par le côté (front humide du sable).

— Avec le calcaire à milioles, cette courbure progressive apparaît également dans le cas de l'humectation sans plan d'eau, la vitesse de déplacement du front humide dans l'élément étant de beaucoup inférieure à celle du sable ; la trace du front humide a même la forme d'une courbe fermée puisque l'humectation du calcaire à milioles se fait à partir d'un certain moment par le bas. Dans le cas de l'infiltration avec plan d'eau, l'humectation du calcaire à milioles est quasi nulle ; ceci s'explique par le fait que cette expérience étant plus brève que la précédente, le front humide avance beaucoup plus vite dans le sable.

Dans le cas de la circulation horizontale (fig. 33), la courbure du front humide est très accentuée pour la craie ; pour le calcaire à milioles, la forte courbure du front, jointe à la lenteur de l'humectation, donne au front humide l'allure d'une courbe fermée.

Sur toutes les figures, on constate que la vitesse du front humide diminue une fois que ce dernier a dépassé l'élément, comme on l'a déjà signalé. Ceci indique que l'élément rigide n'est pas en mesure de transmettre de l'eau au sable.

L'ensemble de ces observations met l'accent sur l'importance du rapport des vitesses du front humide dans l'élément et dans le sable.

3. 3. — *Interprétation des résultats expérimentaux*

L'interprétation des résultats est différente selon qu'il s'agit de la transmission de l'eau dans le système saturé sable-élément grossier ou des variations positives d'humidité provoquées dans ce même système par l'infiltration et les humectations verticale et horizontale. Dans ces derniers cas, l'humidité varie avec le temps et les coordonnées du point considéré dans le système.

3. 31. *Interprétation dans le cas de la filtration*

Nous utiliserons la composition des résistances hydrauliques du filtre complexe constitué par l'élément grossier saturé et le sable.

Dans la partie centrale du filtre de longueur l_2 , on a deux résistances en parallèle, celle du sable (perméabilité K_1) et celle du matériau rigide (perméabilité K_2) (fig. 34) ; la résistance équivalente J_2 se calcule ainsi, S étant la section du tube et u celle de l'élément grossier :

$$\frac{I}{J_2} = \frac{I}{l_2/K_1(S-u)} + \frac{I}{l_2/K_2u}, \text{ d'où } J_2 = \frac{l_2}{K_1(S-u) + K_2u}$$

La conductivité hydraulique globale est : $J_\sigma = J_1 + J_2 + J_3$.

$$J_\sigma = \frac{l_1}{K_1S} + \frac{l_2}{K_1(S-u) + K_2u} + \frac{l_3}{K_1S}$$

L'effet de l'élément poreux sur la résistance globale se déduit de la comparaison des expressions de J_p écrites avec et sans élément grossier poreux, ce qui modifie seulement le deuxième terme de cette expression. Ce deuxième terme s'écrit

$$l_2/[K_1(S - u) + K_2u] \text{ avec élément grossier}$$

et l_2/K_1S sans élément.

Il suffit de comparer les dénominateurs :

$$\begin{array}{ll} K_1S - u(K_2 - K_1) & \text{et } K_1S. \\ K_1S - u(K_2 - K_1) < K_1S & \text{si } K_2 > K_1 \\ K_1S - u(K_2 - K_1) > K_1S & \text{si } K_2 < K_1 \end{array}$$

La présence d'un élément rigide diminuera donc la perméabilité globale si sa perméabilité propre est inférieure à celle du milieu meuble. Ce sera le contraire si l'ordre des perméabilités est inverse.

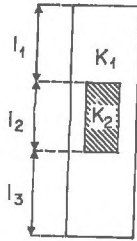


FIG. 34. — Calcul de la résistance hydraulique d'un filtre complexe constitué d'un élément grossier poreux placé dans du sable

Les perméabilités des éléments rigides (craie = 0,000 2 cm/mn, calcaire à milioles = 0,000 3 cm/mn) étant inférieures à celles du sable (0,075 cm/mn), on peut s'attendre à une diminution de perméabilité globale lorsqu'ils sont présents dans le filtre. C'est effectivement ce que l'on a constaté.

On peut également vérifier qu'on retrouve par le calcul le rapport entre le débit du tube témoin D_1 et celui du tube contenant l'élément grossier D_2 . En ne tenant pas compte de l'épaisseur du sable grossier à la base du tube (l'erreur est inférieure à 10^{-3} pour les tubes longs utilisés ici, cf. section 2. 21), le rapport des débits calculés est $(D_1/D_2)_c$ tel que :

$$\left(\frac{D_1}{D_2}\right)_c = \frac{1}{l_1 + l_2 + l_3} \frac{(l_1 + l_3 + l_2 K_1 S)}{K_1(S - u) + K_2 u}$$

Pour la craie, le rapport D_1/D_2 observé est 1,148 et calculé 1,135. La concordance est moins bonne pour le calcaire à milioles : rapport observé 1,289 et calculé 1,175. Dans les deux cas, les différences entre valeurs observées et calculées sont inférieures à l'erreur entraînée sur la valeur calculée par l'imprécision des mesures :

$$\frac{\Delta (D_1/D_2)_c}{(D_1/D_2)_c} = 11 \text{ p. } 100 \text{ (Annexe 7).}$$

L'examen des valeurs numériques des différents termes du rapport D_1/D_2 montre que le terme K_2u n'intervient pratiquement pas sur le résultat. Les valeurs de K_2 sont tellement inférieures à la valeur de K_1 que tout se passe comme si les éléments rigides (craie et calcaire à milioles) étaient imperméables.

Pour le prisme de billes de verre, le rapport $(D_1/D_2)_e$ est de 0,61, alors que $(D_1/D_2)_0$ est de 0,93 pour 1 heure, 0,87 pour 2 heures et 0,79 pour 3 heures (ces rapports ne sont pas constants, la relation quantité d'eau écoulée-temps n'étant pas rigoureusement linéaire). La précision sur $(D_1/D_2)_e$, de l'ordre de 15 p. 100 (l'erreur relative croît lorsque la longueur du tube diminue) est toujours inférieure à la différence entre $(D_1/D_2)_e$ et $(D_1/D_2)_0$. On ne peut donc dans ce cas conclure à la validité de l'explication par la composition des résistances hydrauliques. Comme la valeur de D_2 observée est plus petite que la valeur calculée, il est vraisemblable que du sable fin a colmaté les pores de l'élément rigide, ce qui a diminué sa perméabilité.

3. 32. *Interprétation dans le cas des variations positives d'humidité.*

3. 321. *Considérations générales.*

Pour les humectations, le problème met en jeu un grand nombre de paramètres, que nous énumérerons d'abord, puis classerons dans la mesure du possible. A cette fin, nous distinguerons dans l'humectation du système sable-élément grossier deux phases : l'une, caractérisée par l'humectation de l'élément poreux rigide, dure tant que ce dernier absorbe de l'eau ; l'autre, qui commence au moment où cette absorption d'eau est terminée, peut être une transmission d'eau par l'élément rigide ou une absence d'effet.

a) *Phase d'humectation.*

La quantité d'eau élémentaire, dQ_E , fournie au système sable-élément pendant l'intervalle de temps dt , se répartit entre le sable (dQ_1) et l'élément (dQ_2) :

$$dQ_E = dQ_1 + dQ_2$$

La quantité d'eau dQ_1 peut augmenter l'humidité du sable qui, situé en arrière du front humide, est humecté sans être encore saturé (eau fournie dQ') et/ou faire avancer le front humide de dz en humectant le volume de sable $(S - u) dz$:

$$dQ_1 = dQ' + A (S - u) dz$$

La quantité d'eau dQ_2 peut se répartir de la même façon que ci-dessus dans l'élément grossier ; le front humide n'étant en général plus un plan, nous n'explicitons pas dQ_2 .

En divisant l'expression par dt , on obtient :

$$(dQ/dt)_E = dQ'/dt + A (S - u) dz/dt + dQ_2/dt ;$$

cette équation est valable à chaque instant seulement, parce qu'elle suppose que, dans l'intervalle de temps dt , la valeur de A ne change pas de façon appréciable. Elle ne présume en rien de la forme des fonctions $Q_E(t)$, $Q'(t)$ et $Q_2(t)$.

On peut considérer divers cas suivant la régulation du débit par le système, l'absorption d'eau par l'élément rigide et les variations d'humidité du sable en deçà du front humide :

— Le débit d'eau absorbé par le système est indépendant de celui-ci dans l'humectation verticale sans plan d'eau puisque l'expérimentateur impose $(dQ/dt)_E = C$. Mais le débit peut dépendre, en plus des conditions imposées par l'expérimentateur, du système lui-même : Dans l'infiltration, on impose l'épaisseur de la lame d'eau en surface ; le débit absorbé dépend de l'épaisseur de cette lame d'eau, mais aussi du

système : le débit est autorégulé. Une situation analogue se retrouve dans l'humectation horizontale. Les modifications de la circulation d'eau dans le filtre se répercutent sur le débit absorbé lorsqu'il est autorégulé. Par contre, lorsque le débit est indépendant, les modifications de circulation de l'eau ne modifient pas le débit absorbé.

— L'absorption d'eau par l'élément rigide peut être nulle : $dQ_a/dt = 0$, ou appréciable : $dQ_a/dt > 0$.

— La quantité d'eau qui modifie l'humidité du sable déjà humecté peut également être nulle : $dQ'/dt = 0$, ou appréciable : $dQ'/dt > 0$.

Parmi les différentes combinaisons possibles des cas précédents, nous retiendrons celles qui correspondent aux principales expériences :

$$dz/dt = \frac{I}{A(S-u)} C, \text{ débit indépendant, pas de changement d'humidité}$$

du sable humecté, pas d'absorption d'eau par l'élément grossier, poreux ou non d'ou :

$$z = [C/A(S-u)] t + C^{te}.$$

$$dz/dt = \frac{I}{A(S-u)} [C - dQ_a/dt], \text{ débit indépendant, pas de changement}$$

d'humidité du sable humecté.

$$dz/dt = \frac{I}{A(S-u)} (dQ/dt)_E : \text{ débit autorégulé, pas de changement d'humidité}$$

du sable humecté, pas d'absorption d'eau par l'élément grossier.

$$dz/dt = \frac{I}{A(S-u)} [(dQ/dt)_E - dQ_a/dt], \text{ débit autorégulé, pas de change-}$$

ment d'humidité du sable humecté, absorption d'eau par l'élément grossier.

L'eau peut passer du sable à l'élément grossier sous l'influence de son poids, de la pression et de la succion : la gravité intervient dans toutes les situations, la pression nécessite pour se transmettre un minimum de remplissage de la porosité ; enfin, l'eau passe d'un point A à un point B, si la succion est plus élevée en B qu'en A. Notons que la succion dépend de la dimension des pores, mais aussi de leur remplissage plus ou moins complet par l'eau. Tant dans le sable que dans l'élément grossier, l'humidité n'est certainement pas constante en arrière des fronts humides ; il y a en général un gradient d'humidité provoqué par le fait que, dans un corps poreux, les pores n'ont pas tous le même rayon équivalent et que, de ce fait, l'eau avance plus vite dans les capillaires les plus larges. Le schéma 35 montre comment peut se faire le transfert d'eau entre le sable et l'élément grossier. On y voit que la transmission de l'eau à l'élément rigide dépend de la surface de contact entre l'élément et le sable mouillé, qui se décompose en une surface de section constante et une surface latérale croissant avec le temps.

Ceci amène à considérer les vitesses relatives du front humide dans le sable et dans l'élément. A part le cas des vitesses égales (qui suppose que les caractéristiques de porosité sont les mêmes dans le sable et dans l'élément grossier), on distingue *a priori* deux cas :

— Vitesse de front humide plus grande dans le sable que dans l'élément rigide : la trace du front humide dans l'élément rigide prend une forme courbe, puisque de

l'eau est fournie à l'élément par la face horizontale et par la surface latérale.

Dans l'élément, la trace du front humide prend la forme d'une courbe fermée lorsque son déplacement est très lent ; l'élément est alors entouré de tous côtés par le sable humide et il existe en son centre un volume d'air isolé de l'extérieur par le sable humide.

— Vitesse du front humide plus petite dans le sable que dans l'élément grossier. Ce cas qui entraîne que le sable s'humecte à partir des faces latérales de l'élément grossier est très improbable, comme nous le montrerons ultérieurement.

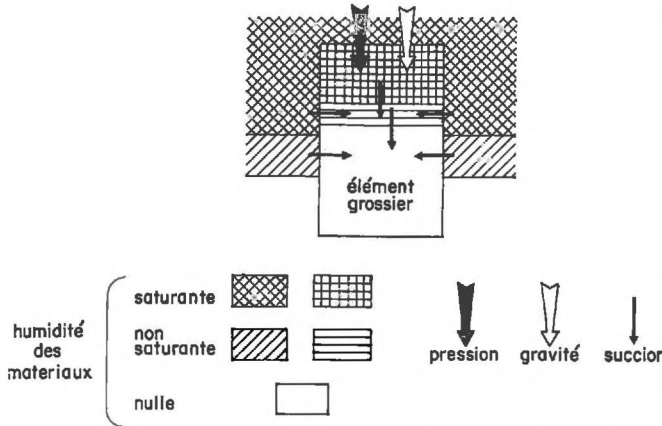


FIG. 35. — *Transfert d'eau du sable à l'élément grossier*
(schéma théorique)

Examinons les conditions de passage de l'eau du sable à l'élément grossier, en supposant que chaque milieu poreux est constitué d'un faisceau de capillaires de même diamètre, dont la mouillabilité est parfaite ; leur rayon est r_1 pour le sable et r_2 pour l'élément grossier.

$r_1 > r_2$, la suction est plus forte dans l'élément grossier qui est toujours en mesure d'extraire de l'eau du sable. On conçoit alors que, par un phénomène analogue à ce qui se passe dans deux sables contigus de dimensions de grain différentes, l'eau passe, du fait des différences de suction, du milieu le plus grossier au milieu le plus fin, comme l'a montré COURAU (1969).

En définitive même si le sable n'est pas saturé, l'eau passera dans l'élément dès que le front humide du sable arrivera à son contact.

$r_1 < r_2$. Pour analyser ce cas, considérons dans le sable un capillaire de rayon r_1 exerçant une suction ψ_1 , en communication avec un capillaire de rayon r_2 exerçant une suction ψ_2 placé dans l'élément grossier (fig. 36). Si le sable n'est pas saturé, il y a deux ménisques dans le tube vertical. Pour chacun d'eux, la pression sera $-\psi_1$ par rapport à la pression atmosphérique Pa . La pression négative dans le tube sera partout égale à ψ_1 (fig. 36 b). Elle sera inférieure à la pression ψ_2 exercée par le capillaire de l'élément rigide ; l'eau ne passera donc pas dans ce dernier. Si l'on impose un plan d'eau d'épaisseur constante (fig. 36 c), par rapport à la pression atmosphérique la pression en A est « a » et la pression arrière du ménisque est $-\psi_1$. Lorsque le ménisque est au niveau du pore large, l'eau est soumise à une pression négative bien inférieure à la suction ψ_2 exercée par le pore large (en négligeant la perte de

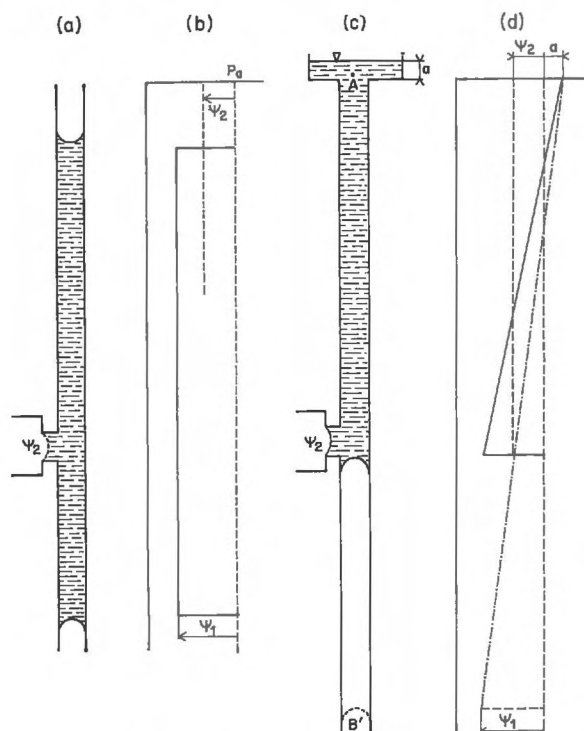


FIG. 36. — Passage de l'eau d'un capillaire de rayon r_1 (sable) à un capillaire de rayon supérieur r_2 (élément poreux rigide)

- a : pas de plan d'eau
- b : pression dans le capillaire pour le schéma (a)
- c : avec plan d'eau
- d : pression dans le capillaire pour le schéma (c)

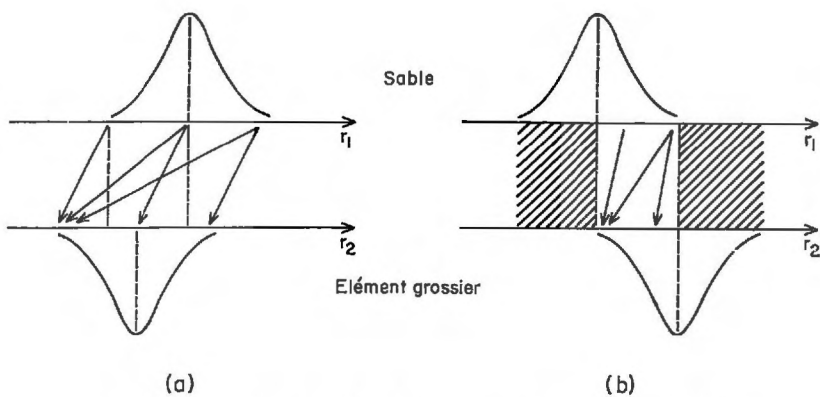


FIG. 37. — Passage de l'eau des pores du sable à ceux de l'élément grossier

- a : possible de tous les pores du sable vers tous les pores de l'élément grossier
- b : possible seulement d'un groupe de pores du sable vers un groupe de pores de l'élément grossier

charge dans le tube de raccordement très court) : L'eau ne peut passer dans le tube large. Elle ne pourra y passer que lorsque le ménisque dans le sable sera descendu à une cote telle que la pression négative dans l'eau sera inférieure à ψ_2 (point B' de la figure 36 c). Les pores de l'élément grossier ne commenceront donc à se remplir que lorsque le front humide du sable sera au-dessous de la partie supérieure de l'élément. Le front humide dans l'élément grossier sera donc toujours en retard par rapport à celui du sable, ce qui conduit à rejeter toute possibilité d'humectation du sable par l'élément grossier au cours de cette phase.

En fait, on n'a pas un rayon de pores, mais une population de rayons dispersés autour d'une valeur moyenne : nous supposons que les populations de rayons de pores du sable et de l'élément grossier ne sont différentes que par leurs valeurs moyennes r_m (écart type constant).

$r_{m1} > r_{m2}$ (fig. 37 a), l'eau peut toujours passer par succion du sable à l'élément grossier, pourvu que les pores des deux milieux soient en communication et aient des diamètres convenables.

$r_{m1} < r_{m2}$: une partie des pores sera inefficace pour le passage de l'eau du sable à l'élément grossier ; ce seront ceux de l'élément plus larges que ceux du sable et ceux du sable plus étroits que ceux de l'élément (fig. 37 b) ; lorsque les gammes de variation des pores n'ont pas de recouvrement, aucun passage d'eau du sable à l'élément n'est possible sous l'influence de la succion.

b) Phase postérieure à l'humectation.

Une fois l'absorption d'eau par l'élément rigide terminée, ce dernier peut transmettre de l'eau s'il a une perméabilité suffisante, ou être quasi inerte à cause soit de sa faible perméabilité s'il est plein d'eau, soit de son absence de remplissage.

L'allure du front humide du sable dépend aussi du moment où l'humectation de l'élément est terminée.

3. 322. Interprétation dans le cas de l'infiltration avec plan d'eau.

L'élément grossier poreux provoque des modifications de la loi de déplacement déjà compliquée du front humide du sable [$z + f(z) = At$] ; par ailleurs, la loi de déplacement du front humide dans l'élément grossier est également compliquée, puisque ce front humide est une surface gauche, et que même dans le cas de l'infiltration par la seule surface de section, la loi n'est pas linéaire (Annexe 8).

Rappelons aussi que le pourcentage de saturation moyen du sable (rapport du volume d'eau dans le tube à la porosité totale) est seulement de 75 p. 100 ; comme le sable est vraisemblablement saturé dans la partie supérieure du tube proche de la lame d'eau de la surface, le pourcentage de saturation au voisinage du front humide est inférieur à la valeur donnée ci-dessus.

Pour toutes ces raisons, on proposera seulement une explication qualitative de l'effet des éléments poreux sur la cinétique du front humide dans le sable, en comparant à chaque instant :

— la vitesse dz/dt qu'aurait le front humide dans le sable, s'il n'y avait pas d'élément. Cette vitesse décroît avec z puisqu'elle est proportionnelle à : $1 + (a + \psi)/z$

(voir section 1. 42), elle s'écrit : $dz/dt = \frac{1}{AS} (dQ/dt)$;

— la vitesse $(dz/dt)_E$ du front humide dans le sable en présence d'éléments

$$(dz/dt)_E = \frac{I}{A(S-u)} [(dQ/dt)_E - (dQ_2/dt)]$$

On a fait, entre autres, l'approximation que $dQ' = 0$.

En établissant le rapport de ces vitesses, on obtient :

$$\frac{(dz/dt)_E}{dz/dt} = \frac{S}{S-u} \left[\frac{(dQ/dt)_E}{dQ/dt} - \frac{dQ_2/dt}{dQ/dt} \right]$$

Comme l'adjonction de l'élément au système modifie le débit d'eau absorbé qui passe de dQ/dt à $(dQ/dt)_E$, on peut poser : $\frac{(dQ/dt)_E}{dQ/dt} = 1 + k(t)$, k étant une fonction du temps, > 0 si l'adjonction de l'élément augmente le débit, < 0 dans l'autre éventualité. On peut alors écrire l'expression sous cette forme :

$$\frac{(dz/dt)_E}{dz/dt} = \frac{1 + k(t) - (dQ_2/dt)/(dQ/dt)}{1 - u/S}$$

Cette équation représente les changements de vitesse du front humide dans le sable sous l'influence de deux effets antagonistes : augmentation de vitesse du front humide dans le sable par suite de la diminution de section de tube pleine de sable (le rapport croît si u croît), ralentissement de ce front à la suite de l'absorption d'eau par l'élément poreux (le rapport décroît si dQ_2/dt décroît).

Le rapport des vitesses est donné par la valeur du deuxième membre de l'équation :

$$(dz/dt)_E > (dz/dt) \quad \text{si} \quad (dQ_2/dt) / (dQ/dt) - k(t) < u / S \quad (1)$$

$$(dz/dt)_E < dz/dt \quad \text{si} \quad (dQ_2/dt) / (dQ/dt) - k(t) > u / S \quad (2)$$

Ces inégalités comparent une différence de rapports sans dimensions concernant les débits :

$$\frac{\text{débit absorbé par le système sans élément}}{\text{débit absorbé par l'élément}} + \left\{ \begin{array}{l} \text{indice de variation de débit absorbé} \\ \text{par le système provoquée par l'élément} \\ \text{grossier} \end{array} \right.$$

à un rapport sans dimension concernant les sections :

$$\frac{\text{surface de section de l'élément}}{\text{surface de section du système}}$$

Pour la craie, on a constaté une diminution de $(dQ/dt)_E$ par rapport à dQ/dt , donc $k < 0$.

La comparaison des courbes $(dz/dt)_E - z$ et $(dz/dt) - z$ (cette dernière étant obtenue par extrapolation au-delà de la cote du sommet de l'élément) fait apparaître trois zones (fig. 38) :

— $(dz/dt)_E < (dz/dt)$ pour un intervalle d'espace dont les bornes sont le haut de l'élément et le point situé 3 à 4 cm au-dessous. On a les inégalités (2) ci-dessus.

Les variations de vitesse instantanée sont assez compliquées dans cet intervalle, peut-être à cause d'hétérogénéités locales, mais l'inégalité des vitesses y est cependant toujours vérifiée. Dans ce cas la valeur des expressions concernant les débits l'em-

porte sur celle concernant les sections, ce qui correspond à une forte absorption instantanée par la craie.

La vitesse du front humide du sable passe ensuite par un minimum. Signalons que la quantité totale d'eau absorbée par la craie au cours de l'expérience représente 40 p. 100 de son volume apparent.

— $(dz/dt)_E > (dz/dt)$ depuis la borne supérieure de l'intervalle précédent jusqu'au bas de l'élément. Les inégalités (1) sont vérifiées, l'absorption d'eau étant moins importante que précédemment.

— Une fois l'élément dépassé, la vitesse (dz/dt) diminue fortement avant de croître à nouveau. Cette diminution temporaire de vitesse s'explique par le fait que la craie ne transmet pas d'eau au sable en quantité appréciable (elle est 10^{-2} environ moins perméable que lui) : pour humecter le sable sec qui se trouve sous la craie, l'existence d'une composante horizontale du déplacement de l'eau est nécessaire (cf. fig. 13).

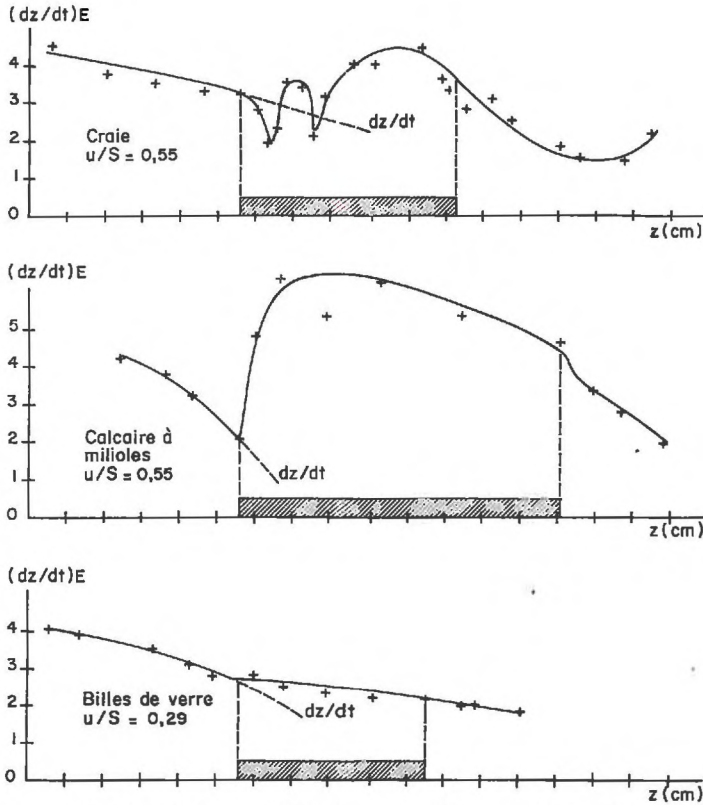


FIG. 38. — Influence d'éléments grossiers poreux sur l'infiltration
vitesse instantanée en fonction de la cote

Pour le calcaire à milioles, on a encore $k(t) < 0$, mais constamment

$$(dz/dt)_E > (dz/dt) \text{ (fig. 38).}$$

Les inégalités (1) sont satisfaites. Ceci s'explique par la faible valeur de dQ_s/dt , la quantité d'eau absorbée par l'élément étant seulement de 11 p. 100 de son volume

apparent. La vitesse $(dz/dt)_E$ passe par un maximum avant de diminuer, elle présente une diminution plus marquée une fois que le front humide a dépassé l'élément, pour les mêmes raisons que la craie.

Comme le *prisme de billes* de verre a une section moindre que les éléments ci-dessus, l'augmentation de vitesse est moins marquée que pour le calcaire à milioles (fig. 38). En effet, quoique sa perméabilité soit plus élevée que celle du sable, il s'est comporté en fait comme un corps non poreux. Placé au sein du sable, il n'a pas absorbé d'eau comme on l'a constaté à la fin de l'expérience, certainement à cause de sa faible succion et du fait qu'au moment où l'eau pouvait pénétrer dans ses pores (fig. 36) il était entouré de sable humide de toutes parts, ce qui pouvait empêcher l'expulsion de l'air.

3. 323. *Interprétation pour l'humectation verticale sans plan d'eau.*

L'expression générale fournissant le rapport des vitesses du front humide dans le sable (cf. section 3. 3. 2. 2) se simplifie en remarquant que dans ce cas :

— le débit absorbé étant indépendant du système : $k(t) = 0$ et $dQ/dt = C$, C étant une constante ;

— la vitesse du front humide en l'absence d'élément est constante et égale à V_0 .

$$\text{On obtient donc } (dz/dt)_E = V_0 \frac{1 - (dQ_2/dt)/C}{1 - u/S}$$

Pour le prisme de billes de verre, le verre mousse et le calcaire à milioles, la vitesse $(dz/dt)_E$ est constante au passage de l'élément, ce qui entraîne $dQ_2/dt = C'$, C' étant une constante. En posant $(dz/dt)_E = V_1$, l'expression devient alors :

$$V_1/V_0 = \frac{1 - C'/C}{1 - u/S}$$

Cette formule constitue une approximation de la réalité pour la craie et la brique, puisque $(dz/dt)_E$ varie avec le temps.

Écrite sous la forme : $V_1/V_0 = \left(\frac{C - C'}{C}\right) \left(\frac{S - u}{S}\right)$, elle traduit les influences antagonistes de la variation relative de débit disponible pour humecter le sable $(C - C')/C$, et de la variation relative du volume de sable à humecter, traduite par les variations de section correspondantes.

Elle permet de retrouver le sens de la variation de vitesse :

$$V_1/V_0 > 1 \text{ si } 1 - C'/C > 1 - u/S, \quad C'/C < u/S$$

la diminution de volume à humecter l'emporte sur la diminution de volume disponible pour humecter le sable. Cas de tous les éléments sauf la brique et la craie dans les conditions des expériences.

$V_1/V_0 < 1$ $C'/C > u/S$, conditions réalisées dans les expériences avec la brique et la craie, l'absorption d'eau par ces éléments étant importante.

On peut calculer avec cette formule la quantité d'eau absorbée par l'élément poreux $Q_2 = C't$ et comparer la valeur ainsi calculée à la valeur obtenue par pesée de l'échantillon (GRAS, 1968). On tire C' de l'équation précédente dans laquelle V_0 , V_1 , u , S et C sont connus, la durée d'absorption t est évaluée par l'examen des courbes

cote du front humide temps (fig. 29) : on admet que l'élément absorbe de l'eau tant que la vitesse du front humide est abaissée de façon appréciable. Pour la brique et la craie on a fait une approximation en prenant pour V_1 la pente de la droite de régression calculée à l'aide des points expérimentaux.

Le tableau 2 permet de comparer les valeurs calculées et mesurées.

TABLEAU 2

Quantités d'eau absorbées par les éléments grossiers

Matériau	Billes de verre	Verre mousse	Calcaire à milioles	Brique	Craie
Quantité d'eau mesurée absorbée	0	2,7	2,8	5,9	10,6
par l'élément (g) calculée	0	0,1	2,7	5,0	12,8

La concordance entre les valeurs mesurées et calculées est excellente pour les billes de verre ($V_1 = V_0/(1 - u/S)$, puisque $Q_2 = 0$), et le calcaire à milioles. Pour le verre mousse, le désaccord est très important ; avec la brique et la craie, le désaccord provient vraisemblablement de l'approximation faite en considérant une vitesse moyenne constante.

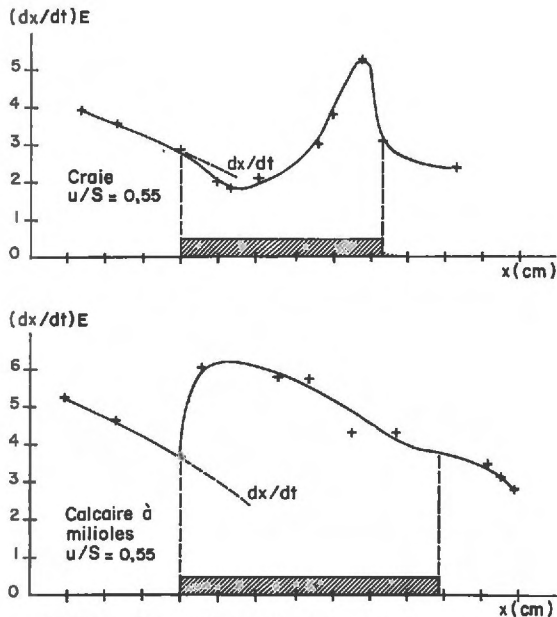


FIG. 39. — Influence d'éléments grossiers poreux sur l'humectation horizontale
vitesse instantanée en fonction de l'abscisse

Le comportement des billes de verre montre qu'un corps poreux peut avoir le même effet qu'un corps non poreux de volume et de forme identiques, l'absorption d'eau dépendant en définitive des rayons équivalents des pores du corps poreux et du sable ; dans le cas de l'infiltration sans plan d'eau, l'eau est retenue par le sable avec une succion de 30 cm d'eau environ (d'après la courbe humidité succion).

La craie est le seul élément pour lequel le calcul surestime la quantité d'eau absorbée, vraisemblablement parce que la loi $Q_2 = f(t)$ est plus compliquée que la loi linéaire utilisée ici.

3. 324. *Humectation horizontale.*

La comparaison des courbes $(dz/dt)_E$ et (dz/dt) (fig. 39) met en évidence des effets analogues à ceux déjà notés dans le cas de l'infiltration avec plan d'eau.

En présence de craie, la vitesse du front humide passe par un minimum, puis par un maximum avant de diminuer après le passage de l'élément.

Pour le calcaire à milioles, la vitesse $(dz/dt)_E$ est constamment supérieure à dz/dt , et sa variation présente la même allure que dans le cas de l'infiltration verticale avec plan d'eau.

IV. — CONCLUSIONS SUR LES EFFETS DES ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DU SABLE

4. I. — *Front humide dans le sable au niveau de l'élément*

On compare, pour une même valeur de la cote ou de l'abscisse du front humide dans le sable, la vitesse instantanée de ce front $(dz/dt)_E$, à la vitesse qu'aurait ce même front en l'absence d'élément (dz/dt) . Le sens des expressions utilisées est rappelé ci-dessous :

débit instantané absorbé par l'élément : dQ_2/dt ,

débit instantané fourni au système sans élément : dQ/dt (pour certaines expériences : $dQ/dt = C$),

rapport des surfaces de section de l'élément et du tube : u/S .

Lorsque l'élément grossier n'absorbe pas d'eau, le front humide dans le sable avance plus vite que dans le témoin. Dans le cas où le débit absorbé est indépendant du système (humectation verticale) la vitesse constante $(dz/dt)_E$ peut se calculer dans certains cas à partir de considérations simples. Si le débit est autoréglé (infiltration, humectation horizontale), $(dz/dt)_E$ peut être calculé en utilisant les lois de l'hydrodynamique et la composition des résistances hydrauliques.

Si l'élément grossier absorbe de l'eau, le signe de l'expression e :

$$\frac{\text{débit absorbé par élément}}{\text{débit absorbé par le système sans élément}} + \frac{\text{indice de variation de débit absorbé provoqué par le système}}{\text{surface de section de l'élément}} - \frac{\text{surface de section de l'élément}}{\text{surface de section du système}}$$

situé la valeur du rapport $(dz/dt)_E / (dz/dt)$ par rapport à 1, lorsque le débit est autorégulé :

$$\begin{aligned} (dz/dt)_E &> (dz/dt) && \text{si } e < 0 \\ (dz/dt)_E &< (dz/dt) && \text{si } e > 0 \end{aligned}$$

Si le débit absorbé est indépendant du système, l'expression ci-dessus se simplifie, l'indice de variation de débit étant nul. C'est la balance entre la diminution du volume de sable à humecter (qui augmente la vitesse du front humide) et la consommation d'eau par l'élément (qui diminue cette même vitesse) qui détermine le sens de la variation de vitesse. Le tableau 3 rassemble les principaux résultats.

4. 2. — Front humide dans le sable au-delà de l'élément

Dès que le front humide a dépassé l'élément grossier, une partie de l'eau sert à humecter le sable placé immédiatement sous l'élément, ce qui perturbe la vitesse.

Une fois cette perturbation disparue, on a les cas suivants :

— Débit absorbé indépendant du système : dans le cas d'absorption nulle (corps non poreux ou corps poreux ne se remplissant pas), la vitesse du front humide du sable reprend la valeur V_0 qu'elle avait avant que l'élément ait été atteint par le front. Lorsque l'absorption est appréciable, la vitesse reprend plus ou moins rapidement la valeur V_0 , selon que l'absorption d'eau par l'élément dure plus ou moins longtemps ; en général, de tels effets sont difficiles à mettre en évidence.

— Débit autorégulé : la présence de l'élément augmentant la résistance hydraulique (élément non poreux — poreux peu perméable ou ne se remplissant pas d'eau), la vitesse du front humide est toujours réduite par la présence de l'élément. Il faut insister sur le cas, aberrant à première vue, de corps à perméabilité élevée qui augmentent la résistance hydraulique parce qu'ils ne peuvent s'emplir d'eau.

Pour un corps poreux placé dans le sable, il y a théoriquement une phase d'humectation (lorsqu'il se remplit d'eau) et une phase de transmission de l'eau au sable. Chaque corps poreux n'intervient pas forcément avec la même intensité dans ces deux phases, l'action pouvant même être nulle pour l'une et/ou l'autre de ces phases. Le tableau à double entrée représente les diverses éventualités théoriquement possibles, le signe + indiquant une intervention et le signe 0 son absence.

		Transmission	
		+	0
Humectation	+	1	2
	0	3	4

L'éventualité 1 correspond au cas d'un corps poreux, qui, après s'être humecté, transmettrait de l'eau au sable ; il n'a pas été possible de mettre en évidence un comportement de ce genre, qui implique des pores de dimensions telles que leur succion soit supérieure à celle du sable et que leur pouvoir de transmission de l'eau soit encore appréciable.

TABLEAU 3

Vitesse du front humide $(dz/dt)_E$ dans le sable au niveau de l'élément grossier

Alimentation en eau du système	Absorption par l'élément grossier	
	Nulla : $dQ_2/dt = 0$	Appréciable : $dQ_2/dt > 0$
<p><i>Débit indépendant du système</i></p> <p>(Pas de plan d'eau, alimentation goutte à goutte)</p> <p>$dz/dt = V_0$</p>	<p>pour $S \cdot (S - u)^{-1} < 1,5$:</p> $V_1 = V_0 \cdot S \cdot (S - u)^{-1}$ <p>pour $S \cdot (S - u)^{-1} > 1,5$:</p> $V_1 = 1,37 \log [S \cdot (S - u)^{-1}] + 1,1$ <p>D'après ces expressions dans tous les cas</p> $V_1 > V_0 \text{ ou } (dz/dt)_E > (dz/dt)$ <p>Pour ● éléments non poreux ● éléments poreux n'absorbant pas d'eau : billes de verre</p>	<p>pour $S(S - u)^{-1} < 1,5$</p> $(dz/dt)_E = V_0 \frac{1 - (dQ_2/dt) (dQ/dt)}{1 - u/S}$ <p>pour craie et brique</p> $V_1 = V_0 \frac{1 - (dQ_2/dt)/C}{1 - u/S} \text{ pour calcaire à milioles, verre moussé.}$ <p>$(dz/dt)_E / (dz/dt)$ est $>$ ou $<$ 1 suivant que $(dQ_2/dt) / (dQ/dt)$ est inférieur ou supérieur à u/S,</p>
<p><i>Débit autorégulé par le système</i></p> <p>+ infiltration verticale (lame d'eau d'épaisseur constante en surface)</p>	$\frac{(dz/dt)_E}{(dz/dt)} = \frac{z/K_1 + l_1/K_1}{z/K_1 + \frac{l_1(S - u)}{K_1 S}}$ <p>d'après le calcul de 2. 22</p> <p>D'après cette expression :</p> $(dz/dt)_E > (dz/dt)$	<p>Pas de formule générale</p> <p>$(dz/dt)_E / (dz/dt)$ est $>$ 1 ou $<$ 1 suivant que $(dQ_2/dt) / (dQ/dt) - k$ est inférieur ou supérieur à u/S,</p> <p>k : indice de variation de débit absorbé provoqué par l'élément grossier.</p>
<p>+ infiltration horizontale (tube coudé plongeant dans l'eau)</p>	$\frac{(dx/dt)_E}{(dx/dt)} = \frac{x/K_1 + l_1/K_1}{x/K_1 + \frac{l_1(S - u)}{K_1 S}}$ <p>d'après le calcul de 2. 23.</p> <p>D'après cette expression :</p> $(dx/dt)_E > dx/dt$ <p>Pour ● éléments non poreux ● éléments poreux n'absorbant pas d'eau : billes de verre</p>	

Le cas 2 correspond à celui de la craie, qui s'humecte rapidement au détriment du sable, à cause de la succion élevée des pores fins, qui sont, par contre, très défavorables à la transmission de l'eau.

Le comportement de type 3 est impossible, puisqu'un matériau ne peut pas transmettre de l'eau, sans s'être humecté préalablement.

Le comportement de type 4 a été mis en évidence pour le prisme de billes de verre : pas d'humectation et donc pas de transmission. Signalons enfin que le système constitué par un matériau à gros pores placé dans du sable est instable, le volume poral se remplissant peu à peu de sable.

V. — HUMECTATION DES MATÉRIAUX POREUX RIGIDES PAR L'INTERMÉDIAIRE DU SOL

Nous nous attachons maintenant à l'étude de l'humectation des éléments grossiers par l'intermédiaire du sol. A cet effet, nous rassemblons les résultats d'humectation obtenus dans les expériences en tube précédentes. Ces résultats sont complétés par ceux d'expériences complémentaires sur la succion dans la terre et la durée de contact sable éléments grossiers.

5. I. — *Expériences sur la succion appliquée à l'eau de la terre*

Ces expériences de durées différentes étudient l'humectation de matériaux poreux rigides par l'intermédiaire de trois terres, dont l'eau est soumise à des suctions contrôlées différentes.

5. II. *Dispositif expérimental.*

L'appareil de Haines, utilisé pour amener l'eau dans la terre à une tension donnée (fig. 40), comprend un Büchner à plaque de verre fritté n° 4 relié par un tuyau souple à un entonnoir. La tension d'humidité en un point donné du sol est la différence des cotes de ce point et du niveau d'eau dans l'entonnoir.

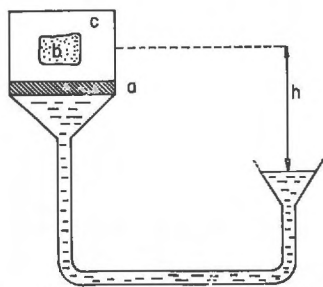


FIG. 40. — Humectation dans un appareil de Haines

- a : plaque poreuse
- b : élément poreux rigide
- c : terre
- h : valeur de la succion

Comme l'élément poreux a 25 mm d'épaisseur, la succion dans la terre est plus basse à la partie inférieure de l'échantillon ; dans la suite du texte, nous donnons comme valeur de la succion celle existant dans la terre à la base du büchner.

Pour remplir l'appareil de Haines, on maintient l'eau à une tension élevée de 150 cm d'eau, de façon à humecter le moins possible la terre, ce qui facilitera son tassement. On place une couche

TABLÉAU 4

Pourcentages pondéraux des fractions granulométriques des sols utilisés

Sable de Fontainebleau	Sable de Fontenay	Horizon B de Versailles
Matière organique : Traces	Matière organique : 0,8	Matière organique : 0,40
0-50 μ = Traces	0-2 μ = 5,0	0-2 μ = 29,95
50-100 μ = 0,08	2-20 μ = 0,9	2-20 μ = 26,95
100-200 μ = 8,11	20-50 μ = 1,1	20-50 μ = 41,15
200-500 μ = 91,00	50-63 μ = 0,2	50-200 μ = 1,15
500-1 000 μ = 0,80	63-100 μ = 12,1	200-2 000 μ = 0,30
	100-125 μ = 57,5	
	125-160 μ = 20,9	
	160-200 μ = 1,5	
	200 μ = 0,2	

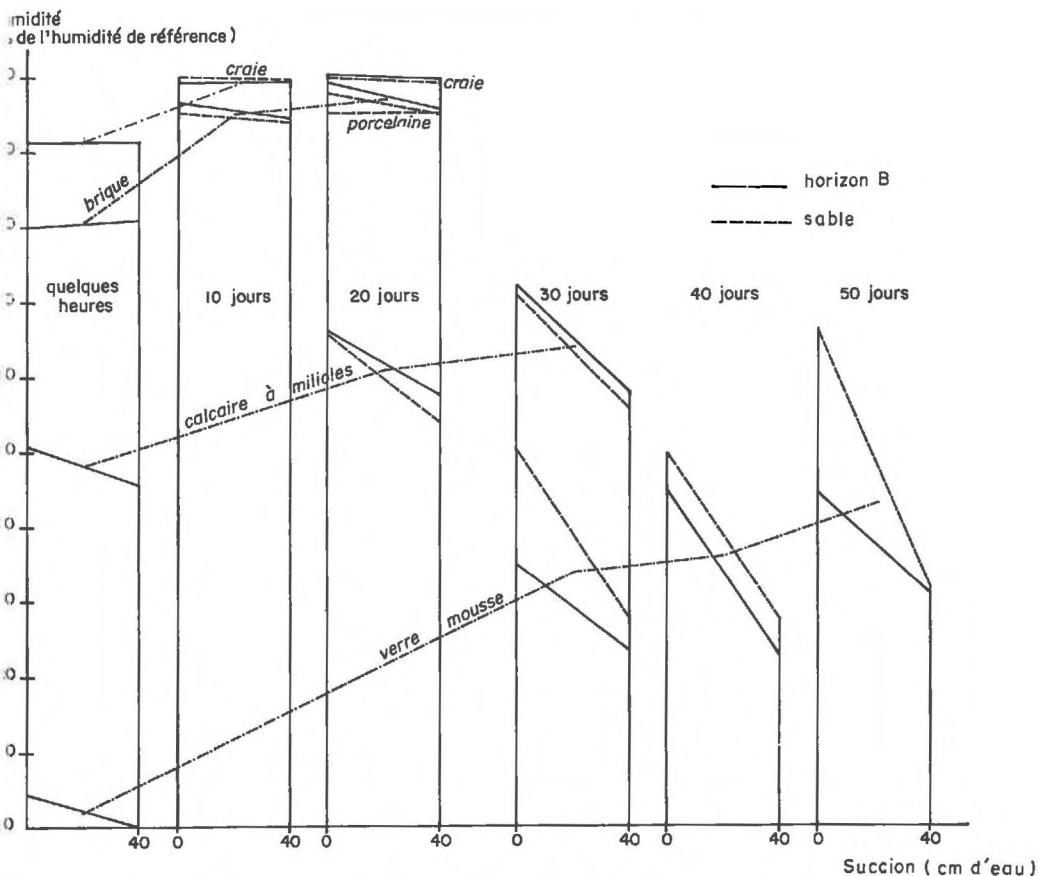


FIG. 41. — Résultats de l'humectation dans l'appareil de Haines

de terre que l'on tasse soigneusement, puis l'élément grossier que l'on recouvre ensuite de terre tassée. L'expérience commence lorsque la succion est ajustée à la valeur prévue.

Comme terre, nous avons utilisé, en plus du sable de Fontenay, un matériau plus sableux, le sable de Fontainebleau, et un plus argileux, la terre de l'horizon B de Versailles dont la granulométrie est donnée dans le tableau 4.

Le sable de Fontainebleau est constitué essentiellement de grains de diamètre supérieur à 100 μ . Le sable de Fontenay a une texture plus fine que le matériau précédent, puisque 7 p. 100 de ses particules ont un diamètre inférieur à 50 μ . A la différence des autres matériaux qui ont une structure particulière, l'horizon B de Versailles a une structure fragmentaire, obtenue ici artificiellement (agrégats de diamètre compris entre 200 μ et 2 mm) ; 88 p. 100 de ses particules ont un diamètre équivalent inférieur à 50 μ .

Les sols à texture grossière sont difficiles à humecter, lorsque l'eau est soumise à une succion supérieure à 45 cm de hauteur d'eau. Nous avons donc utilisé des tensions inférieures à cette valeur qui, au centre de gravité de l'élément rigide étaient de 3,7 à 43,7 cm d'eau et, à la base du büchner, de 0 et 40 cm d'eau.

L'humidité des éléments rigides a été mesurée en général 10, 20, 30, 40 et 50 jours après le début de l'humectation. On dispose cependant, pour certains matériaux, de mesures d'humidité faites quelques heures après le début de l'humectation.

On a pris comme humidité de référence l'humidité du même échantillon submergé à la pression atmosphérique avec précaution en un jour, puis laissé ainsi pendant 30 jours. Les résultats des expériences sont exprimés sous la forme du rapport entre l'humidité observée et l'humidité de référence.

5. 12. Résultats.

Ils sont présentés de façon à faire apparaître l'influence des différents facteurs étudiés (fig. 41) ; l'ordonnée des points représente l'humidité des matériaux grossiers en p. 100 de l'humidité de référence. En abscisse, on porte les succions exprimées en hauteur d'eau par rapport à la base du büchner.

Les comportements des éléments rigides sont très différents. On distingue deux groupes selon que l'humidité est supérieure ou inférieure à 90 p. 100 de l'humidité de référence : la craie, la brique et la porcelaine atteignent des humidités supérieures à ce seuil en 10 jours au plus ; les humidités des autres matériaux sont très en deçà de ce seuil, même au bout de 50 jours.

L'influence de la succion à laquelle est soumise l'eau de la terre n'est presque pas appréciable pour les matériaux se remplissant bien ; pour les autres, la quantité d'eau absorbée diminue lorsque la succion augmente.

La nature de la terre n'intervient pas en général de façon sensible, le remplissage étant cependant légèrement meilleur dans le sable. Pour le verre moussé, toutefois, le remplissage est meilleur avec l'horizon B.

L'humidité augmente de façon appréciable avec le temps pour tous les matériaux rigides, mais la valeur plafond est atteinte beaucoup plus rapidement pour le groupe d'éléments se remplissant bien.

L'examen de la figure 41 montre que les effets des différents facteurs ne sont pas indépendants, c'est-à-dire que l'effet d'un facteur dépend du niveau d'un autre ; par exemple, pour la durée d'humectation de 20 jours, la différence entre les humidités aux succions 0 et 40 cm d'eau n'est pas la même pour la craie et le calcaire à miliolites : il y a interaction entre la succion et la nature du matériau. On ne peut donc étudier l'effet d'un facteur que pour des niveaux définis des autres. Cependant, l'effet de certains facteurs est prépondérant par rapport à l'interaction qui existe entre eux. Pour ceux-ci, du moins, l'examen de leurs effets indépendamment des niveaux des autres facteurs conserve un sens.

Les facteurs principaux sont rangés par influence décroissante : la nature des matériaux grossiers poreux, le temps et enfin la succion pour les matériaux s'humectant difficilement.

5. 2. — *Expériences en tubes avec circulation de l'eau*

Ces expériences, qui reproduisent en partie certaines conditions du milieu naturel, sont destinées à étudier l'action du temps et de la façon de fournir l'eau à la terre sur l'humectation des corps poreux rigides.

5. 21. *Dispositif expérimental et méthode.*

On a utilisé les tubes pleins de sable de Fontenay, déjà décrits (section 1. 1).

L'eau était apportée à chaque tube de façon à réaliser :

— une infiltration suivie de filtration, avec lame d'eau à la surface. Comme on ne peut procéder à des mesures non destructrices de l'humidité du sable, celle-ci n'est pas connue directement. Pendant l'infiltration, le sable est certainement saturé au voisinage de la surface, mais il n'en est certainement pas ainsi au voisinage du front humide, puisque, en moyenne, 75 p. 100 de la porosité sont occupés par l'eau. Une fois la phase d'infiltration terminée, l'humidité du sable est voisine de la saturation;

— une humectation verticale sans plan d'eau. Les dosages d'humidité du sable effectués à la fin de l'expérience et qui constituent, de ce fait, seulement des évaluations des valeurs réelles, donnent des humidités pondérales variant entre 17 et 21 p. 100 au voisinage de l'élément grossier. A ces valeurs correspondent respectivement 54 et 66 p. 100 de la porosité et une succion de 30 à 40 cm d'eau. Lorsque l'eau s'écoule de la base du tube, l'humidité du sable est plus élevée et voisine de la saturation, la disparition de la succion due au sol sec provoquant une augmentation de l'humidité dans le sable.

— une humectation horizontale, l'alimentation en eau se faisant par un tube coudé dont une extrémité plonge dans un récipient à niveau constant (cf. section 1. 61). Les mesures faites à la fin de l'expérience indiquent des humidités de 22 et 24 p. 100 au voisinage de l'élément, ce qui correspond à 78 et 84 p. 100 de la porosité totale et à une succion de l'ordre de 35 cm d'eau. Les humidités au voisinage de la zone d'alimentation sont supérieures à ces valeurs, et c'est l'inverse pour la terre proche du front humide.

Certaines expériences ont duré 10 jours, d'autres 30 jours. Il faut remarquer que, lorsqu'on fait varier la durée des expériences, on met en jeu des variations d'humidité du sable au cours de l'expérience, puisque, comme on l'a vu ci-dessus, en humectation verticale par exemple, l'humidité du sable augmente une fois que le front humide a atteint la base du tube.

Dans le même ordre d'idée, la durée du contact entre l'élément grossier et le sable humide est mal définie. Du fait de la vitesse finie d'avancement du front humide dans le sable, cette durée de contact n'est pas la même pour les différentes parties de l'élément rigide ; elle est évidemment plus longue pour la partie touchée la première par le front humide. Par ailleurs, le front humide dans le sable avance à des vitesses différentes selon les conditions d'alimentation en eau. Il n'est donc pas possible de disposer de durées de contact comparables entre le sable humide et l'élément grossier. Nous avons dû nous contenter de faire en sorte que le temps écoulé entre l'instant où le front humide aborde l'élément et la fin de la manipulation soit de deux heures environ.

Les éléments poreux rigides, en général des prismes à base carrée ($2 \times 2 \times 4$ cm), étaient placés dans les tubes au sein du sable, de façon que leurs axes de symétrie longitudinaux coïncident avec ceux des tubes.

5. 22. *Résultats.*

5. 221. *Influence du mode d'humectation.* On a rassemblé dans le tableau 5 les résultats des expériences de courte durée (2 à 5 heures). Les résultats des humectations directes avec précaution (mesures au pycnomètre, 1^{re} partie section 3.1) sont rappelés dans ce tableau.

D'une façon générale, les humectations qui se font par l'intermédiaire du sable aboutissent à des teneurs en eau analogues et donc indépendantes des procédés employés.

La quantité d'eau absorbée par la craie est à peu près constante, quel que soit le type d'humectation.

Les matériaux autres que les billes de verre, rangés par humidité croissante, se classent de la même façon, qu'on les humecte directement ou par l'intermédiaire du sol ; dans ce cas, l'emprisonnement d'air est accentué par rapport à l'humectation directe.

TABLEAU 5

*Teneur en eau des échantillons (p. 100 de la porosité ouverte)
après des humectations de genre différent*

Durée : 2 à 5 heures

Mode d'humectation	Matériau					
	Craie (0,8 μ)	Brique (24,5 μ)	Calcaire à miliolites (250 μ)	Verre mousse (500 μ)	Billes de verre (1 000 μ)	
Humectation directe avec précaution.....	91,7	75,7	33,0	17,3	100	
Tube : Humectation verticale, sans plan d'eau	92,5	71,8-72,0	26,8	0,8-0,8		
Tube : Infiltration verticale, plan d'eau en surface	91,0	73,2		1,6	0	
Tube : Humectation horizontale	91,2-99,5					
Büchner {	succion 40	92,6	78,4	26,1	0,7	
	succion 0	92,7	77,2	28,9	3,3	

Les billes de verre se comportent de façon radicalement différente selon que l'humectation est directe ou non.

5. 222. Influence de la durée.

Pour l'élément s'humectant le plus mal, le verre mousse, on a augmenté la durée de contact, puisqu'elle pouvait améliorer le remplissage.

Quel que soit le mode d'humectation, l'humidité de l'élément grossier croît avec le temps dans des proportions considérables (tabl. 6).

Mais l'influence de la durée n'est pas indépendante du mode d'alimentation en eau du sable :

— pour une durée de 10 jours, la quantité d'eau absorbée est plus élevée dans le cas d'infiltration — filtration que dans celui de l'humectation verticale ;

— on obtient à peu près le même résultat avec une humectation verticale de 10 jours et une humectation en büchner de 30 jours à succion nulle.

5. 3. — *Discussion des résultats*

Examinons d'abord les expériences de courte durée du tableau 5. Sauf pour les billes de verre, la plus ou moins grande propension des matériaux à l'emprisonnement d'air (liée au rayon maximum des pores : première partie section 3. 13.) explique une partie des différences de remplissage constatées.

TABLEAU 6

Teneur en eau du verre mousse
(% de la porosité ouverte)

Durée	Fourniture d'eau au sable			
	Humectation verticale, sans plan d'eau	Infiltration, filtration, plan d'eau	Büchner	
			Succion 40	Succion 0
2 à 5 heures	0,8 — 0,8	1,6	0,7	3,3
10 jours	12,1	21,4		
30 jours			7,6	11,4

Pour rendre compte de la part de différences inexplicées, il faut faire intervenir la succion exercée par les matériaux grossiers. Seuls ceux de leurs pores assez fins pour exercer une succion supérieure à celle produite par le sable se remplissent. Si le rayon maximum des pores est élevé (brique, calcaire à miliolles, verre mousse), une partie des pores seulement se remplit d'eau ; le cas extrême est celui du massif de billes de verre qui n'absorbe pas d'eau en quantité appréciable parce que ses pores sont trop larges. A l'inverse, pour un matériau tel que la craie, même les pores les plus larges exercent une succion (2 185 cm d'eau) largement supérieure à celle à laquelle est soumise l'eau du sable (quelques dizaines de cm d'eau) : la craie se remplit donc presque totalement et d'une façon indépendante de la succion appliquée à l'eau du sol tant qu'elle n'excède pas 2 185 cm d'eau.

Cette indépendance a été vérifiée avec la brique dont les pores les plus larges exercent une succion de 62 cm d'eau : lorsqu'on augmente la succion appliquée à l'eau du sable, la brique absorbe une quantité d'eau indépendante de celle-ci, tant qu'elle reste inférieure à 60 cm d'eau environ ; au-delà de cette valeur la quantité d'eau absorbée diminue rapidement (fig. 42).

Comme les matériaux à pores étroits se remplissent rapidement et presque complètement, la durée de l'expérience n'a pas d'influence appréciable. Par contre, pour les matériaux à pores larges, la quantité d'eau absorbée croît avec le temps. Des explications plausibles ont déjà été données : diffusion de l'air dans l'eau (première partie, section 3. 212.), variations de température d'autant plus probables que le temps écoulé est plus long (première partie, section 2. 26).

Le remplissage plus élevé du verre mousse placé dans le tube en filtration peut s'expliquer par une transmission convenable de la pression hydrostatique (l'humidité du sable est plus proche de la saturation) qui favoriserait l'expulsion de l'air (première partie, section 3. 212.) et ou par l'entraînement de l'air dans l'eau en circulation dans les capillaires, l'air parvenant à ces capillaires par diffusion.

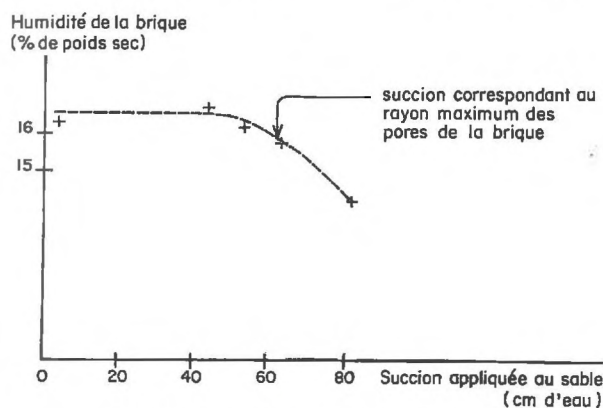


FIG. 42. — Influence de la suction appliquée au sable sur l'humectation de la brique

5. 4. — Conclusions sur l'humectation des éléments grossiers poreux

La nature de l'élément grossier explique une grande partie des différences de remplissage : le diamètre des pores les plus larges de chaque matériau permet de les classer en deux groupes.

Les matériaux à pores de petit diamètre se remplissent rapidement et de façon presque complète, indépendamment de la suction appliquée à l'eau de la terre (pour la gamme étudiée).

Lorsque le diamètre de leurs pores est plus grand, les matériaux se remplissent plus lentement et d'une façon d'autant plus incomplète que la suction appliquée à la terre est plus élevée. Le degré de remplissage de ces éléments augmente avec le temps et lorsque l'eau est en mouvement dans la terre.

VI. — HUMECTATION D'UN SOL, CAILLOUTEUX

Nous examinons maintenant de façon globale le problème de l'humectation d'une épaisseur de sol sec par une quantité d'eau apportée en surface. Un certain temps après l'apport d'eau, la position du front humide se stabilise, ce qui correspond à une humidité constante de la terre H_1 , la capacité au champ ; l'humidité des cailloux atteint également un équilibre. Ce sont les relations entre la quantité d'eau apportée et les paramètres de cet équilibre que nous étudierons.

Une lame d'eau d'épaisseur U (mm) apportée à la surface d'un sol sec amène une épaisseur h (dm) de ce sol à l'humidité H_1 (p. 100 de poids sec) telle que

$$U = d_a \cdot h \cdot H_1,$$

d_a étant la densité apparente du sol (HÉNIN, 1969).

6. 1. — *Cailloux inertes du point de vue hydrique*

Lorsque les cailloux sont inertes du point de vue hydrique, parce qu'ils ne sont pas poreux ou n'absorbent pas d'eau quoique poreux, on modifie l'expression précédente en substituant à la densité apparente (d_a) la densité apparente partielle de terre fine (d_{ap}), la nouvelle épaisseur humectée étant h' , telle que :

$$U = d_{ap} \cdot h' \cdot H_1$$

La densité apparente partielle de terre fine est le poids de terre fine contenue dans l'unité de volume de sol en place (BOURRIER, 1959). Une même quantité d'eau U humecte une épaisseur h de sol sans cailloux et une épaisseur h' du même sol contenant des cailloux.

$$U = d_a \cdot h \cdot H_1 = d_{ap} \cdot h' \cdot H_1 \text{ donne } h/h' = d_{ap}/d_a$$

Comme $d_{ap} < d_a$, $h' > h$. Par exemple, pour $d_a = 1,3$ et $d_{ap} = 0,8$ $h' = 1,6 \cdot h$

Quelle que soit la nature de la terre fine, la présence de cailloux inertes augmente l'épaisseur de sol humectée par une certaine quantité d'eau.

La densité apparente partielle de terre fine dépend de la densité apparente de terre fine et de la proportion en volume de cailloux dans le sol.

6. 2. — *Cailloux actifs du point de vue hydrique*

A l'unité de volume de sol en place correspondent :

— un poids de terre fine d_{ap} qu'on amène à l'humidité H_1 ;

— un poids de cailloux d_{cp} qu'on amène à l'humidité H_c , d_{cp} étant la densité apparente partielle de cailloux (GRAS, 1962-1969).

En faisant l'hypothèse que terre fine et cailloux s'humectent simultanément, on a :

$$U = d_{ap} \cdot h' \cdot H_1 + d_{cp} \cdot h' \cdot H_c$$

Pour le même sol sans cailloux, on aurait :

$$U = d_a \cdot h \cdot H_1$$

Une profondeur h de sol sans cailloux et h' de sol caillouteux sont humectées par la même quantité d'eau U .

$$U = d_a \cdot h \cdot H = d_{ap} \cdot h' \cdot H_1 + d_{cp} \cdot h' \cdot H_c = (d_{ap} \cdot H_1 + d_{cp} \cdot H_c) h'$$

$$\text{d'où } h/h' = d_{ap}/d_a + (d_{cp}/d_a) (H_c/H_1)$$

Cette formule générale englobe celle qui a été obtenue en 6.1, puisque pour l'obtenir il suffit d'écrire que l'humidité de l'élément grossier est nulle ($H_c = 0$).

Le rapport h/h' dépend de plusieurs paramètres :

$$h/h' < 1 \quad \text{pour} \quad d_{ap}/d_a + (d_{cp}/d_a) (H_c/H_1) < 1$$

$$h/h' > 1 \quad \text{pour} \quad d_{ap}/d_a + (d_{cp}/d_a) (H_c/H_1) > 1$$

et quoique d_{ap}/d_a soit toujours inférieurs à 1, il est difficile de tirer des conclusions simples de l'examen de cette expression.

On aborde le problème d'une autre façon, en substituant à un volume apparent unité de sol un caillou de même volume : on perd ainsi l'humidité volumique $d_a \cdot H_1$ et on gagne $d_c H_c$, d_c étant la densité apparente du caillou. C'est la comparaison de $d_c \cdot H_c$ et de $d_a \cdot H_1$ qui donnera le sens de la variation

$$\begin{aligned} - d_a \cdot H_1 + d_c H_c > 0 & \text{ gain d'humidité volumique} \\ & = 0 \text{ invariance d'humidité volumique} \\ - d_a H_1 + d_c H_c < 0 & \text{ perte d'humidité volumique} \end{aligned}$$

Par exemple, la présence dans un sol ($d_a = 1,3$; $H_1 = 20$) de cailloux pour lesquels $d_c = 2,0$ $H_c = 5$, va diminuer le volume de pores occupables par l'eau, la même quantité d'eau humectera alors une épaisseur plus grande de sol que s'il n'y avait pas de cailloux, puisque $- 1,3 \cdot 20 + 2 \cdot 5 < 0$. Par contre, l'apport de cailloux crayeux ($d_c = 1,5$; $H_c = 24$) augmente le volume de pores utilisables, puisque $- 1,3 \cdot 20 + 1,5 \cdot 24 > 0$; la même quantité d'eau humectera une profondeur moindre de sol.

Ainsi, la valeur par rapport à 1 de l'expression $- d_a \cdot H_1 + d_c H_c$ permet de prévoir si h/h' est inférieur, supérieur ou égal à 1.

En d'autres termes, si le volume pouvant être effectivement rempli par l'eau est plus important dans l'unité de volume apparent de cailloux que dans celui de terre fine, la présence de cailloux diminue la profondeur de sol humectée ; c'est évidemment l'inverse lorsque l'ordre ci-dessus est changé.

Les formules précédentes donnent des ordres de grandeurs parce que, d'une part terre fine et éléments grossiers ne s'humectent pas forcément à la même vitesse et que, d'autre part, elles ne tiennent pas compte de l'influence éventuelle des dimensions des éléments grossiers sur leur degré de remplissage.

SUMMARY

EFFECTS OF THE COARSE CONSTITUENTS ON THE DYNAMICS OF WATER IN A SANDY SOIL

II. — DYNAMICS OF WATER IN A FINE-EARTH/COARSE CONSTITUENTS SYSTEM POSITIVE MOISTURE CHANGES

A pebble-containing soil is a heterogeneous system consisting of two materials, *i. e.*, fine earth and pebbles, also described as coarse constituents.

The dynamics of water in such a system has been investigated experimentally using tubes filled with sandy soil containing coarse constituents of definite geometrical shape.

The effects of these tubes on the kinetics of the moist front creeping forward in an initially dry soil under different water supply conditions, *i. e.*, horizontal influx, vertical or horizontal moistening are investigated. Experimental data were evaluated in the simpler instances on the basis of the laws of hydrodynamics.

After wetting the system, the effect of the coarse constituents on the conveyance of the water by the system is gone into. All constituents curtail the aggregate permeability of the system.

During previous experiments the coarse porous constituents may be moistened by the sand. The variational moisture recorded arises from the nature of the coarse constituents and from the water sucked in by the sandy soil and coarse constituents.

ZUSAMMENFASSUNG

EINWIRKUNGEN DER GROBEN BESTANDTEILE AUF DIE DINAMYK
DES IN SANDIGEM BODEN ENTHALTENEN WASSERSII. — DYNAMIK DES WASSERS IN EINER MISCHUNG VON FEINERDE
UND GROBEN BESTANDTEILEN : POSITIVE FEUCHTIGKEITSSCHWANKUNGEN

Ein Boden, der Kieselsteine enthält, stellt ein uneinheitliches System dar, das aus zweierlei Arten von Materie besteht, nämlich aus der Feinerde und den Kieselsteinen, die auch als grobe Bestandteile bezeichnet werden.

Die Dynamik des Wassers in einem solchen System wurde experimentell untersucht, wobei Röhren benutzt wurden, die mit sandigem, grobe Bestandteile von definierter geometrischer Form enthaltendem Boden gefüllt waren.

Zunächst wurde deren Einfluss auf die Kinetik der einen ursprünglich trochenen Sandboden durchdringenden Feuchtigkeit untersucht, und zwar unter verschiedenartigen Bedingungen der Tränkung mit Wasser : Planmäßige Infiltration, vertikale und horizontale Befeuchtung. Die Untersuchungsergebnisse wurden in den einfachen Fällen an Hand der Gesetze der Hydrodynamik ausgedeutet.

Nach erfolgter Befeuchtung der Mischung wurde die Einwirkung der groben Bestandteile auf die Ausbreitung des Wassers in der Mischung untersucht. Sämtliche Bestandteile verringern die Gesamtdurchlässigkeit der Mischung.

Im Verlauf der vorausgehenden Versuche konnten die porösen groben Bestandteile sich vom Sand aus mit Feuchtigkeit tränken. Die Schwankungen der registrierten Feuchtigkeit beruhen auf der Natur der groben Bestandteile sowie auf der von dem Sandboden und den groben Bestandteilen ausgeübten Wasseraufsaugung.

РЕЗЮМЕ

Действие крупных элементов на динамику влаги в песчаной почве.

II. Динамика влаги в системе мелкая почва — крупные элементы : положительные изменения влажности.

P. ГРА.

Почва заключающая щебень представляет гетерогенную систему состоящую из двух материалов : мелкой почвы и щебня, называемого также иногда крупными элементами. Динамика влаги в такого рода системе изучалась в экспериментах с применением колонок песчаной почвы, заключающей крупные элементы определенных геометрических форм.

Сперва изучалось их влияние на кинетику фронта смачивания, передвигающегося в исходно сухой песчаной почве, при различных условиях водного питания : инфильтрация при поверхностном напоре, горизонтальное или вертикальное увлажнение. Результаты опытов интерпретировались в простых случаях при помощи законов гидродинамики.

В увлажненной системе рассматривалось действие крупных элементов на передачу влаги системой. Все элементы уменьшают ее водопроницаемость.

В пред' идущих опытах крупные пористые элементы увлажнялись от песка. Зарегистрированные изменения влажности зависят от природы крупных материалов, и от всасывающей силы песчаной почвы и крупных элементов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BOURRIER J., 1959. *Problèmes posés par la présence de cailloux dans les sols irrigués*. Ministère de l'Agriculture. Direction générale du Génie rural et de l'Hydraulique agricole. Imprimerie nationale.
- COLLIS-GEORGE S., HÉNIN S., KELLY J.-A., 1963. Étude du mécanisme de la dessiccation des sols par évaporation. *C. R. Acad. Sci.*, **278**, 242-244.
- COURAU M., 1967. Modalités de l'infiltration de l'eau dans un milieu poreux : effet de la force de succion. *C. R. Acad. Sci.*, **265**, série D, 862-865.
- COURAU M., 1969. Étude expérimentale de la circulation de l'eau saturante dans des milieux poreux artificiels. *Ann. agron.*, **20**, 5-14.
- FÉODOROFF A., 1965. *Étude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante. Cas d'un sol initialement sec et d'un arrosage sans formation de plan d'eau en surface*. Thèse, Paris.
- GARDNER W. R., 1958. Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils. *Highway research Board SR 40*, 78-87.
- GRAS R., 1962. Quelques observations sur les relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pêcher dans la vallée du Rhône entre Vienne et Valence. *Ann. agron.*, **13** (2), 141-174.
- GRAS R., 1966. L'influence des matériaux poreux rigides sur la circulation de l'eau non saturante dans le sol. *C. R. Acad. Sci.*, **266**.
- GRAS R., 1969. Les mesures de densités apparentes en sol caillouteux. *Bull. Ass. fr. Ét. Sol.*, 9- 11.
- HÉNIN S., GRAS R. et MONNIER G., 1969. *Le profil cultural*, 1 vol., Masson.
- SCHNEEBELI, 1966. *Hydraulique souterraine*, 1 vol., Eyrolles.
- SWARTZENDRUBER D., 1969. The flow of water in unsaturated soils. In J. M. de Wiest (1969). *Flow through porous media*. 1 vol, Academic Press.
- DE WIEST J. M., 1969. Fundamental principles of ground-water flow in : De Wiest. *Flow through porous media*, 1 vol., Academic Press.

EFFETS DES ÉLÉMENTS GROSSIERS
SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU
DANS UN SOL SABLEUX

III. — DYNAMIQUE DE L'EAU
DANS LE SYSTÈME TERRE FINE-ÉLÉMENTS GROSSIERS,
VARIATIONS NÉGATIVES D'HUMIDITÉ

R. GRAS

Station d'Agronomie.
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78 - Versailles

EFFETS DES ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS UN SOL SABLEUX (*)

III. — DYNAMIQUE DE L'EAU
DANS LE SYSTÈME TERRE FINE-ÉLÉMENTS GROSSIERS,
VARIATIONS NÉGATIVES D'HUMIDITÉ

R. GRAS

*Station d'Agronomie.
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78 - Versailles*

RÉSUMÉ

Le système terre fine-élément grossier préalablement humecté est soumis à la dessiccation. Lorsque les éléments grossiers ne sont pas poreux, ils modifient seulement le déplacement de l'eau dans le sable.

Si les éléments grossiers sont poreux, ils cèdent de l'eau au sable sous forme liquide lorsque celui-ci est suffisamment desséché pour que des pores fins puissent se remplir d'eau au détriment de l'élément grossier.

La quantité d'eau qui passe ainsi de l'élément grossier à la terre fine dépend du couple élément grossier-terre fine et de l'humidité de la terre fine.

INTRODUCTION

La dynamique de l'eau dans le système terre fine-éléments grossiers est étudiée ici lorsque le système se dessèche, ce qui correspond aux processus naturels d'évaporation ou d'absorption d'eau par les racines des végétaux.

On examine en particulier le transfert d'eau sous forme liquide de l'élément grossier au sable en voie de dessèchement, parce que un tel transfert permet aux éléments grossiers poreux de contribuer à l'alimentation en eau de la végétation.

L'éventualité d'une extraction directe de l'eau des éléments grossiers par les poils absorbants des racines n'est pas à exclure, mais elle n'a pas été étudiée ici.

(*) Ce travail fait partie d'une thèse de Doctorat d'État soutenue le 21 septembre 1971 à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.

I. — INFLUENCE DES ÉLÉMENTS GROSSIERS NON POREUX
SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU D'UN SOL
EN VOIE DE DESSÈCHEMENT

Dans le milieu naturel, le sol à la capacité au champ se dessèche à la suite de l'évaporation directe ou de l'absorption d'eau par les racines des végétaux.

I. I. — *Dispositif expérimental*

Pour simuler l'effet de l'évaporation ou de l'absorption des racines, on pouvait soumettre une des extrémités d'un tube plein de sable de Fontenay humide au chauffage d'une ampoule électrique. Malheureusement, on provoque ainsi des circulations parasites d'eau à la suite de condensations dans les zones plus froides éloignées de la source de chaleur (COLLIS-GEORGÈ *et al.*, 1963). Pour éviter cet inconvénient, nous avons extrait l'eau en plaçant du silicagel au contact du sol (PUECH, 1966). Au cours de l'expérience, le silicagel s'humidifie et son pouvoir absorbant diminue. On pallie en partie cet inconvénient en utilisant un appareil inspiré de celui de PUECH (1969) : l'absorption de l'eau est répartie sur une grande quantité de silicagel qui est renouvelée au contact du sol par le brassage d'une hélice (fig. 1). On peut ainsi extraire l'eau de deux tubes en même temps. L'expérience a duré 7 heures 15 minutes et on a fait tourner les tubes autour de leurs axes horizontaux tous les trois quarts d'heure, afin de diminuer les différences d'absorption dues au fait que le renouvellement du silicagel était moins intense dans la partie inférieure du tube à cause du léger espace libre ménagé pour éviter l'éboulement de la terre du tube. Au cours de l'expérience, on a remplacé une partie du silicagel de l'appareil par du silicagel sec.

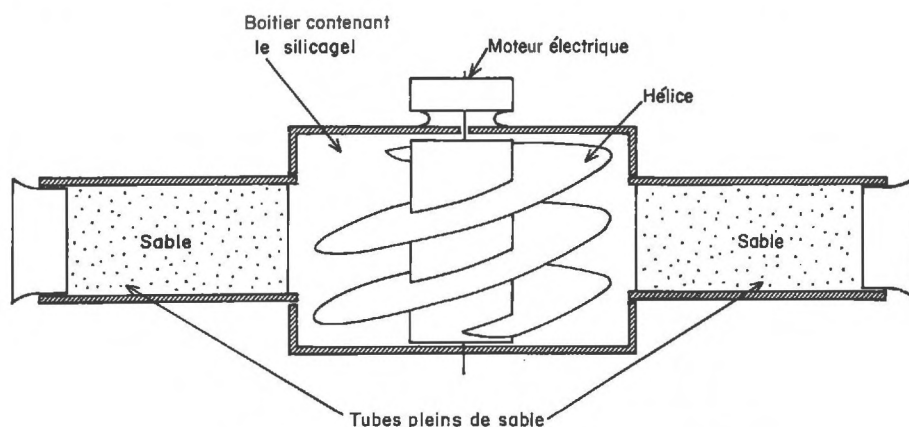


FIG. 1. — Appareil permettant d'extraire l'eau à l'aide de silica-gel

On compare un tube témoin et un tube d'essai. Les tubes ont un diamètre intérieur de 5,3 cm et contiennent du sable sur 11 cm d'épaisseur. Ils sont remplis de la façon suivante : le sable est jeté par fraction de 50 g dans le tube partiellement rempli d'eau ; après chaque apport de sable, on élève un peu le niveau d'eau.

Dans le tube d'essai, on place au sein du sable un cylindre de plastique rigide (rayon = 2 cm, hauteur = 4 cm) ; la surface de section occupée par le sable passe ainsi de 22,0 cm² à 9,4 cm² ; pour éviter que ce cylindre ne se déplace à l'intérieur du sable humide, on a utilisé un dispositif ainsi conçu (fig. 2) : le cylindre est attaché par des fils métalliques à un support de fil de fer rigide qui rentre exactement dans le tube. Celui-ci est rempli de sable comme le tube témoin. Une fois le remplissage terminé, l'excès d'eau est enlevé, d'abord par simple égouttage, puis par applica-

tion d'un vide modéré. Le tube est ensuite bouché et placé horizontalement pendant une nuit, pour que son humidité s'homogénéise. Cette façon de procéder permet d'obtenir une humidité du sable plus régulière que celle que l'on obtiendrait en humectant le sable sec par capillarité, ou en laissant se ressuyer le sable préalablement saturé après remplissage à sec.

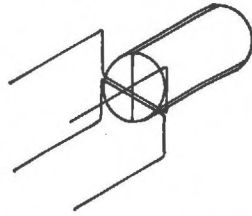


FIG. 2. — Montage fixant la position de l'élément grossier dans le sable humide

1. 2. — Résultats

On compare le tube d'essai et le tube témoin placés pendant le même temps sur l'appareil à silicagel. La perte d'eau totale de chaque tube a été rapportée à la quantité d'eau totale initiale, qui, pour la même humidité du sable, diffère du tube témoin au tube avec élément, du fait de la présence de ce dernier (tabl. 1).

TABLEAU I

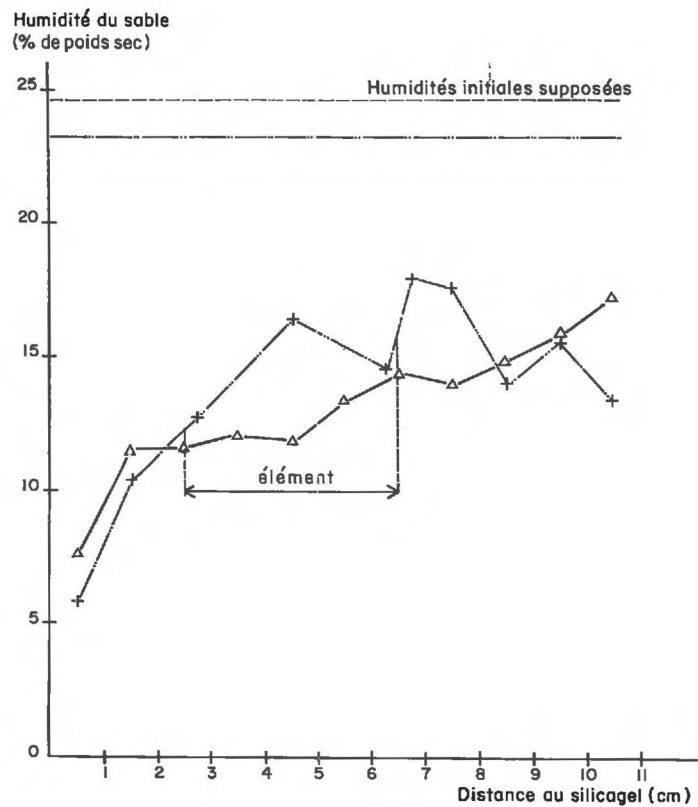
Extraction d'eau par le silicagel

Tubes	Humidité moyenne initiale du sable (%)	Eau extraite (% de la quantité d'eau initiale)
Expérience 1	Tube témoin..	24,6
	Tube avec élément	23,2
Expérience 2	Tube témoin..	43,0
	Tube avec élément	43,7

On constate que, pour une expérience donnée, l'humidité initiale en p. 100 de sable sec étant à peu près la même, le rapport de la quantité d'eau extraite à la quantité initiale n'est pas sensiblement modifié par la présence d'un élément grossier non poreux dans le sable.

La figure 3 représente les profils hydriques à la fin de l'expérience. Leur examen fait apparaître les points suivants :

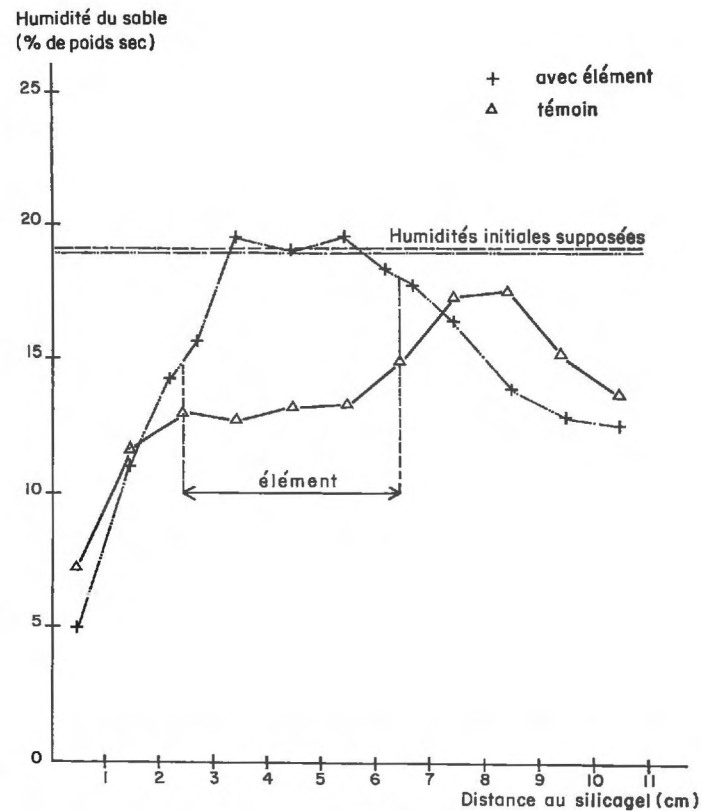
- la présence de l'élément grossier n'empêche pas le dessèchement de se manifester dans la partie du tube la plus éloignée de la zone d'extraction ;
- l'humidité du sable est plus élevée au voisinage de l'élément grossier que dans les parties correspondantes des tubes témoins. Ce supplément d'humidité, parti-



(a)

FIG. 3. — Effet d'un élément grossier non poreux sur la dessiccation d'un sable. Profils hydriques

a : humidité initiale élevée



(b)

b : humidité initiale faible

culièrement net sur la figure 3 *b*, ne peut être attribué au hasard et il est difficile de l'expliquer par une différence de tassement du sable à côté de l'élément. L'eau se déplacerait donc d'une couche relativement sèche vers une couche plus humide, comme l'ont signalé HALLAIRE et HÉNIN (1958). La diminution de section provoquée par l'élément suggère l'existence d'un mécanisme compensateur qui se traduirait par une augmentation de la quantité d'eau en transit dans l'espace annulaire autour de l'élément.

II. — TRANSMISSION D'EAU DE L'ÉLÉMENT RIGIDE AU SABLE

Le transfert d'eau de l'élément poreux rigide au sable peut s'effectuer sous forme liquide ou gazeuse. Dans ce dernier cas, il faut que la tension de vapeur d'eau soit plus faible dans l'espace poral du sable que dans celui de l'élément ; la diffusion provoque alors le transfert de certaines molécules d'eau du corps poreux vers le sable. Ce mécanisme peut coexister avec le transfert sous forme liquide, la vapeur d'eau pouvant se condenser dans des pores si la température y est suffisamment basse.

Le transfert sous forme gazeuse peut avoir quelque importance dans des conditions particulières, mais il est probable que le transfert sous forme liquide met en jeu des quantités d'eau plus grandes que la diffusion de la vapeur. Par ailleurs, c'est sous la forme liquide que l'eau intervient le plus efficacement pour la nutrition minérale et l'alimentation en eau ; l'eau passe alors de l'élément grossier au sol et du sol à la racine. Pour toutes ces raisons, nous nous limiterons au transfert isotherme d'eau sous forme liquide.

Pour étudier ce transfert, on réalise un dispositif expérimental qui, en diminuant la teneur en eau du sable autour de l'élément, rend possible un déplacement éventuel de l'eau de l'élément vers le sable. Il s'agit donc, en principe, de dessécher le sable et d'examiner si l'élément grossier qui s'y trouve perd alors de l'eau.

En fait, une telle expérience ne saurait montrer sans ambiguïté que le transfert s'est effectué sous forme liquide, puisqu'un corps poreux peut perdre de l'eau du seul fait de l'évaporation, pourvu que l'expérience dure assez longtemps.

Pour savoir sous quelle forme l'eau se déplace, on remplit alors l'élément poreux rigide d'eau marquée avec un sel, qui se déposera dans le corps rigide si l'eau s'y évapore (transfert gazeux), ou au contraire se déplacera avec elle dans le sable où on le retrouvera (transfert liquide). Mais, même en l'absence de tout mouvement de l'eau, le marqueur se déplacera par diffusion, de façon que sa concentration tende à devenir la même pour l'eau de l'élément grossier et l'eau du sable. Il faut donc disposer d'un témoin permettant d'évaluer la teneur en sel dans le sable au voisinage du corps grossier, en l'absence de tout mouvement de l'eau ; ce témoin est difficile à réaliser puisque, au cours de l'expérience, la teneur en eau diminue constamment dans le sable, ce qui modifie l'intensité de la diffusion par l'intermédiaire de la section occupée par l'eau.

Nous avons donc mis d'abord en évidence de façon qualitative qu'il y avait bien un transfert d'eau sous forme liquide ; par la suite, on a précisé l'importance quantitative de ce transfert.

2. I. — *Mise en évidence d'un transfert d'eau sous forme liquide*2. II. *Méthode.*

On a utilisé le procédé décrit dans la section 1. 1. Il consiste à dessécher le tube de sol par une de ses extrémités au moyen de silicagel.

Lorsqu'on essaie de remplir le tube avec du sable préalablement humecté, qui est de ce fait agrégé, on est obligé de tasser le sable pour rendre le remplissage régulier, mais ce faisant on exprime en partie l'eau des agrégats et on crée ainsi une distribution très irrégulière de l'eau. On pourrait alors remplir le tube en versant le sable dans l'eau, comme cela a été décrit dans la section 3. 11 de la 2^e partie ; mais la solution saline de l'élément poreux rigide risque de se diluer par diffusion du sel dans l'eau du récipient, cette dilution affectant vraisemblablement plus la périphérie de l'élément que son centre ; la concentration en sel de la solution emplissant l'élément n'étant plus constante, le marquage perdrait toute signification.

Le dispositif expérimental a donc été modifié comme suit (fig. 4) : le contact entre le sable et l'élément rigide se fait par une face seulement de celui-ci ; des précautions particulières ont été prises pour éviter les pertes d'eau par évaporation à partir des autres faces de l'élément.

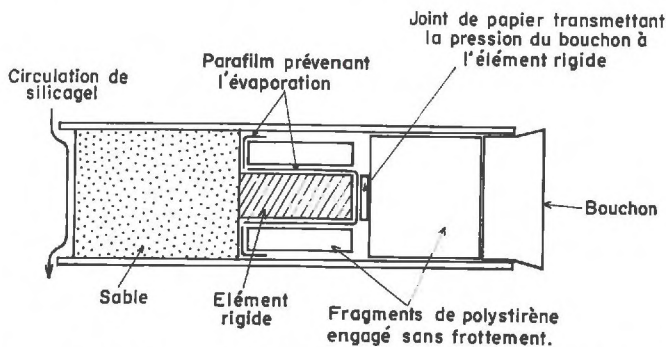


FIG. 4. — *Dispositif expérimental réalisé pour mettre en évidence la cession d'eau sous forme liquide d'un élément rigide au sable*

Les succions mises en jeu sont relativement faibles, puisque, au bout de 6 heures de ressuyage, la succion maximum appliquée à l'eau du sable au voisinage de l'élément grossier est de 50 cm d'eau seulement. Pour obtenir des succions plus élevées, la durée de l'expérience aurait dû être beaucoup plus longue, mais à ce moment-là, nous verrons que la diffusion du marqueur aurait considérablement compliqué l'interprétation des résultats.

Pour marquer l'eau, nous avons utilisé le Cl_2Ca , 2 H_2O à une concentration de 1 p. 100, le calcium étant préféré au sodium, afin de ne pas provoquer la dispersion des colloïdes du sol. Le chlore a été dosé par potentiométrie, à l'aide de nitrate d'argent, sur la suspension obtenue en jetant la terre dans l'eau (Annexe 9).

Au cours de l'expérience trois tubes ont été utilisés :

- un tube témoin plein de terre humide ;
- un tube d'essai avec l'élément rigide ;
- un tube avec élément rigide pour évaluer la diffusion du marqueur en l'absence de mouvement de l'eau.

Les deux premiers tubes, dont le sable avait la même humidité pondérale (22,8 p. 100), ont été soumis à l'absorption par le silicagel pendant 6 heures.

Le dernier tube, identique au tube d'essai, a été bouché hermétiquement pour supprimer tout mouvement d'eau. La teneur en chlore dans le sable a été mesurée au bout de 6 heures également. La quantité de chlore qui se déplace par diffusion est proportionnelle à la surface de section à travers laquelle les ions diffusent, ici la fraction de la surface de section du sable occupée par l'eau, fraction plus grande que dans le tube d'essai, duquel on extrait de l'eau. De ce fait, les quantités de chlore qui ont diffusé dans le dernier tube constituent une limite supérieure des quantités qu'on aurait obtenues si on avait pu y réaliser les mêmes humidités que dans le tube d'essai, sans provoquer de mouvement en masse de l'eau.

2. 12. Résultats.

Une expérience a été réalisée avec un massif de billes de verre de diamètre compris entre 50 et 63 μ : la quantité d'eau cédée par les billes de verre a été quasi nulle. Il est vraisemblable que ce résultat est dû au fait que la succion de l'eau dans le massif est beaucoup trop élevée par rapport à la succion à laquelle était soumise l'eau du sable humide.

Une autre expérience a été réalisée en utilisant un prisme constitué de billes de plus grand diamètre (200-225 μ). Celui-ci a cédé 92,3 p. 100 de son eau et on a retrouvé du chlore jusqu'à l'extrémité de l'échantillon de sol, long de 4 cm dans cet essai ; la concentration en chlore s'élève brutalement au voisinage du silicagel (fig. 5), ce qui indique une perte d'eau par évaporation au voisinage du contact silicagel-sable.

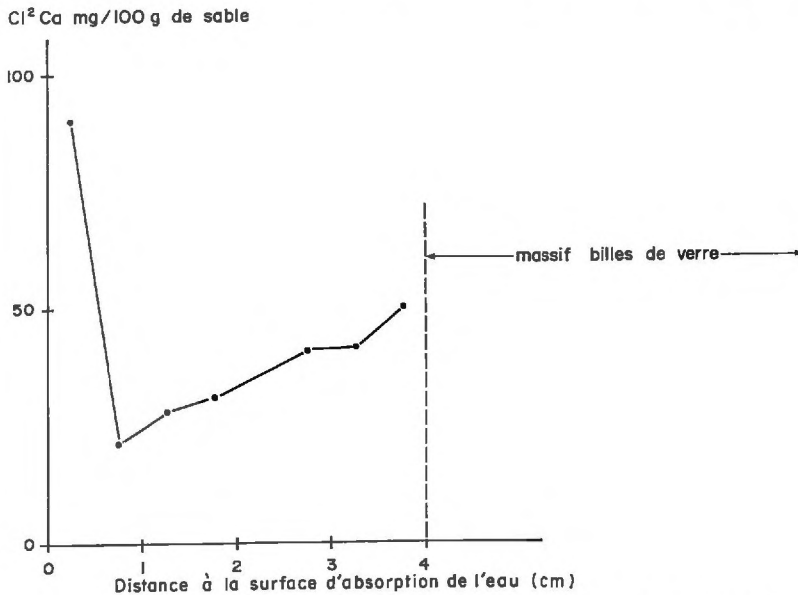


FIG. 5. — Transfert d'eau sous forme liquide d'un massif de billes de verre au sable
Teneur en chlore de la terre pour le tube d'essai, épaisseur de sable : 4 cm.

L'expérience a été recommencée en portant la longueur de l'échantillon de sable à 6 cm, de façon que l'eau salée provenant du massif de billes de verre ne parvienne pas jusqu'à extrémité du tube soumise à l'extraction d'eau ; on pouvait ainsi évaluer la longueur du trajet parcouru dans le sable par l'eau salée venue de l'élément rigide.

Ce sont les résultats de cette expérience qui sont représentés sur la figure 6. Le fait important est qu'on retrouve du chlore dans le sable jusqu'à 5,5 cm de la paroi du massif de billes de verre, distance de beaucoup supérieure à celle obtenue avec le témoin sans ressuyage : 2,5 cm, évaluation par excès de la distance parcourue par le chlore du seul fait de la diffusion. Ceci montre sans ambiguïté que le massif de billes de verre cède de l'eau sous forme liquide à un sable en cours de dessèchement, la perte d'eau du massif poreux étant de 92,4 p. 100 de sa teneur au début de l'expérience.

Les profils hydriques dans le sable sont assez semblables en l'absence ou en présence d'un massif de billes de verre, ce qui est à première vue assez surprenant.

Il est vraisemblable que la présence du massif de billes de verre modifie la dynamique du transfert d'eau du sable et que, dans ces conditions, la seule comparaison de profils hydriques à un même moment est insuffisante pour comprendre le processus mis en jeu.

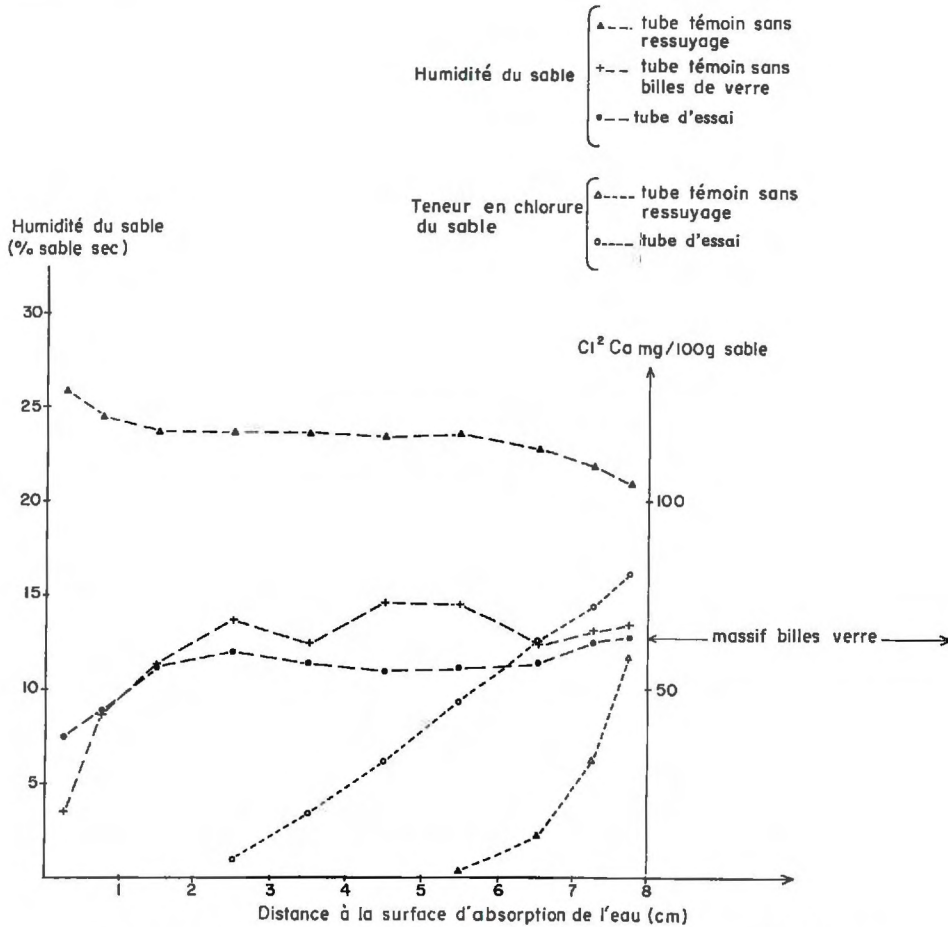


FIG. 6. — Transfert d'eau sous forme liquide d'un massif de billes de verre au sable : profils hydriques et teneurs en chlore du tube d'essai et du tube témoin, épaisseur de sable : 8 cm.

2. 2. — Quantité d'eau transférée et nature des matériaux grossiers et de la terre

Cette étude a été conduite sur quatre matériaux : craie, pierre ponce, verre mousse et brique, en utilisant deux sols : le sable de Fontenay et le sable de Fontainebleau, plus grossier que le précédent, décrits dans la section 5. 11. de la deuxième partie.

Les expériences ont été réalisées en ressuyant le sol à l'aide de pressions pneumatiques relativement basses : $3\,000\text{ g/cm}^2$ au maximum, et d'une pression élevée : $16\,000\text{ g/cm}^2$, dans un appareil à plaque ou à membrane (fig. 7). Comme, pour des raisons de résistances mécaniques, l'enceinte à haute pression est plus petite que l'enceinte à basse pression, on a utilisé des échantillons de dimensions différentes : des prismes à base carrée de dimensions $5 \times 5 \times 2\text{ cm}$ pour le ressuyage basse pression et des cylindres plats (diamètre : 28 mm , hauteur : 6 mm) pour le ressuyage haute pression. Comme les dimensions des éléments sont différentes, on ne peut comparer les résultats obtenus dans les expériences à basse et à haute pressions.

Nous n'avons pas utilisé de marqueur, car compte tenu de la durée des expériences (plusieurs jours), l'importance de la diffusion du marqueur aurait rendu les comparaisons avec le témoin quasi impossibles.

2. 2I. Les expériences à basse pression.

Les échantillons préalablement humectés sous vide ont été disposés dans du sable saturé d'eau placé dans des cylindres reposant sur la plaque poreuse ; l'ensemble a été laissé dans l'eau pendant une nuit. Ensuite, on a ressuyé le sable jusqu'à obtention de l'équilibre, ce qui a demandé 30 jours.

2. 2II. Enrobage avec le sable de Fontenay.

Les résultats sont exprimés en rapportant l'humidité après ressuyage à l'humidité au début de l'expérience. Ils sont présentés sur la figure 8 pour cinq pressions de ressuyage.

La craie ne cède de l'eau de façon appréciable qu'à une pression supérieure à $2\,000\text{ g/cm}^2$, et à $3\,000\text{ g/cm}^2$ il reste encore 88 p. 100 de l'eau existant initialement.

La brique ne cède pas d'eau aux faibles pressions, mais conserve seulement 10 p. 100 environ de son humidité initiale à $3\,000\text{ g/cm}^2$.

La pierre ponce commence à libérer de l'eau à des pressions supérieures à 100 g/cm^2 .

Les différentes formes de courbe humidité-pression de ressuyage s'interprètent en comparant les succions exercées sur l'eau de l'élément grossier par ses propres pores et les pores du sable.

Le verre mousse cède presque 20 p. 100 de son eau initiale à une pression de 100 g/cm^2 .

Les pores du sable n'exercent une succion qu'une fois qu'ils sont vides ; lorsqu'on augmente la pression appliquée, ce sont d'abord les gros pores du sable qui se vident, parce que l'eau y est moins fortement retenue, puis ceux qui sont un peu plus petits, et ainsi de suite. L'élément grossier cédera de l'eau lorsqu'elle y sera retenue par une succion inférieure à celle exercée par les pores du sable. Les courbes de répartition des rayons équivalents des pores des éléments grossiers ⁽¹⁾ permettent de retrouver les principaux traits des courbes humidité-pression : la craie ayant des pores très fins ne cède de l'eau qu'à des pressions assez élevées ; la brique, qui a des pores plus larges que ceux de la craie, cède de l'eau plus facilement, mais comme le rayon minimum des pores est beaucoup plus grand que pour la craie, la quantité d'eau restant à la pression de $3\,000\text{ g/cm}^2$ est très faible ; les deux autres matériaux

(1) Fig. 4, de la première partie.

ont des courbes humidité-pression parallèles, comme le sont leurs courbes de répartition des diamètres équivalents ; on s'explique cependant mal la différence de comportement entre la pierre ponce et le verre mousse, alors que le rayon maximum des

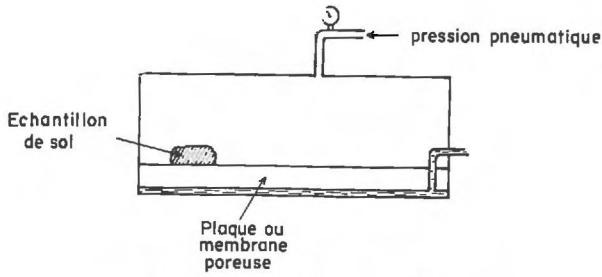


FIG. 7. — Appareil à plaque ou à membrane

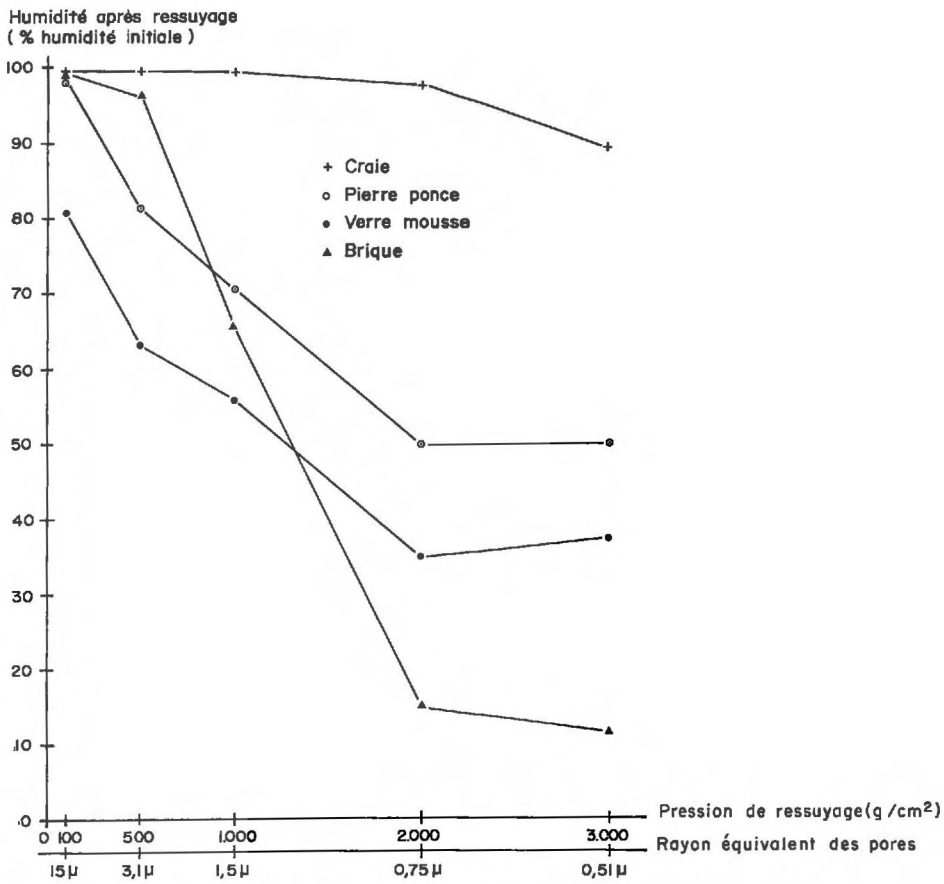


FIG. 8. — Dessèchement d'éléments grossiers placés dans du sable humide ressuyé à des pressions différentes

pores est du même ordre de grandeur ; cette différence tient probablement à ce que les pores plus petits mettant en communication les gros pores ont des diamètres différents dans les deux matériaux (cf. première partie).

2. 212. *Enrobage avec le sable de Fontainebleau.*

L'expérience a été réalisée à une seule pression : $3\ 000\text{ g/cm}^2$.

La quantité d'eau cédée est nulle pour tous les échantillons, sauf la pierre ponce, de laquelle 11 p. 100 seulement de l'eau initiale a été extraite.

Il y a donc une influence très importante de la texture du matériau d'enrobage sur l'aptitude des éléments grossiers à lui céder de l'eau.

Globalement, on peut interpréter les différences entre les quantités d'eau cédées par le fait que le sable de Fontainebleau étant plus grossier que le sable de Fontenay, exerce, une fois desséché, une succion moins forte sur l'eau contenue dans l'élément grossier. Dans le cas de l'enrobage avec le sable de Fontainebleau, il reste cependant à expliquer que, quoique le verre mousse et la pierre ponce aient des dimensions maxima des pores du même ordre de grandeur, seule la pierre ponce cède de l'eau.

Le fait que, pour le sable de Fontainebleau, la perte d'eau des éléments poreux rigides soit quasi nulle renforce l'opinion selon laquelle il y a cession d'eau sous forme liquide des éléments au sable de Fontenay. Si la perte d'eau des éléments placés dans le sable de Fontenay provenait uniquement de l'évaporation, on conçoit difficilement que celle-ci ne se produise pas aussi dans le sable de Fontainebleau. En effet, compte tenu de sa granulométrie, les pores dans lesquels diffuserait la vapeur d'eau y sont plus larges que pour l'autre sable.

2. 22. *Les expériences à haute pression.*

Les matériaux grossiers préalablement façonnés en forme de cylindres plats ont été saturés d'eau sous vide, puis placés dans des anneaux contenant du sable saturé, comme l'indique la figure 9. Les anneaux étaient posés sur une membrane poreuse dans une enceinte où la pression pneumatique de 16 kg/cm^2 a été appliquée.

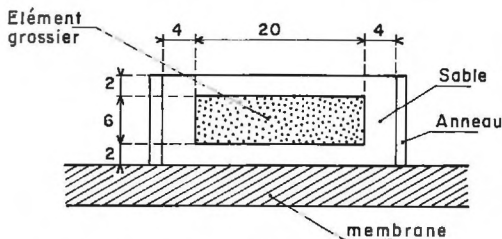


FIG. 9. — Coupe du dispositif de ressuyage dans l'appareil à membrane

Cette valeur de 16 kg/cm^2 a été retenue parce que, en ressuyant les sols saturés sous cette pression, on les amène à l'humidité correspondant approximativement au point de flétrissement.

Pour comparer l'effet de la nature de la terre, on a placé pour chaque matériau

grossier un fragment dans du sable de Fontenay et un autre dans du sable de Fontainebleau. Les ressuyages ont été réalisés au cours de la même expérience qui a duré 2 jours.

TABLEAU 2
Humidité après ressuyage. P. 100 d'humidité à saturation

	Brique	Craie	Pierre ponce
Sable de Fontainebleau	100	100	81,7
Sable de Fontenay	4,9	3,5	31,6

Les résultats du tableau 2 montrent une grande analogie avec ce qui a été obtenu pour les expériences à basse pression : les éléments grossiers perdent de l'eau lorsqu'ils sont enrobés dans le sable de Fontenay, alors que dans le sable de Fontainebleau, la perte est nulle.

2. 3. — *L'influence de la texture du matériau d'enrobage sur le transfert d'eau de l'élément grossier au sol*

Les expériences précédentes montrent que, pour un intervalle de dessiccation du sol correspondant à des succions extrêmes de 100 g/cm² et 16 000 g/cm², la texture du sol intervient sur la quantité d'eau cédée par les éléments grossiers, cette quantité étant nulle pour le sable à texture la plus grossière. Nous allons préciser cet effet de la texture du matériau d'enrobage au moyen de deux expériences.

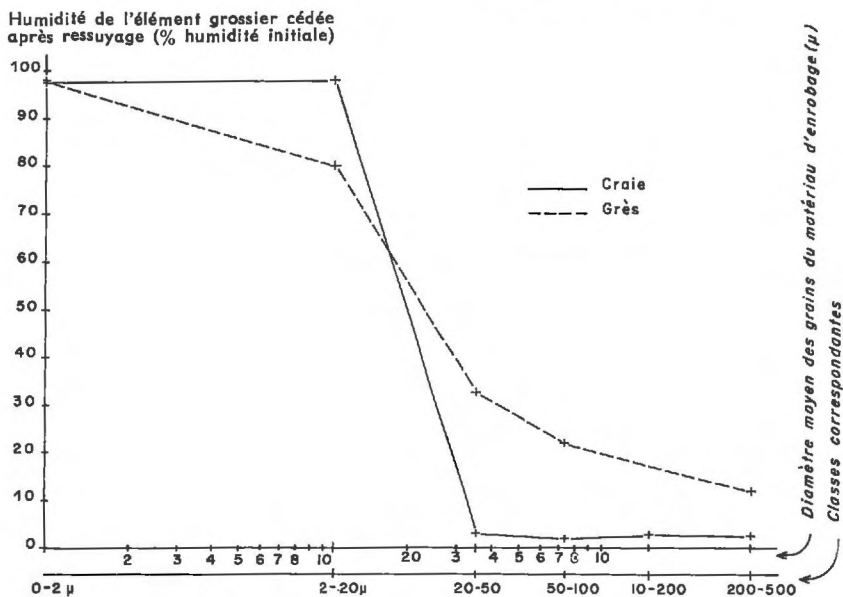


FIG. 10. — *Influence de la texture du matériau d'enrobage sur la cession d'eau Grès et craie. Ressuyage sous une pression de 16 kg/cm²*

L'une d'elles consiste à ressuyer dans un appareil à membrane, sous 16 kg/cm² de pression, des fragments de craie placés dans trois terres différentes : un sable de Fontainebleau, un limon (16 p. 100 d'argile, 19 p. 100 de limon 2-20 μ) et une terre argileuse (46 p. 100 d'argile). Les quantités d'eau cédées par la craie sont nulles pour le sable de Fontainebleau, importantes et du même ordre de grandeur pour les autres terres (GRAS *et al.*, 1963).

L'autre expérience (GRAS *et al.*, 1962) a permis de mieux analyser l'effet de la dimension des particules de la terre. A cet effet, on a utilisé des matériaux meubles constitués de fractions extraites du sol : 0-2 μ , 2-20 μ , 20-50 μ , 50-100 μ , 100-200 μ et 200-500 μ . Les matériaux grossiers étaient de la craie et un grès, le ressuyage se faisait sous 16 kg/cm² de pression. Pour la craie, le transfert d'eau est négligeable lorsque le diamètre des particules est supérieur à 20 μ . Pour le grès, la quantité d'eau cédée diminue plus progressivement lorsque la taille moyenne des grains des fractions augmente (fig. 10). La cession d'eau d'un élément grossier à la terre dépend donc bien de sa texture.

Il est important de noter que le sable de Fontenay, auquel tous les éléments grossiers cèdent de l'eau, est pauvre en fractions fines : 0-2 μ = 5 p. 100, 2-20 μ = 0,9 p. 100, 20-50 μ = 1,1 p. 100. On peut donc penser que pour que les sols puissent recevoir de l'eau des éléments grossiers, il suffit qu'ils possèdent quelques éléments fins, ayant une force de succion suffisante.

III. — INFLUENCE DES ÉLÉMENTS GROSSIERS SUR LA QUANTITÉ D'EAU EMMAGASINÉE PAR LE SOL

Dans la 2^e partie, on a vu que, pour le calcul de l'humidité volumique d'un sol contenant des éléments grossiers inertes, on utilise la densité apparente partielle de terre fine (d_{ap}) ; la quantité d'eau exprimée en lame d'eau équivalente (mm), retenue dans une couche de sol d'épaisseur h (dm) amenée à l'humidité H_1 , est U (mm) = $d_{ap} \cdot h$ (dm) $\cdot H_1$ (p. 100 de poids sec). Rappelons aussi que, lorsque les éléments grossiers absorbent de l'eau, U s'exprime de cette façon :

$$U = d_{ap} \cdot h \cdot H_1 + d_{cp} \cdot h \cdot H_c,$$

H_c étant l'humidité des éléments grossiers et d_{cp} la densité apparente partielle de cailloux.

Évaluons la quantité d'eau disponible pour la végétation dans une épaisseur de sol h exploitée par les racines des végétaux⁽¹⁾, le sol étant à la capacité au champ. Lorsque l'humidité du sol passe de la capacité au champ H_1 au point de flétrissement H_2 , l'épaisseur h de sol cède la quantité d'eau $d_{ap} \cdot h \cdot (H_1 - H_2)$. Les éléments grossiers cèdent à la plante par l'intermédiaire du sol une certaine quantité d'eau, lorsque ce dernier se dessèche de la capacité au champ au point de flétrissement. On ne peut parler de capacité au champ et de point de flétrissement pour les éléments grossiers, puisque la nature du sol intervient sur l'équilibre d'humidité qui s'établit entre l'élément grossier et le sol. On mesure donc l'humidité existant dans le caillou lorsqu'il y a équilibre hydrique entre lui et la terre amenée à la capacité

(1) On admet que les racines ne retirent pas directement l'eau des cailloux.

au champ, et de même l'humidité du caillou en équilibre d'humidité avec la terre au point de flétrissement. Ces deux humidités du caillou sont caractéristiques du couple caillou-matériau d'enrobage ; leur différence H_{cu} est la contribution des cailloux à l'alimentation de la plante lorsque celle-ci dessèche la terre fine de la capacité au champ au point de flétrissement. On a donc :

$$U \text{ (mm)} = (d_{ap} \cdot (H_1 - H_2) + d_{ep} \cdot H_{cu}) h.$$

Nous allons maintenant donner quelques ordres de grandeur de la contribution des éléments grossiers à l'alimentation en eau des végétaux (GRAS *et al.*, 1963) :

— sol sablo-caillouteux des terrasses de la vallée du Rhône, épais de 50 cm, comprenant 43 p. 100 de cailloux en poids :

terre fine	$d_{ap} = 1,0$	$H_1 - H_2 = 9$	
cailloux	$d_{ep} = 0,7$	$H_{cu} = 8$	
Contribution	{	terre fine : $1,0 \times 5 \times 9$	= 45 mm
		cailloux : $0,7 \times 5 \times 8$	= 28 mm
		Total	= 73 mm

— sol sableux sur schiste : les cailloux sont des fragments de schiste altéré, profondeur 70 cm.

	$d_{ap} = 1,1$	$H_1 - H_2 = 9,5$	
	$d_{ep} = 1,0$	$H_{cu} = 4,2$	
Contribution	{	terre fine : $1,1 \times 7 \times 9,5$	= 73 mm
		cailloux : $1,0 \times 7 \times 4,2$	= 29 mm
		Total	= 102 mm

— sol limoneux sur craie, épais de 40 cm

	$d_{ap} = 1,3$	$H_1 - H_2 = 13,3$	
	$d_{ep} = 0,40$	$H_{cu} = 25,0$	
Contribution	{	terre fine : $1,3 \times 4 \times 13,3$	= 69 mm
		cailloux : $0,4 \times 4 \times 25$	= 40 mm
			= 109 mm

Dans ces deux derniers cas, on ne tient pas compte de l'eau fournie par la couche superficielle du substratum crayeux, ou de l'horizon de départ constitué de schiste altéré.

Il faut remarquer que l'eau des cailloux ne passe dans le sol que lorsqu'il est parvenu à un certain stade de dessèchement. Par exemple, la craie ne cède de l'eau au sable qu'une fois que celui-ci a été fortement desséché. Ceci a des conséquences différentes suivant les situations. En présence des seules précipitations, la craie contribue à l'alimentation en eau des plantes spontanées ou cultivées et constitue même un facteur de résistance à la sécheresse, puisque son eau est cédée progressivement. Par contre, dans le cas d'une agriculture intensive où l'on irrigue avant que le sol soit suffisamment sec pour extraire de l'eau de la craie, celle-ci se comportera comme un lest inerte.

IV. — CONCLUSION

L'emploi d'un marqueur a permis de montrer qu'en conditions isothermes, l'eau passe sous forme liquide d'un élément rigide poreux au sable en voie de dessèchement. Il est vraisemblable que la plus grande partie des transferts d'eau des éléments grossiers à la terre se font sous cette forme en conditions naturelles. Ceci n'exclut pas le transfert en phase vapeur dans les conditions non isothermes.

Le transfert d'eau peut se décrire ainsi : lorsque le sol se dessèche, ses pores les plus larges se vident les premiers, le dessèchement affectant par la suite des pores de plus en plus fins. Lorsque les pores de la terre ainsi vidés ont un diamètre équivalent suffisamment petit pour exercer une succion supérieure à celle qui retient l'eau dans le corps rigide, cette dernière se déplace vers la terre.

Ceci met en évidence l'importance des diamètres des pores de la terre et de l'élément rigide. Si la terre a une texture trop grossière, le transfert d'eau est nul. La terre doit donc contenir une certaine quantité de matériaux fins pour que ce transfert soit possible ; dans ce dernier cas, plus les pores de l'élément grossier seront étroits, plus la terre devra être desséchée, de façon que ses pores fins se vident et puissent alors extraire de l'eau de l'élément.

La quantité d'eau cédée par l'élément grossier à la terre fine dépend du couple terre fine élément grossier.

CONCLUSION GÉNÉRALE (1)

Un sable contenant des cailloux est un système hétérogène constitué de deux fractions, la terre fine et les cailloux ou éléments grossiers. Les propriétés hydriques d'un tel sol dépendent de la proportion des deux matériaux, de leurs propriétés et de leurs interrelations.

La porosité ouverte des éléments grossiers se remplit plus ou moins d'eau, même lorsqu'on opère avec précaution à la pression atmosphérique ; une fois l'équilibre atteint, la fraction de la porosité ouverte occupée par l'air est caractéristique de chaque matériau. Une régression positive existe entre la fraction de porosité ouverte occupée par l'air et le rayon maximum des pores pour l'ensemble des matériaux. Une étude des mécanismes d'emprisonnement d'air a révélé que le rayon maximum des pores n'intervient pas directement, mais en tant qu'indice de l'irrégularité de l'espace poral de chaque matériau, irrégularité favorisant l'emprisonnement d'air.

La dynamique de l'eau dans les cailloux poreux placés dans le sable concerne leur humectation par l'intermédiaire du sable et leur dessèchement au profit du sable.

Dans la phase d'humectation, une fois l'équilibre atteint, on constate que la fraction de la porosité ouverte des cailloux occupée par l'eau est très variable selon

(1) Pour les parties I, II et III.

leur nature. La plus ou moins grande propension des matériaux à l'emprisonnement d'air explique une partie de ces différences. Mais la plus grande partie de ces différences s'explique par les succions exercées sur l'eau par les pores du sable et par ceux de l'élément grossier, l'eau se déplaçant vers le milieu où la succion est la plus élevée : les matériaux étudiés ici dont la mouillabilité varie peu, se remplissent donc d'autant plus complètement aux dépens du sable que leurs pores sont plus étroits.

Le passage de l'eau sous forme liquide du caillou au sable est aussi sous la dépendance des succions exercées par le sable et l'élément grossier. Le transfert d'eau se produit chaque fois que se sont vidés des pores du sol suffisamment fins pour exercer sur l'eau de l'élément grossier une succion supérieure à celle qui l'y retient. La quantité d'eau ainsi cédée par l'élément n'est pas caractéristique de l'élément, mais du couple terre fine-élément grossier.

La présence au sein du sable d'un élément grossier modifie la cinétique du front humide qui se déplace dans le sable initialement sec. Les éléments grossiers poreux qui s'humectent au détriment du sable sont qualifiés d'actifs. Par contre, ceux qui n'absorbent pas d'eau parce que leurs succions sont insuffisantes ou qu'ils ne sont pas poreux sont appelés inactifs.

Examinons d'abord les modifications apportées à la cinétique du front humide lorsqu'il passe au niveau de l'élément. Les matériaux inactifs provoquent une augmentation de vitesse du front humide en réduisant le volume de sable à humecter. Les éléments actifs tendent d'une part à augmenter la vitesse du front humide comme ci-dessus, d'autre part à la diminuer en consommant de l'eau qui n'est plus disponible pour humecter le sable. Les valeurs relatives de ces effets de sens opposé déterminent le sens de la variation de vitesse, du moins dans les cas simples.

Une fois que le front humide est au-delà de l'élément, on constate deux types de changements : la vitesse du front humide diminue ou reprend la valeur qu'elle avait avant que le front ne soit parvenu à l'élément. On a l'un ou l'autre de ces comportements suivant le mode d'alimentation en eau du système.

Toutes les conclusions précédentes sont valables dans les cas où les éléments grossiers ne modifient pas la porosité du sable à leur voisinage. Les difficultés rencontrées pour réaliser cette condition dans nos expériences suggèrent que dans la nature les cailloux peuvent modifier les propriétés de la terre à leur voisinage.

Reçu pour publication en novembre 1971.

REMERCIEMENTS

C'est à M. le Doyen MILLOT, directeur du Centre de Sédimentologie et de Géologie de surface du C. N. R. S., que je dois de pouvoir soutenir cette thèse à la Faculté des Sciences de Strasbourg. Il a bien voulu, malgré ses lourdes charges, présider le jury de ma thèse. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance.

Je remercie M. le Professeur WEY de l'École supérieure de Chimie de Mulhouse qui a accepté d'examiner cette thèse.

Ce travail a été réalisé à l'Institut national de la Recherche agronomique. Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à M. BUSTARRET, directeur général de cet organisme et à M. DROUINEAU, inspecteur général qui m'ont permis d'entreprendre ces recherches.

M. le Professeur HÉNIN, chef du Département d'Agronomie de l'I. N. R. A., a assuré ma formation tant dans le domaine scientifique que dans celui de la recherche, d'abord à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer, puis au Laboratoire des Sols où il m'a accueilli.

C'est lui qui est à l'origine de ce travail, qu'il a ensuite orienté et enrichi au cours de fréquents échanges de vue. Il a bien voulu accepter d'être le rapporteur de ma thèse. Je suis heureux de le remercier pour tout cela et pour ses précieux encouragements.

M. BÉTRÉMIEUX, directeur du Laboratoire des sols de l'I. N. R. A. m'a apporté son appui efficace pour la réalisation de cette recherche, qu'il en soit remercié.

Je tiens à remercier les enseignants de l'Institut de Géologie de la Faculté des Sciences de Strasbourg et en particulier M. DUNOYER de SEGONZAC qui m'a accueilli avec beaucoup de gentillesse et m'a aidé efficacement au cours des diverses étapes de la réalisation de ce travail.

Je n'aurai garde d'oublier mes collègues du Laboratoire des Sols pour leur aide directe ou indirecte. Je dois une mention toute particulière à L. TURC, dont la maîtrise de la physique et le jugement critique m'ont été particulièrement précieux.

J. OUDARD a dû mettre au point, puis réaliser une grande partie des nombreuses expériences. Il s'est acquitté de cette tâche avec beaucoup de conscience. Je tiens à le remercier tout particulièrement de sa contribution à cette recherche.

C'est avec plaisir que je remercie le Bureau de dessin et le Secrétariat qui ont contribué à une meilleure présentation de ce texte.

SUMMARY

EFFECTS OF THE COARSE CONSTITUENTS

ON THE DYNAMICS OF WATER IN A SANDY SOIL,

III. — DYNAMICS OF WATER IN A FINE-EARTH/COARSE CONSTITUENTS SYSTEM

A previously moistened fine-earth/coarse-constituents system is subjected to desiccation. When the coarse constituents are not porous, they merely alter the movements of water within the sand.

If the coarse constituents are porous, they yield water in liquid form to the sand when the latter has dried sufficiently so that the fine pores may be filled with water at the expense of the coarse constituents.

The amount of water thus transferred from the coarse constituents to the fine earth depends on the body force of the coarse-constituents/fine-earth system and on the moisture of the fine earth.

ZUSAMMENFASSUNG

EINWIRKUNGEN DER GROBEN BESTANDTEILE AUF DIE BEWEGUNG

DES IN SANDIGEM BODEN ENTHALTENE WASSERS

III. — DYNAMIK DES WASSERS IN EINER MISCHUNG VON FEINERDE

UND GROBEN BESTANDTEILEN

SCHWANKUNGEN BEI RÜCKGANG DER FEUCHTIGKEIT

Eine angefeuchtete Verbindung aus Feinerde und groben Bestandteilen wird der Austrocknung unterworfen.

Wenn die groben Bestandteile nicht porös sind, so beeinflussen die lediglich das Sicheschieben des Wassers in dem Sand.

Enthalten die groben Bestandteile aber Poren, so treten sie Wasserflüssigkeit an den Sand ab, wenn dieser so weit ausgetrocknet ist, dass die feinen Poren sich auf Kosten der groben Bestandteile mit Wasser auffüllen können.

Die Menge des so aus den groben Bestandteilen in die Feinerde übergehenden Wassers hängt von der Mischung der groben Bestandteile und der Feinerde sowie von dem Feuchtigkeitsgehalt der Feinerde ab.

РЕЗЮМЕ

Действие крупных элементов на динамику влаги в песчаной почве.

III. Динамика влаги в системе мелкая почва — крупные элементы.

Р. ГРА.

Предварительно увлажненная система мелкая почва — крупные элементы была подвержена сушке.

В тех случаях когда крупные элементы не пористы, они изменяют только передвижение влаги в песке.

В случаях пористости — они уступают влагу в форме жидкости, песку, когда этот последний достаточно сух, чтобы поры могли заполняться водой за счет крупного элемента.

Количество влаги, переходящее таким образом от крупных элементов к мелкой почве, зависит от пары крупные элементы — мелкая почва, и от влажности мелкой почвы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GRAS R., MONNIER G., 1962. Contribution des cailloux à la capacité de réserve en eau du sol. *C. R. Acad. Sc.*, **254**, 3422-3424.
- GRAS R., MONNIER G., 1963. Contribution de certains éléments grossiers du sol à l'alimentation en eau des végétaux. *Sci. Sol*, **1**, 13-20.
- HALLAIRE M., HÉNIN S., 1958. Sur la non validité de l'équation de conductivité pour exprimer le mouvement de l'eau non saturante dans le sol. *C. R. Acad. Sc.*, **246**, 1720-1722.
- PUECH J., 1966. Modalités de la dessiccation des sols par le gel de silice. *C. R. Acad. Sc.*, **263**, 645-648.
- PUECH J., 1969. Étude expérimentale de la circulation de l'eau non saturante de différents sols vers une zone d'absorption. *Ann. agron.*, **20** (3), 245-261.

ANNEXE I

MESURE DE LA DENSITÉ RÉELLE

Elle nécessite la connaissance du poids d'un volume réel connu de matériau.

Le poids se mesure avec toute la précision désirable à l'aide d'une balance. La mesure du volume réel présente plus de difficultés ; elle peut se faire avec le pycnomètre à eau ou le pycnomètre à air.

Quelle que soit la méthode utilisée, il faut broyer finement l'échantillon, afin de ne pas compter comme volume de matériau, le volume de pores inaccessibles, qui peuvent éventuellement exister. Pour contrôler que les particules sont suffisamment fines, on vérifie qu'un broyage supplémentaire n'augmente pas la valeur de la densité ainsi mesurée.

A. — Mesure de la densité réelle avec le pycnomètre à eau

Ce pycnomètre est un flacon qui se ferme avec un bouchon rodé surmonté d'un capillaire portant un trait de repère.

Connaissant les poids :

- A = pycnomètre vide
- B = pycnomètre + eau
- C = pycnomètre + matériau
- D = pycnomètre + matériau + eau

on a :

volume du pycnomètre = B — A

volume occupé par l'eau lorsque le pycnomètre contient le matériau = D — C

volume du matériau = (B — A) — (D — C)

poids de matériau = C — A

La densité réelle d_r est donnée par

$$d_r = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$$

L'erreur maxima calculée en tenant compte uniquement des erreurs de pesée est très faible. En fait, cette erreur est souvent dépassée à cause de difficultés de réalisation, ou de précautions qui ne sont pas toujours prises.

L'emploi de pycnomètre en pyrex évite les variations de capacité du pycnomètre à la suite de variations importantes de température.

Il faut utiliser une eau qui soit à la même température pour mesurer le volume du pycnomètre, puis le volume du matériau. Sinon, on commet des erreurs appréciables. Il est commode d'ajuster la température de l'eau à une valeur proche de celle du milieu ambiant.

Une cause importante d'erreur provient du fait qu'au moment du remplissage du pycnomètre contenant le matériau, on risque d'emprisonner des bulles d'air. Pour limiter ce risque, on peut opérer de la façon suivante : le pycnomètre contenant le matériau broyé est placé dans une enceinte où l'on fait le vide pendant quelques heures. On remplit ensuite le pycnomètre sous vide dans l'enceinte avec de l'eau bouillie. Comme il peut rester encore quelques bulles d'air, on facilitera leur expulsion, en soumettant le pycnomètre à des variations de température de 10°C environ d'amplitude et en le mettant à nouveau dans une enceinte à vide pendant plusieurs heures.

Au moment de la pesée, les parois extérieures doivent être parfaitement sèches. Pour éviter la formation d'une bulle d'air on remplit souvent le pycnomètre de cette façon : le bouchon rodé est placé sur le corps du pycnomètre plein d'eau. Mais il se forme alors un ménisque à la partie supérieure du col rodé entre les parties mâle et femelle. Ce supplément de poids n'est pas constant une pesée à l'autre notamment puisque cette eau s'évapore (quantité évaporée de l'ordre de 0,1 mg en 1 minute) ; il affecte d'autre part différemment le numérateur et le dénominateur de l'expression de « d_r ». Il faut donc soigneusement essuyer l'eau de ce ménisque ou, mieux, remplir le pycnomètre avec une seringue hypodermique dont on introduit l'aiguille dans le tube capillaire du col rodé.

La reproductibilité d'une mesure, distincte de la précision, traduit l'influence de phénomènes aléatoires et de la variabilité propre au matériau sur la valeur de la mesure. La vraie valeur a une certaine probabilité de se trouver dans l'intervalle $\bar{a}_r \pm ts$, \bar{a}_r étant la moyenne des mesures, s leur écart type et t le coefficient de Fisher. Par exemple, pour un matériau ayant une densité moyenne de $3,02 ts = 0,059\ 100 ts/\bar{a}_r = 1,9$ p. 100 — seuil 5 p. 100.

B. — *Mesure de la densité réelle
avec le pycnomètre à air à comparaison de volumes*

Le principe consiste à mesurer le volume d'air occupé par l'échantillon, on est donc assuré que le fluide servant à la mesure pénètre bien dans les pores ouverts, ce qui n'est pas toujours le cas pour le pycnomètre à eau.

L'appareil (fig. A 1) comprend deux corps de pompe identiques, l'un P_1 dit de référence, l'autre P_2 dit de mesure destiné à recevoir l'échantillon de matériau. Ces corps de pompe peuvent être mis en communication avec l'atmosphère par un robinet R (position R_1), ou isolés l'un de l'autre et de l'atmosphère (position R_2). Un manomètre différentiel permet de vérifier l'identité des pressions dans les deux corps de pompe.

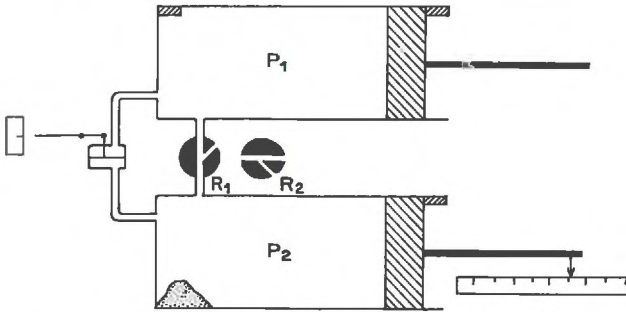


FIG. A 1. — Schéma de principe d'un pycnomètre à air

La mesure comprend deux opérations successives :

— les pistons étant tous deux contre leurs butées droites et le cylindre de mesure ne contenant pas d'échantillon, on laisse les cylindres s'emplir d'air à la pression atmosphérique (position R_1 du robinet). On met ensuite le robinet dans la position R_2 . On déplace les pistons vers la gauche, en vérifiant que les pressions sont égales au moyen du manomètre différentiel. Lorsque le piston de P_1 est arrêté par la butée gauche, le piston de P_2 a une position à laquelle on attribue la valeur 0 (volume nul de l'échantillon).

— les pistons ayant été ramenés contre leurs butées droites, et l'échantillon étant placé dans le corps de pompe P_2 , les deux cylindres sont remplis d'air à la pression atmosphérique. On supprime la communication entre P_1 et P_2 et on comprime l'air à la même pression dans les deux cylindres, jusqu'à ce que le piston de P_1 parvienne contre sa butée gauche. La position du piston de P_2 est repérée par un nombre v proportionnel au volume réel de l'échantillon ;

La précision obtenue est d'abord reliée à l'étanchéité des pistons et des robinets et à la sensibilité du manomètre différentiel ; tout ceci dépend de la construction de l'appareil.

Les conditions définissant l'état de l'air doivent être identiques dans les deux corps de pompe : ceci implique qu'il n'y ait pas de différences entre les températures de l'air des deux cylindres, ni d'absorption d'eau par l'échantillon sur lequel on fait la mesure. Ceci implique que les parois des cylindres soient à la même température (se méfier des détonnes intempestives de l'air dans un seul corps de pompe). Les mesures de volume réel de corps hygroscopiques ne sont pas possibles, sauf en prenant des précautions particulières.

Comme un calcul d'erreur n'aurait pas grand sens, nous donnons seulement la valeur de la reproductibilité. On a fait 7 mesures de densité réelle en réalisant chaque fois une prise différente sur un échantillon de craie broyée. Au seuil 5 p. 100, on a : $ts = 0,138\ 100 ts/\bar{a}_r = 5,0$ p. 100. Cette erreur inclut la variabilité propre à la craie.

On a également vérifié pour un matériau, la craie, que les mesures obtenues au pycnomètre à eau et au pycnomètre à air étaient les mêmes.

La densité réelle s'obtient à partir d'un échantillon finement broyé. La densité pseudo-réelle n'existe que lorsqu'une fraction de la porosité ne communique pas avec l'extérieur : on utilise alors des fragments du matériau aussi grands que le permet l'enceinte de l'appareil.

ANNEXE 2

DÉPLACEMENT D'UN MÉNISQUE
DANS UN CAPILLAIRE CYLINDRIQUEA. — Influence de l'inclinaison du capillaire
sur la vitesse d'ascension du ménisque

Un tube capillaire incliné de λ sur l'horizontale affleure par son extrémité inférieure à un plan d'eau.

r = rayon du capillaire

A = tension superficielle de l'eau

x = abscisse du ménisque comptée positivement vers le haut sur l'axe du tube

t = temps

Δp = différence de pression entre le ménisque et le niveau de l'eau

n = viscosité

La loi de Poiseuille s'écrit :

$$dx/dt = (r^2/8n) (\Delta p/x)$$

$\Delta p = (2A/r - x \sin \lambda)$, en prenant τ pour masse volumique de l'eau.

$$dx/dt = (r^2/8n) \left(\frac{2A/r - x \sin \lambda}{x} \right)$$

$$dx/dt = (r^2/8n) \left(\frac{2A/r}{x} - \sin \lambda \right)$$

La vitesse diminue lorsque $\sin \lambda$ croît de 0 à 1, c'est-à-dire lorsque le tube passe de l'horizontale à la verticale.

$$\text{Pour } \lambda = \pi/2, \text{ tube vertical, } dx/dt = (r^2/8n) \left(\frac{2A/r}{x} - 1 \right)$$

$$\lambda = 0, \text{ tube horizontal } dx/dt = (r^2/8n) \frac{2A/r}{x}$$

Pour le tube horizontal la vitesse s'annule à l'infini ; lorsque le tube est incliné la vitesse s'annule lorsque le ménisque atteint la hauteur d'ascension capillaire : $x \sin \lambda = 2A/r$, c'est-à-dire lorsque les forces de tension superficielle sont égales au poids de la colonne d'eau.

En intégrant les équations différentielles précédentes on obtient la formule donnant x en fonction de t . Pour

$$0 < \lambda < \pi/2, dx/dt = (r^2/8n) \left(\frac{l \sin \lambda - x \sin \lambda}{x} \right)$$

en exprimant que la hauteur d'ascension capillaire maxima H est telle que $H = 2A/r = l \sin \lambda$.

$$dx/dt = (r^2 \sin \lambda/8n) \frac{(l-x)}{x} \frac{x dx}{(l-x)} = (r^2 \sin \lambda/8n) dt$$

comme :

$$\frac{x}{l-x} = \frac{x-l+l}{l-x} = \frac{-(l-x)+l}{l-x} = -1 + l/(l-x)$$

$$-dx + \frac{l dx}{(l-x)} = (r^2/8n) dt$$

$-x + l \text{ Log } (l-x) = (r^2/8n)(t + C)$. En écrivant que pour $t = 0$ $x = 0$, $l \text{ Log } l = (r^2/8n)C$.

Tout calcul fait :

$$x + l \operatorname{Log} (l - x/l) = - (r^2 \sin \lambda/8n) t.$$

On a fait les calculs avec $r = 0,01$ cm, $A = 75$ dyne/cm, $n = 0,01$ pour des valeurs de λ de 45° et 90° .

L'abscisse du ménisque dans le tube horizontal est donnée par l'intégration de :

$$dx/dt = (r^2/8n) \frac{2A/r}{x} \quad x = ((Ar/2n)t)^{\frac{1}{2}}$$

B. — *Influence du rayon d'un capillaire vertical sur la vitesse d'ascension du ménisque*

Comme les formules précédentes sont trop compliquées pour permettre une discussion algébrique, on a construit les courbes $x-t$ pour un capillaire de rayon $0,01$ cm et pour un autre de rayon $0,02$ cm. Les ménisques passent au même moment à la cote x_1 . Dans l'intervalle $0-x_1$, le ménisque dans le capillaire large est toujours plus élevé que dans le capillaire étroit.

ANNEXE 3

CORRECTION DE FILTRE COMPLEXE

La formule du filtre complexe ⁽¹⁾ donne $D = \frac{S(h+l')}{l_1/K_1 + l'/K'}$. En négligeant l'épaisseur de sable grossier l'on obtient : $D = K_{1s}Sh/l$ qui donne $K_{1s} = Dl/Sh$.

Faisons apparaître dans l'expression du filtre complexe le groupement Dl/Sh :

$$D = \frac{S(h+l')}{l_1/K_1 + l'/K'} = \frac{S h(1 + l'/h)}{(l/K_1)(1 + (K_1/K')(l'/l))}$$

$$K_1 = (Dl/Sh) \frac{1 + (K_1/K')(l'/l)}{1 + (l'/h)}$$

$$\text{Or } Dl/Sh = K_{1s}$$

$$K_1 = K_{1s} \frac{1 + (K_1/K')(l'/l)}{1 + (l'/h)}$$

$(K_1/K')(l'/l)$ et (l'/h) apparaissent comme termes correctifs.

Dans le terme correctif $(K_1/K')(l'/l)$ assimilons K_1 à K_{1s} , ce qui n'entraîne qu'une faible variation de la valeur de ce terme déjà petit :

$$K_1 = K_{1s} \frac{1 + (K_{1s}/K')(l'/l)}{1 + (l'/h)} = K_{1s} \frac{1 + \epsilon}{1 + \epsilon'}$$

Pour les tubes longs ($l = 48$ cm)

$$\epsilon = (0,07/15) (2/48) = 1,9 \cdot 10^{-4}$$

$$\epsilon' = (2/49) = 4 \cdot 10^{-2}$$

$$(1 + \epsilon)/(1 + \epsilon') = 0,961$$

$$K_1 = 0,96 K_{1s} \quad K_1/K_{1s} = 0,96 \quad 1 - K_1/K_{1s} = 1 - 0,96$$

$$(K_{1s} - K_1)/K_{1s} = 0,04$$

$\Delta K/K = 0,04$, erreur de l'ordre de grandeur de la précision sur K .

Pour les tubes courts ($l = 20$ cm)

$$\epsilon = (0,07/15) (3/20) = 7 \cdot 10^{-3}$$

$$\epsilon' = 3/21 = 0,15$$

$$(1 + \epsilon)/(1 + \epsilon') = 0,87$$

$\Delta K/K = 0,13$; le fait de négliger que le tube soit complexe introduit une erreur considérable.

Pour les mesures de perméabilité, traiter le filtre comme s'il était simple surestime de façon appréciable la valeur de la perméabilité mesurée, lorsque le rapport épaisseur de sable grossier/épaisseur de terre dont la perméabilité est à mesurer est trop grand.

(1) Figure 3, deuxième partie.

ANNEXE 4

PRÉCISION SUR LA MESURE DU COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ K

L'erreur relative maxima sur un produit F de facteurs est la somme des erreurs sur les différents facteurs de l'expression. Lorsque l'expression F est compliquée, il est commode d'en prendre la différentielle logarithmique $\log F = dF/F$, en transformant les signes — en signe +. Ceci revient à se placer dans le cas le plus défavorable où toutes les erreurs jouent dans le même sens, par exemple par excès.

Lorsque le nombre des termes d'une expression augmente, il est de moins en moins probable que les erreurs sur tous les termes soient dans le même sens. L'erreur relative moyenne est ainsi surestimée.

On pallie en partie cet inconvénient en prenant comme évaluation de dF/F la racine carrée de la somme des carrés des erreurs relatives sur chaque terme.

Nous ne nous sommes pas livrés à ce calcul. Les erreurs calculées seront donc des erreurs maxima qui ont une probabilité minime d'être dépassées, et non des erreurs moyennes.

$$\begin{aligned} K &= Dl/S\hbar & \log K &= \log D + \log l - \log S - \log \hbar \\ \Delta \log K &= \Delta K/K &= \Delta D/D + \Delta l/l + \Delta S/S + \Delta \hbar/\hbar \\ D &= Q/t & \Delta D/D &= \Delta Q/Q + \Delta t/t \\ Q &= 100 \text{ ml} & Q &= 0,1 \text{ ml} & \Delta Q/Q &= 0,001 \\ t &= 3\,600 \text{ s.} & t &= 1 \text{ s.} & \Delta t/t &= 0,0002 \\ & & \Delta D/D &= 0,001 \\ S &= (\pi/4) a^2 \quad (a = \text{diamètre}) \\ \Delta S &= (\pi/2) a \cdot \Delta a \\ \Delta S/S &= 2 \Delta a/a \end{aligned}$$

$$a = 5,4 \text{ cm} \quad \Delta a = 0,05 \text{ cm (mesure au pied à coulisse)} \quad \Delta S/S = 0,018$$

$$\text{L'erreur sur la longueur étant de } 0,1 \text{ cm } \Delta \hbar = \Delta l = 0,1$$

$$\text{Pour les tubes courts } \hbar = 21 \quad l = 20$$

$$\begin{aligned} \Delta \hbar/\hbar &= 0,004 \\ \Delta l/l &= 0,005 \end{aligned}$$

$$\text{Pour les tubes longs } \hbar = 49 \quad l = 48$$

$$\begin{aligned} \Delta \hbar/\hbar &= 0,002 \\ \Delta l/l &= 0,002 \end{aligned}$$

$$\Delta K/K = 2,8 \text{ p. } 100 \text{ pour les tubes courts.}$$

$$\Delta K/K = 2,3 \text{ p. } 100 \text{ pour les tubes longs.}$$

ANNEXE 5

PRÉCISION SUR LE CALCUL DU RAPPORT $(D_1/D_2)_c$
DANS LES EXPÉRIENCES AVEC LES ÉLÉMENTS NON POREUX
(cylindres de matériaux non poreux de grand diamètre)

$$(D/D_2)_c = \frac{S(l_1/S + l_2/(S-u) + l_3/S)}{l_1 + l_2 + l_3}$$

$$\log (D/D_2)_c = \log S + \log [l_1/S + l_2/(S-u) + l_3/S] - \log (l_1 + l_2 + l_3)$$

$$\Delta(D_1/D_2)/(D_1/D_2) = \Delta S/S + \Delta \frac{l_1/S + l_2/(S-u) + l_3/S}{l_1/S + l_2/(S-u) + l_3/S} + \frac{\Delta(l_1 + l_2 + l_3)}{l_1 + l_2 + l_3}$$

$$\Delta (l_1/S) = \Delta l_1/S + (\Delta S/S^2)l_1$$

$$\Delta (l_2/(S-u)) = \Delta l_2/(S-u) + \frac{(\Delta S + \Delta u)l_2}{(S-u)^2}$$

$$\Delta (l_3/S) = \Delta l_3/S + (\Delta S/S^2)l_3$$

$$\frac{\Delta (l_1/S + l_2/(S-u) + l_3/S)}{l_1/S + l_2/(S-u) + l_3/S} = \frac{(\Delta l_1 + \Delta l_3)/S + (l_1 + l_3) (\Delta S/S^2) + \Delta l_2(S-u) + l_2(\Delta S + \Delta u)/(S-u)}{l_1/S + l_2/(S-u) + l_3/S}$$

$$\frac{\Delta (l_1 + l_2 + l_3)}{l_1 + l_2 + l_3} = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3}{l_1 + l_2 + l_3}$$

d'après l'annexe I

$$\Delta S/S = 0,0180$$

$$l_2 = 11 \text{ cm}$$

tubes courts $l_1 + l_2 + l_3 = 20 \text{ cm}$ $l_1 + l_3 = 9 \text{ cm}$

tubes longs $= 48 \text{ cm}$ $= 37 \text{ cm}$

$S = 21 \text{ cm}^2$ $u = 12,5 \text{ cm}^2$ $S - u = 8,5 \text{ cm}^2$

$S = \pi a^2/4$ ($a = \text{diamètre}$) $\Delta S = (\pi/2) a \cdot \Delta a$

$a = 5,4 \text{ cm}$ $\Delta a = 0,05 \text{ cm}$

$\Delta S = 0,4 \text{ cm}^2$

$\Delta u = (\pi/2) a \cdot \Delta a$

$a = 4 \text{ cm}$ $\Delta a = 0,05$

$\Delta u = 0,3 \text{ cm}^2$

$\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l_3 = 0,1 \text{ cm}$

la valeur de l'expression centrale est 0,0100

$3 \Delta l / (l_1 + l_2 + l_3) = 0,0150$

pour les tubes courts $\Delta(D_1/D_2)/(D_1/D_2) = 4,3 \text{ p. } 100$

pour les tubes longs $= 3,5 \text{ p. } 100$

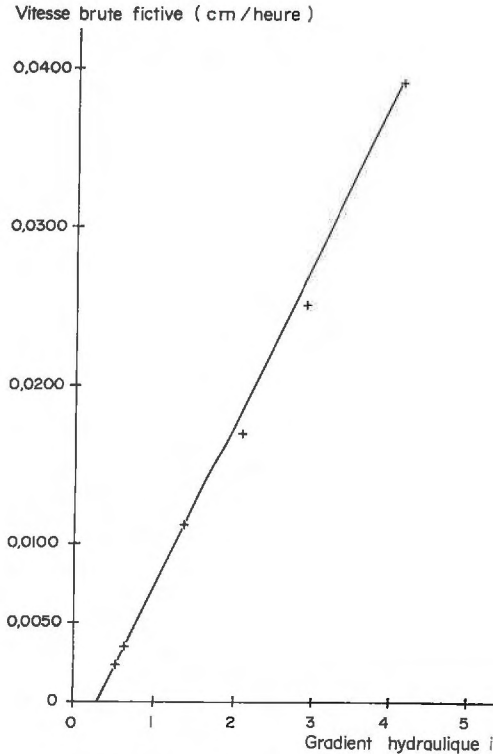


FIG. A 2. — Perméabilité de la craie

ANNEXE 6

FILTRATION DE L'EAU DANS LA CRAIE

La loi de Darcy $D = KS \frac{h}{l}$ peut s'écrire $D/S = Kh/l$,
 ou en posant $D/S = V$: vitesse brute fictive
 $\frac{h}{l} = i$: gradient hydraulique
 $V = Ki$

La droite représentative de $V = Ki$ passe par l'origine.

Pour la craie les points expérimentaux se placent sur une droite qui ne passe pas par l'origine (fig. A 2), c'est-à-dire que la circulation de l'eau ne commence que lorsque i dépasse la valeur i_0 :

$$V = K(i - i_0).$$

Donc K varie avec le gradient hydraulique.

ANNEXE 7

PRÉCISION SUR LE CALCUL DU RAPPORT $(D_1/D_2)_c$
 DANS LES EXPÉRIENCES AVEC LES ÉLÉMENTS POREUX
 (cylindres poreux de grand diamètre et tubes longs)

$$(D_1/D_2)_c = (l_1 + l_2 + l_3)^{-1} \cdot \left(l_1 + l_3 + \frac{l_2 K_1 S}{K_1(S - u) + K_2 u} \right)$$

$$\log (D_1/D_2)_c = -\log (l_1 + l_2 + l_3) + \log \left(l_1 + l_3 + \frac{l_2 K_1 S}{K_1(S - u) + K_2 u} \right)$$

$$\Delta(D_1/D_2)/(D_1/D_2) = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3}{l_1 + l_2 + l_3} + \frac{\Delta l_1 + l_3 + l_2 K_1 S / (K_1(S - u) + K_2 u)}{l_1 + l_3 + l_2 K_1 S / (K_1(S - u) + K_2 u)}$$

$$\begin{aligned} & \Delta(l_1 + l_3 + l_2 K_1 S / (K_1(S - u) + K_2 u)) = \Delta l_1 + \Delta l_3 + \Delta l_2 K_1 S / (K_1(S - u) + K_2 u) \\ & + \Delta K_1 \cdot l_2 S / (K_1(S - u) + K_2 u) \\ & + \Delta S \cdot l_2 K_1 / (K_1(S - u) + K_2 u) \end{aligned}$$

$$+ l_2 \cdot K_1 S \frac{(\Delta K_1 \cdot (S - u) + (\Delta S + \Delta u) K_1 + \Delta K_2 \cdot u + \Delta u \cdot K_2)}{(K_1(S - u) + K_2 u)^2} =$$

$$\Delta l_1 + \Delta l_3 + (\Delta l_2 \cdot K_1 S + \Delta K_1 \cdot l_2 S + \Delta S \cdot l_2 K_1) / (K_1(S - u) + K_2 u)$$

$$+ \frac{l_2 K_1 S (\Delta K_1 \cdot (S - u) + (\Delta S + \Delta u) K_1 + \Delta K_2 \cdot u + \Delta u \cdot K_2)}{(K_1(S - u) + K_2 u)^2}$$

$$\text{Erreur sur le 1er terme} : = 3 \Delta l / (l_1 + l_2 + l_3) = 0,006$$

$$\text{En admettant pour } K_2 \text{ une précision de 10 p. 100, comme } K_2 = 0,0003 \quad \Delta K_2 = 0,00003$$

$$\text{Erreur sur 2e terme} : = 0,095$$

$$\Delta(D_1/D_2) / (D_1/D_2) = 11 \text{ p. 100}$$

Cette valeur est certainement supérieure à la réalité puisque, il est vraisemblable que certaines erreurs de sens inverse se compensent, le calcul de (D_1/D_2) nécessitant 7 paramètres.

ANNEXE 8

INFILTRATION DE L'EAU DANS LA CRAIE

Si l'on maintient une lame d'eau d'épaisseur constante « a » au-dessus d'un échantillon de craie sèche de section « S », il se forme un front humide qui se déplace vers le bas (fig. A 3).

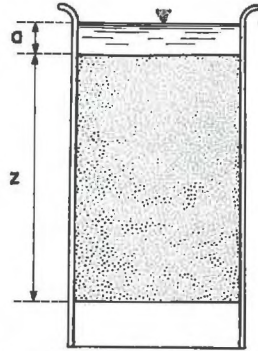


FIG. A 3. — Infiltration de l'eau dans la craie

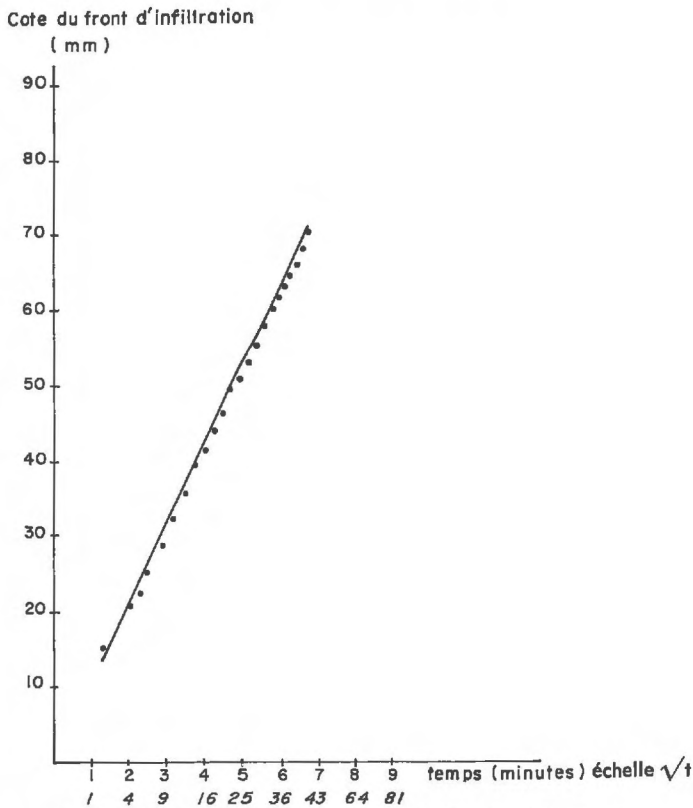


FIG. A 4. — Infiltration de l'eau dans la craie. Cote du front humide et temps

Le débit instantané D_z au moment où le front humide est à la cote z est

$$D_z = KS \left(\frac{a + z + \psi}{z} \right), \text{ K étant la perméabilité de la craie.}$$

En prenant comme valeur de a : 1 cm, de z : 100 cm, la valeur de ψ étant 200 cm, $(a + z)$ est petit devant ψ . On peut donc en première approximation négliger $a + z$.

Écrivons D_z de façon à faire apparaître l'erreur commise en négligeant $a + z$ devant ψ :

$$D_z = KS \frac{\psi}{z} \left(1 + \frac{(a + z)}{\psi} \right)$$

Comme $(a + z) / \psi = 101/200 = 4,5 \text{ p. } 100 = \varepsilon$

$$D_z = KS \frac{\psi}{z} (1 + \varepsilon) \cdot \neq KS \frac{\psi}{z}$$

Si on considère le déplacement du front humide on a :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{100 \text{ K } \psi}{P} \frac{1}{z} \quad z \cdot dz = \frac{100 \text{ K}}{P} dt$$

$$z^2 = (200 \text{ K/P}) t$$

$$D = \frac{dQ}{dt} = KS \frac{\psi}{z} = \frac{KS \psi}{\sqrt{200 \text{ K/P}}} \sqrt{t} \quad Q = \frac{KS \psi}{\sqrt{200 \text{ K/P}}} \sqrt{t}$$

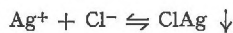
Ces expressions sont identiques à celles obtenues dans le cas de la circulation horizontale, ce qui est normal, puisque le seul effet pris en compte est celui de la succion.

Les points expérimentaux représentant la cote z et \sqrt{t} s'ordonnent autour d'une droite (fig. A 4), ce qui confirme bien la validité de l'approximation effectuée. Signalons que cette dernière est d'autant meilleure que la profondeur humectée est plus faible : pour $z = 10$ cm, $\varepsilon = 0,45 \text{ p. } 100$.

ANNEXE 9

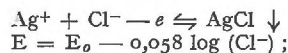
DOSAGE DU CHLORE PAR POTENTIOMÉTRIE AVEC LE NITRATE D'ARGENT

Le chlore est dosé par le nitrate d'argent suivant la réaction :



On aurait pu extraire le chlorure de calcium du sable par lessivage à l'eau et déterminer le point équivalent (qui correspond au moment où l'on a mis en présence de Cl^- la quantité théoriquement nécessaire de Ag^+), avec le chromate de potassium comme indicateur. Mais le liquide d'extraction est coloré, ce qui enlève toute précision à la méthode. Ceci nous a conduit à fixer le point équivalent par potentiométrie. Cette méthode présente, en outre, l'avantage de supprimer l'extraction préalable du chlorure par lessivage, le dosage s'effectuant directement sur la suspension.

Le potentiel d'une électrode parcourue par un courant d'intensité connue (qui peut être nulle) est fonction de la concentration du corps susceptible d'échanger des électrons :



(Cl^-) étant l'activité du chlore.

Le dispositif de mesure comprend donc une électrode inattaquable, dite électrode indicatrice, dont le rôle est uniquement de céder ou d'accepter des électrons. C'est une électrode Ag/ClAg , qui est constituée d'un fil d'argent plongée dans la solution à doser ; on admet que, dès le début du dosage, l'électrode d'argent se recouvre de chlorure d'argent. Le potentiel de cette électrode est mesuré par rapport à celui d'une électrode dont le potentiel reste constant : l'électrode de référence, dans notre cas une électrode au sulfate mercurieux (mercure/ $\text{Hg}_2\text{SO}_4/\text{K}_2\text{SO}_4$ saturé).

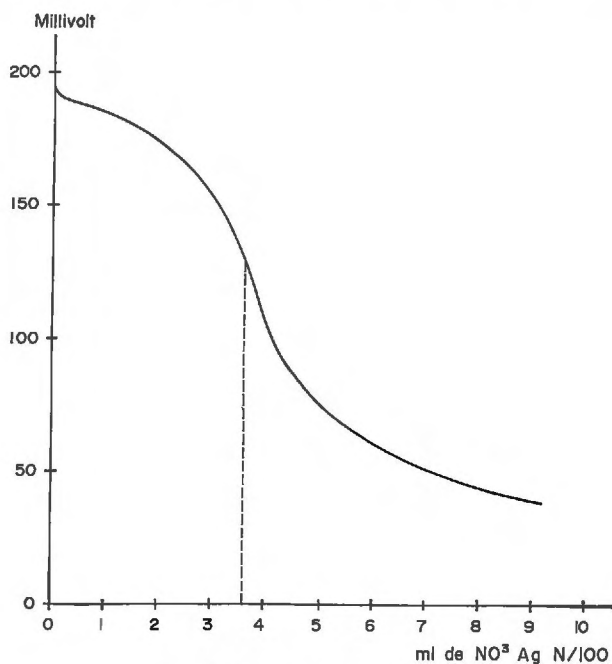


FIG. A 5. — Courbe de titrage potentiométrique du chlorure

Au moment où la précipitation des chlorures par le nitrate d'argent est complète, il y a une saute de potentiel indiquant le point équivalent. En fait, on a une courbe d'allure sigmoïdale $E = f(\text{cm}^3 \text{AgNO}_3)$ (fig. A 5). Le point équivalent est indiqué par un point singulier de cette courbe, ici le point d'inflexion.

Pour éviter que la phase solide ne perturbe l'homogénéité de la phase liquide de suspension, on ne met pas plus de 20 g de sol dans 100 ml d'eau. La suspension est maintenue homogène par un agitateur magnétique pendant le dosage.