

Influence de l'épaisseur des massifs poreux sur leur rétention d'eau Capacités en bac

R. GRAS

Station d'Agronomie et de Physiologie végétale
I.N.R.A. Antibes

avec la collaboration technique

d'Irène AGIUS

SOMMAIRE

Lorsque des matériaux poreux sous faible épaisseur sont saturés d'eau, puis laissés en drainage libre, l'écoulement d'eau liquide par la base cesse en quelques heures.

A ce moment-là, l'humidité moyenne est caractéristique du matériau, mais aussi de son épaisseur ; c'est la capacité en bac sous l'épaisseur considérée.

Dans un massif poreux à la capacité en bac, l'humidité croît vers la base du massif. Cette constatation est interprétée au moyen de la loi de sortie d'eau de RICHARDS et de la nullité du potentiel total de l'eau.

INTRODUCTION.

Des milieux poreux, terres ou autres matériaux, sont fréquemment utilisés en horticulture sous une épaisseur faible (quelques dizaines de centimètres) dans des pots, des bacs et sur des dalles.

A la différence de ce qui se passe fréquemment pour les sols en place, ces milieux poreux sont limités vers le bas par le fond du récipient ou le plus souvent par un « fond drainant » (gravier) facilitant l'écoulement de l'eau en excès par un orifice (trou de pot en terre cuite et de bac, gouttière de dalle).

Au départ, SCHLOESING insiste sur l'importance de l'épaisseur de matériau pour la rétention d'eau, en critiquant la détermination au laboratoire de la capacité au champ : une masse donnée de terre retient de moins en moins d'eau au fur et à mesure que l'épaisseur de terre augmente ; de plus, l'humidité augmente du haut vers le bas de l'échantillon.

Cette influence de l'épaisseur du corps poreux est également signalée par WIDSTOE et Mc LAUGHLIN (1912) : il reste plus d'eau dans une colonne de 30 cm que dans les 30 cm supérieurs d'une colonne de 90 cm.

LUNT (1957) souligne les différences entre les rétentions d'eau en bac et au champ : un sol sableux dans un bac peut retenir plus d'eau qu'un sol argileux in situ, l'épaisseur étant la même. N'importe quelle terre, amendée ou non, retient en bac plus d'eau qu'in situ.

LUTHIN et MILLER (1957) ont constaté dans une expérience qu'après ressuyage d'une colonne de sol préalablement saturé, l'humidité est fonction de la profondeur.

D'après BUNT (1941), la faible épaisseur du milieu poreux provoque un drainage réduit avec risque d'engorgement pour les plantes. SPOMER (1974) et BEARDSELL et al. (1979) ont remarqué que la teneur en air est d'autant plus faible que l'épaisseur de milieu poreux est plus réduite.

Les faits précédents ont conduit HANAN et LANGHANS (1961) à introduire pour les matériaux utilisés en faible épaisseur pour l'horticulture une notion distincte de la capacité au champ, la capacité en banquette (bench capacity). C'est la rétention d'eau des 5 cm supérieurs du sol d'une banquette profonde de 17,7 cm après son ressuyage en l'absence de plantes, l'évaporation étant supprimée.

WHITE (1964) a introduit le concept de la capacité en bac d'un matériau (container capacity) sous une épaisseur donnée : humidité du matériau qu'on laisse librement drainer après saturation.

Nous nous proposons d'examiner l'incidence de l'épaisseur des matériaux poreux sur leur rétention d'eau lorsqu'elle peut s'écouler librement par la base du récipient utilisé.

L'accent sera mis sur des points peu étudiés jusqu'alors : cinétique du ressuyage d'un matériau poreux préalablement saturé, répartition verticale de l'eau, tentative d'explication.

ETUDE EXPERIMENTALE.

Vingt matériaux, susceptibles d'être utilisés en horticulture comme substrats, ont été choisis de façon à présenter de grandes variations de propriétés du point de vue de la structure (fibreuse, granulaire, continue), des dimensions transversales des pores (étroits, larges) et de la rétention d'eau (faible, élevée).

Les matériaux organiques sont cinq tourbes à l'état brut, deux tourbes conditionnées, un terreau forestier, de la sciure de bois et deux écorces.

Les matériaux minéraux sont, soit naturels : sable fin, pouzzolane, tuf palagonitique, soit traités : vermiculite expansée, argile expansée, soit artificiels : perlite, résine phénolique chargée en minéraux et expansée, laitier bouleté de haut fourneau.

Pour simuler le comportement des matériaux dans les bacs, on les a placés dans des tubes cylindriques en plexiglass de diamètre intérieur 72 mm, fermés à leur base par une grille métallique de maille 5 mm, surmontée d'une toile à bluter de maille 0,5 mm. Ces tubes avaient des hauteurs différentes de façon à pouvoir disposer d'épaisseurs de matériaux de 10, 20 et 30 cm, et dans certains cas de 90 cm.

Les particules fines des produits granulaires ont été en général éliminées par tamisage, de façon qu'elles n'empêchent pas une répartition homogène du matériau dans les tubes, en s'accumulant à leur base.

Parmi les matériaux étudiés, certains comme les tourbes, la perlite, se mouillent difficilement, ce qui entraîne l'impossibilité de les saturer par simple submersion; de ce fait, les expériences sont moins reproductibles. Pour éliminer cet inconvénient, une procédure d'humectation utilisant le vide a été mise en œuvre. Le corps poreux est soumis dans le tube à un vide poussé obtenu par une pompe à vide, puis humecté lentement par élévation progressive d'un plan d'eau; une fois le matériau submergé, on alterne pendant six jours, pression atmosphérique et pression résiduelle persistant après le vide.

Le tube est ensuite sorti de l'eau et laissé en drainage libre. La perte d'eau est suivie la première journée par pesée de l'eau écoulée et ensuite par pesée du tube. La perte d'eau initiale ne peut être connue puisque, pour des raisons pratiques, on ne peut recueillir l'eau écoulée avant que 15 secondes environ se soient écoulées après le temps zéro correspondant au retrait du tube de l'eau. Pour limiter l'évaporation en surface, le tube a été couvert d'un film plastique percé de trous d'épingle. Pour ménager l'écoulement éventuel d'eau par la base, celle-ci n'a pas été protégée de la même manière; l'évaporation reste donc certainement importante.

A la fin d'une période de ressuyage de 3 jours, le matériau est scindé suivant la hauteur de la colonne en 3, à 4 ou 10 fragments dont on mesure l'humidité par séchage à l'étuve à 105 °C. On peut ainsi étudier la répartition verticale de l'eau. Les humidités sont les moyennes de celles de deux expériences.

1. CINÉTIQUE DE LA VARIATION DE MASSE DU TUBE EN DRAINAGE LIBRE. EXISTENCE D'UNE HUMIDITÉ MOYENNE CARACTÉRISTIQUE.

La variation au cours du temps de la masse du tube retiré de l'eau (fig. 1) présente pour **tous les matériaux** étudiés la même allure caractéristique: pour les tubes de 10, 20 et 30 cm la perte de poids due à l'écoulement de l'eau est très rapide au début; elle diminue progressivement pour atteindre au bout de quelques heures une vitesse très lente quasi constante.

La courbe de perte de poids peut se diviser schématiquement en plusieurs parties, qui se succèdent ainsi à partir du temps zéro:

- Branche voisine de la verticale dont le rayon de courbure est grand: régime rapide;
- Branche de transition à petit rayon de courbure;
- Branche voisine de l'horizontale à grand rayon de courbure: régime lent;
- Branche à très grand rayon de courbure, assimilable en première approximation à une droite, dont la pente est plus grande en valeur absolue que la pente moyenne de la dernière partie de la courbe en régime lent.

L'augmentation précédente de vitesse de perte d'eau, qui est constatée aux alentours de la sixième heure, pourrait provenir de la modification de la méthode de mesure de la perte d'eau: au début, la pesée de l'eau écoulée ne tient pas compte des pertes par évaporation, tandis qu'après la première demi-journée la pesée du corps poreux ne prend en compte pratiquement que l'évaporation, les écoulements d'eau étant en général nuls.

Le régime lent, que l'on peut considérer comme établi au temps correspondant à l'extrémité la plus éloignée de l'origine de la branche de transition, est caractérisé par une vitesse moyenne de perte d'eau environ vingt fois plus petite que la vitesse moyenne du régime rapide. Ce régime lent apparaît d'autant plus nettement que l'épaisseur de corps poreux est plus faible. Par exemple, dans le cas de la perlite,

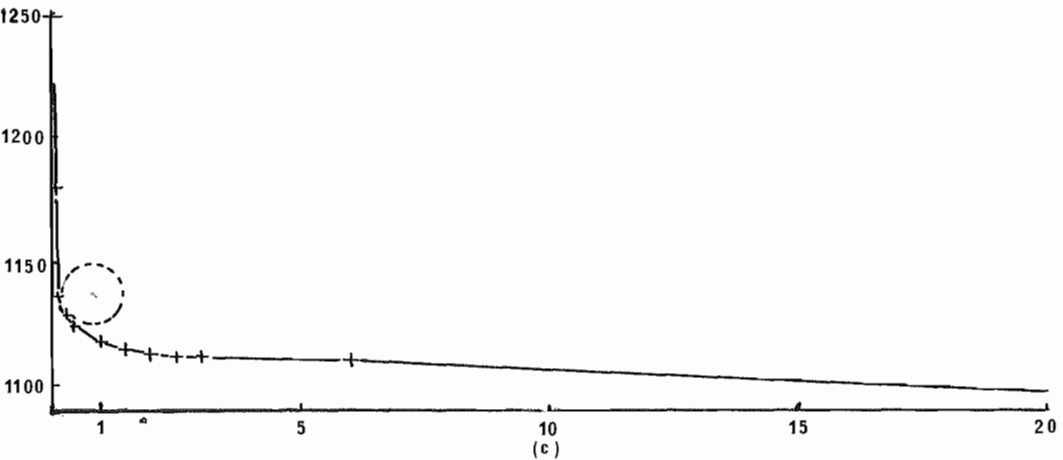
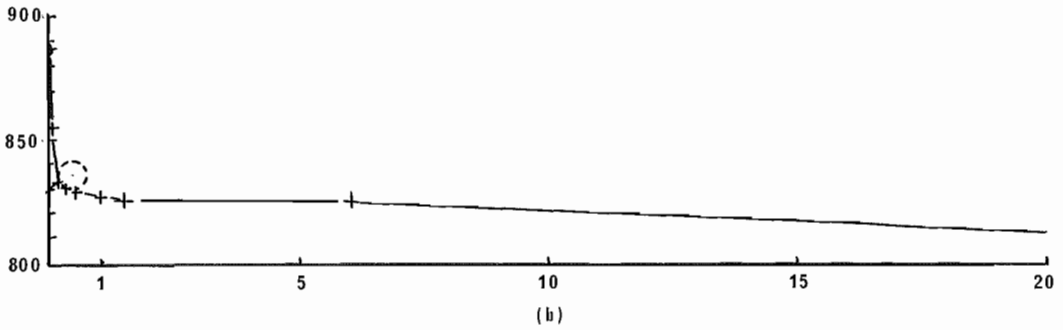
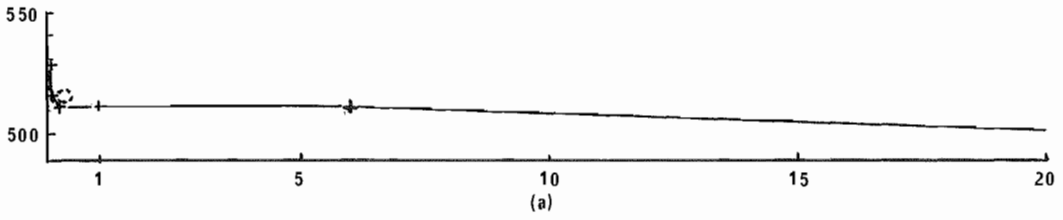


FIGURE I. — Perte de poids (g) en fonction du temps (h) pour la perlite sous trois épaisseurs : 10 cm (a), 20 cm (b) et 30 cm (c).

Loss of weight (g) of perlite as function of time (h). Three thicknesses: 10 cm (a), 20 cm (b) and 30 cm (c)

ce régime lent s'établit en environ 1 heure 30 minutes pour 30 cm, 1 heure pour 20 cm et 30 minutes pour 10 cm.

Corrélativement, la netteté du changement de pente, traduite par la courbure de la portion de courbe de transition faisant passer du régime rapide au régime lent, augmente lorsque l'épaisseur du matériau diminue. En d'autres termes, le rayon du cercle de courbure de la branche de transition augmente lorsque l'épaisseur de matériau croît.

Les matériaux poreux sous une épaisseur réduite préalablement saturés d'eau atteignent **tous** rapidement une humidité en deça de laquelle la perte d'eau per descensum est faible et négligeable en première approximation pour des intervalles de temps relativement courts, de l'ordre de la semaine. On retrouve un comportement déjà constaté sur les terres in situ, dont l'humidité atteint un régime de variation lent quelques jours après une pluie abondante, mais le passage à ce régime lent demande plus de temps et est moins net que pour les bacs peu profonds. Notons à ce sujet que pour des tubes de 90 cm, le régime lent n'apparaît que 5 à 7 heures après le début du ressuyage.

Par analogie avec la définition de la capacité au champ des terres in situ, nous attacherons à un matériau sous faible épaisseur, drainant librement par sa base, une **humidité moyenne caractéristique** (quotient de la masse d'eau par la masse du matériau séché à 105 °C). Déterminer l'époque à laquelle l'humidité de l'échantillon devra être considérée comme caractéristique est en partie affaire d'appréciation.

En effet, pour un matériau sous une épaisseur déterminée, le régime lent de perte d'eau s'établit progressivement (cf. par exemple fig 1c) et l'époque au-delà de laquelle on peut considérer le régime lent comme établi n'est pas déterminée avec précision. De plus, ce régime lent s'établit d'autant plus tôt que l'épaisseur de matériau est plus petite (fig. 1 a, b et c) ; il faudrait alors proposer des durées de ressuyage d'autant plus courtes que l'épaisseur de matériau est plus réduite.

Par ailleurs, l'humidité moyenne caractéristique ne correspond pas à un véritable équilibre, et ce n'est que pour un intervalle de temps donné et avec une certaine approximation, dont le tableau 1 donne une idée, que l'on peut utiliser ce terme.

TABEAU 1. — *Approximations faites en admettant que l'eau est à l'équilibre après 6 heures et 48 heures de drainage. Pour cent de l'humidité à 72 heures, pour trois épaisseurs de matériaux (10, 20 et 30 cm)*

Approximations made in admitting the moisture content after 6 hours and 48 hours of drainage is an equilibrium point. Per cent of moisture content for 72 hours, three thickness of materials (10, 20, 30 cm)

	10 cm		20 cm		30 cm	
	6 h	48 h	6 h	48 h	6 h	48 h
argile expansée 0,5 - 2 mm	21,9	7,0	11,7	3,4	9,2	2,8
perlite 1 - 8 mm	21,4	6,7	11,6	3,4	9,1	2,8
résine (monolithique)	17,6	4,3	8,6	2,0	9,5	2,4
sciure de bois inférieure à 5 mm	21,4	6,6	10,6	3,7	8,2	2,7
tourbe blonde	8,5	2,2	6,4	1,2	5,1	1,2
sable fin inférieur à 1 mm	34,3	11,2	37,6	13,9	33,7	13,1

On constate que, entre 48 et 72 heures, s'écoule en général une quantité d'eau qui représente entre 7 et 1,2 % de l'humidité à 72 heures ; toutefois, pour le sable fin cette proportion atteint 13,9 %. L'approximation est d'autant meilleure en général que l'épaisseur de corps poreux est plus grande : ceci s'explique par le fait que le dénominateur du rapport eau perdue/eau dans le matériau après 72 heures augmente avec l'épaisseur, la perte d'eau étant sensiblement indépendante de l'épaisseur de matériau.

Le fait que l'approximation soit très mauvaise pour le sable tient à ce qu'il perd relativement plus d'eau que les autres matériaux pour une rétention en eau plus faible (cf. tableau 2), cependant le changement de rythme de drainage est aussi très marqué. Enfin, comme pour la capacité au champ, certains corps poreux peuvent ne pas avoir de capacité en bac bien définie.

Par précaution, nous avons pris comme humidité caractéristique, l'humidité qui reste après 72 heures de drainage. Comme nous avons utilisé quelques épaisseurs de 90 cm de matériau, ce délai présente l'avantage de dépasser la période de drainage lent correspondant à une courbure encore accentuée du graphique de perte de poids.

Pour des épaisseurs de corps poreux ne dépassant pas 40 cm, ce qui correspond à la plupart des usages horticoles, on pourrait admettre par convention une durée de ressuyage de 6 heures, les écoulements d'eau étant pratiquement nuls au-delà de ce délai.

Une fois l'« équilibre » atteint, l'humidité moyenne caractéristique pour une épaisseur donnée est spécifique de chaque matériau, en ce sens que la reproductibilité est très bonne : la différence entre deux mesures, exprimée en % de leur moyenne, varie entre 0,02 et 3,29. Elle atteint exceptionnellement 9,6 pour quelques matériaux, dont le comportement aberrant sera signalé ultérieurement.

Cette humidité moyenne est un équilibre en ce sens que toute perte d'eau sous forme liquide cesse au bout d'un certain délai, qui augmente avec l'épaisseur. Toutefois, cet équilibre n'est pas strict parce que le matériau perd lentement de l'eau sous forme de vapeur.

2. INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE MATÉRIAU SUR SON HUMIDITÉ MOYENNE CARACTÉRISTIQUE - CAPACITÉS EN BAC.

Pour un matériau donné, lorsqu'on fait varier son épaisseur, l'humidité caractéristique n'est pas constante, mais elle diminue en général lorsque l'épaisseur augmente (tableau 2). Cette humidité dépend donc à la fois du matériau et de son épaisseur.

TABLEAU 2. — Exemples de matériaux dont la capacité en bac suit la règle générale (diminution lorsque l'épaisseur de matériau augmente)

Capacités en bac (% de masse sèche) pour 10, 20 et 30 cm.
Indices avec capacité en bac 20 cm = 100.

Examples of materials, the container capacity of which follow the general rule (decrease when the thickness increase).

Container capacity (per cent dry weight) for 10, 20, 30 cm thickness.
Indexes for 20 cm container capacity = 100.

Épaisseur de matériau (cm)	Argile expansée 0,5 - 2 mm		Perlite 1 - 8 mm		Résine (monolithe)		Sciure de bois inférieure à 5 mm		Tourbe blonde		Sable fin inférieur à 1 mm	
10	81,8	107,7	607,6	112,1	256,7	113,7	323,7	114,2	1025,4	124,5	18,5	174,5
20	75,9	(= 100)	541,6	(= 100)	225,7	(= 100)	283,4	(= 100)	823,3	(= 100)	10,6	(= 100)
30	67,4	88,8	493,3	91,0	200,6	88,8	249,7	88,1	760,8	92,4	7,8	73,5

TABLEAU 3. — Matériaux dont la capacité en bac ne suit pas la règle générale de variation avec l'épaisseur.

Capacité en bac (% de masse sèche) pour 10, 20 et 30 cm.
Indices avec capacité en bac 20 cm = 100.

Materials, the container capacity of which do not follow the general rule of variation with thickness.

Container capacity (per cent dry weight) for 10, 20, 30 cm thickness.
Indexes for 20 cm container capacity = 100.

Epaisseur de matériau (cm)	Tuf palagonitique inférieur à 4 mm				Pouzzolane inférieur à 8 mm		Résine granulée 2 à 16 mm		Argile expansée 2 - 10 mm		Laitier bouleté de haut fourneau inférieur à 16 mm	
	1er arrivage		2ème arrivage									
10	47,4	100,8	48,0	103,2	20,2	102,0	108,40	101,9	40,2	90,1	16,2	74,6
20	47,0	(=100)	46,5	(=100)	19,8	(=100)	106,3	(=100)	44,6	(=100)	21,7	(=100)
30	46,4	98,7	46,6	100,2	20,5	103,2	109,8	103,1	46,0	103,1	26,0	119,8

Nous appellerons l'humidité moyenne caractéristique correspondant à l'établissement du régime lent de perte d'eau la **capacité en bac (traduction de container capacity) sous l'épaisseur h**. Comme la rétention d'eau varie avec l'épaisseur, à chaque épaisseur correspond une capacité en bac.

La diminution de la rétention d'eau lorsque l'épaisseur augmente présente quelques exceptions : pour cinq matériaux, la variation de la rétention d'eau, lorsque l'épaisseur augmente, est très atténuée, erratique, voire inversée (tableau 3). Nous reviendrons sur ces cas particuliers ultérieurement, mais nous remarquons dès maintenant que des matériaux identiques présentent des allures de variation différentes suivant leur conditionnement : dimensions des grains pour l'argile expansée et le laitier bouleté, monolithe et dimensions de grains pour la résine.

3. REPARTITION VERTICALE DE L'HUMIDITE DANS LE MATERIAU A LA CAPACITE EN BAC : EPAISSEURS DE 10, 20, 30 cm ET 90 cm.

La mesure de l'humidité par séchage à l'étuve, une fois l'« équilibre » établi, montre qu'en général l'humidité augmente vers le bas pour les tubes de 10, 20, 30 cm et 90 cm (fig. II et III).

Les courbes représentatives de l'humidité en fonction de la cote se déplacent vers les humidités plus faibles, lorsque l'épaisseur totale de matériau augmente.

Dans le cas des tubes de 90 cm (sable fin, tourbe blonde, tuf), les profils ont entre 0 et 40 cm une partie subverticale traduisant une faible variation d'humidité avec la cote. Une amorce de cette partie subverticale existe sur les profils de 30 cm.

L'augmentation de l'humidité lorsqu'on se déplace vers le bas a été constatée également sur des cases lysimétriques remplies de terre plus ou moins enrichie en matière organique (fig. IV).

L'augmentation de l'humidité lorsqu'on se déplace vers le bas dans un milieu à la capacité en bac présente donc un grand degré de généralité.

Cependant, l'augmentation de l'humidité avec la profondeur n'est pas régulière pour deux colonnes sur six du tuf palagonitique et elle est en défaut pour l'argile expansée 2 à 10 mm et le laitier bouleté de haut fourneau. Ces matériaux présentent aussi des anomalies de variation de la capacité en bac en fonction de l'épaisseur, comme on vient de le voir à la fin du paragraphe 2.

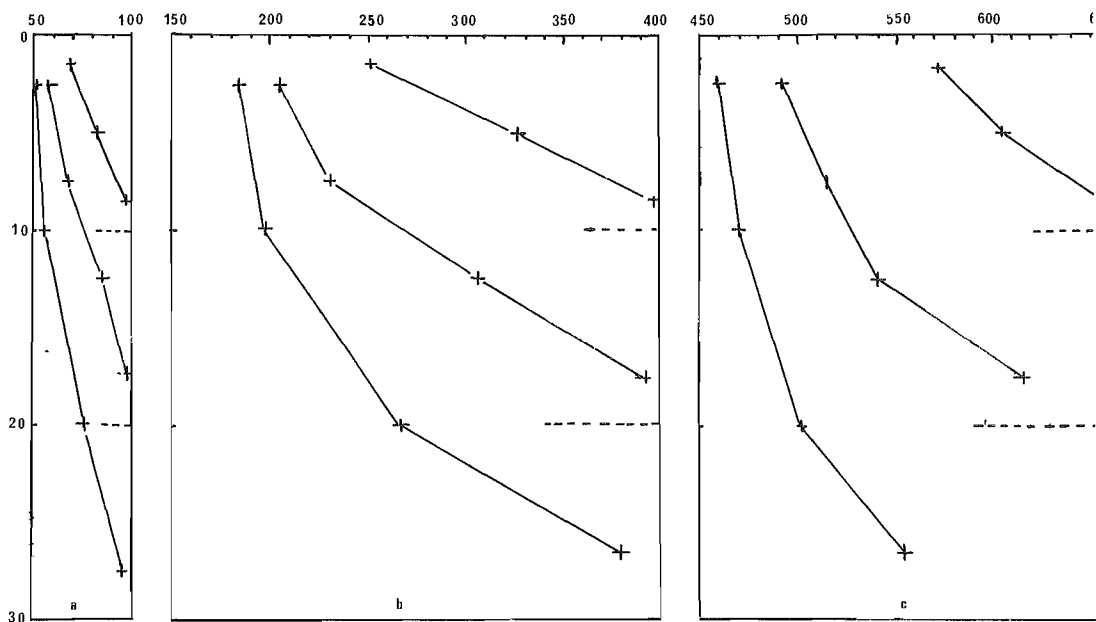


FIGURE II. — Répartition verticale de l'humidité (% de masse sèche) à la capacité en bac, sous trois épaisseurs (10, 20 et 30 cm) pour l'argile expansée 0,5-2 mm (a), la sciure de bois (b) et la perlite (c)

Moisture profile (per cent dry weight) at the container capacity. Three thicknesses (10, 20 and 30 cm). Expanded clay 0,5-2 mm (a), Sawdust (b), Perlite (c)

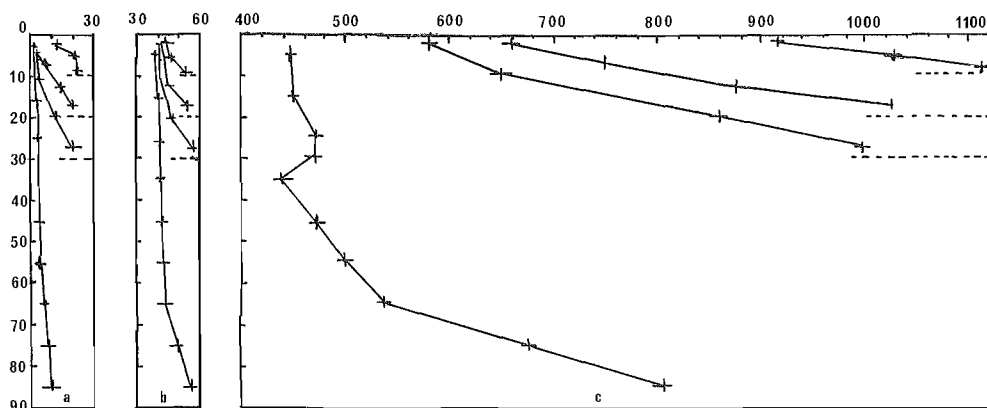


FIGURE III. — Répartition verticale de l'humidité (% de masse sèche) à la capacité en bac sous quatre épaisseurs (10, 20, 30 et 90 cm) pour le sable (a), le tuf (b) et la tourbe blonde (c). L'échelle des humidités de ce dernier matériau est multipliée par 2

Moisture profile (per cent dry weight) at the container capacity. Four thicknesses (10, 20, 30 and 90 cm). Sand (a), Tuff (b), Peat (c). The peat moisture scale has been multiplied by 2

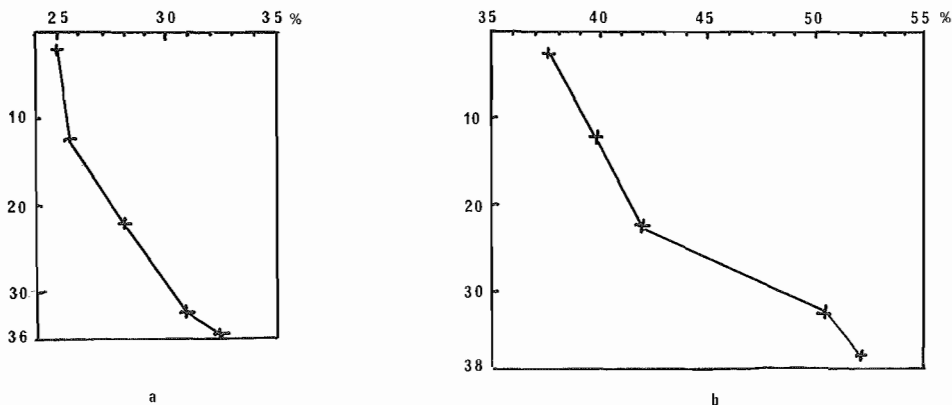


FIGURE IV. — Profils hydriques (% de masse sèche) de cases lysimétriques 11 jours après leur saturation. a : terre argilo-limoneuse, b : terre argilo-limoneuse enrichie en matière organique

Moisture profile (per cent dry weight) in lysimeters 11 days after saturation. a: clay loam soil, b: clay loam soil with organic matter

INTERPRETATION DES RESULTATS.

Un corps poreux, sous faible épaisseur, préalablement saturé et laissé ensuite en drainage libre, perd d'abord de l'eau essentiellement sous forme liquide et accessoirement sous forme vapeur ; par la suite, seule subsiste la perte lente sous forme de vapeur, en général au-delà de 6 heures.

Du fait de la différence de potentiel entre l'eau du milieu poreux (de l'ordre de zéro à la base du tube et de moins quelques dizaines de centimètres d'eau au sommet) et l'eau sous forme de vapeur de l'atmosphère (moins quelques millions de centimètres d'eau), l'eau a tendance à passer dans l'atmosphère. Mais ce transfert se faisant exclusivement en phase vapeur, une fois l'écoulement terminé, est relativement lent.

De ce fait, en première approximation, l'eau en phase liquide peut être considérée comme étant à l'équilibre. La répartition de l'eau constatée après l'arrêt de l'écoulement apparaît sur des intervalles de temps relativement courts, de l'ordre de la semaine, comme stable. C'est la répartition de l'eau à la fin de la phase de drainage que nous allons tenter d'expliquer.

A la capacité en bac, l'humidité n'est pas uniforme, mais croît lorsqu'on se déplace vers la base du tube où l'eau est quasi saturante. C'est ce comportement qui, sans être absolument général est qualifié de normal parce qu'il est le plus fréquent, que nous tenterons d'abord d'expliquer.

Par la suite, on examinera les quelques exceptions au comportement normal.

1. COMPORTEMENT NORMAL.

L'interprétation fait intervenir d'une part les conditions d'équilibre de l'eau au niveau de la base du massif poreux et d'autre part au sein de ce massif.

a) Une fois le milieu poreux à la capacité en bac, la limite inférieure du milieu se comporte en quelque sorte comme une barrière s'opposant à la sortie de l'eau sous forme liquide.

La loi de « sortie d'eau » de RICHARDS (1950) fournit l'explication de ce fait : « La sortie d'eau libre du sol se produit seulement si la pression de l'eau du sol dépasse la pression atmosphérique ». En d'autres termes, l'eau s'écoule librement d'un milieu poreux, seulement si la succion y est nulle.

Les constatations de COLMAN et HAMILTON (1947) sur des lysimètres profonds de 1,80 m illustrent cette loi : leur drainage ne commence que lorsque les tensiomètres placés à leurs bases indiquent une succion nulle.

La loi de sortie d'eau implique qu'à la base même du corps poreux, une fois l'écoulement d'eau liquide terminé, la pression de l'eau soit égale à la pression atmosphérique dans les pores susceptibles de retenir de l'eau à une faible tension. Pour les milieux dont les pores sont suffisamment étroits, la loi entraîne la saturation de leurs limites inférieures.

b) Si l'eau liquide est à l'équilibre au sein du massif, le gradient du potentiel total $d\Psi/dz$ est nul. Ceci entraîne $\Psi(z) = \text{Cte}$.

Comme le potentiel total est la somme du potentiel gravitationnel Ψ_g , lui-même égal à z dans l'expression par unité de poids, et du potentiel matriciel Ψ_m :

$$\Psi_g + \Psi_m = \text{Cte}$$

L'axe des cotes z étant orienté positivement vers le haut, on peut calculer la valeur de la constante en prenant comme plan de référence celui passant par la base de massif. Le potentiel gravitationnel y a la valeur $\Psi_g = z = 0$ par convention et le potentiel matriciel la valeur $\Psi_m = 0$, si la limite inférieure du corps poreux est saturée. Il s'en suit que la constante est nulle et que $\Psi_g + \Psi_m = 0$, ou $\Psi_m = -\Psi_g = -z$.

Le potentiel matriciel est en chaque point égal et opposé au potentiel gravitationnel (fig. V).

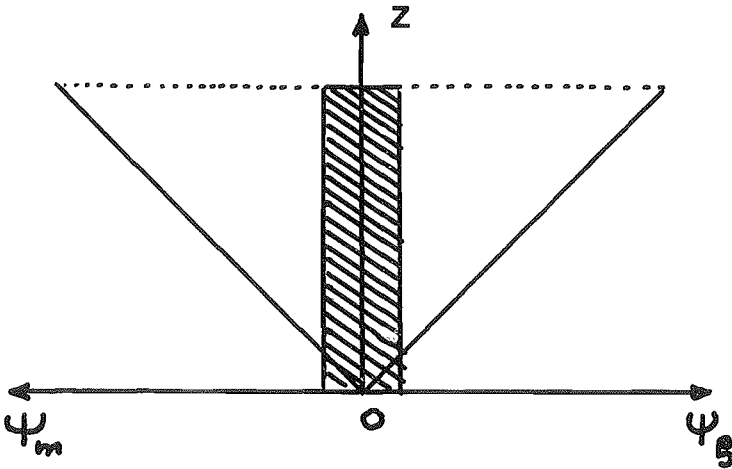


FIGURE V. — Variation avec la cote z comptée à partir de la base du milieu poreux du potentiel gravifique Ψ_g et du potentiel matriciel Ψ_m de l'eau
Plan de référence pour le potentiel gravifique : base du tube ($\Psi_g = 0$ pour $z = 0$).
Base du tube saturée ($\Psi_m = 0$ pour $z = 0$)

Gravitational potential Ψ_g , matric potential Ψ_m as function of elevation above the bottom of porous medium. Reference level for Ψ_g : bottom of porous medium ($\Psi_g = 0$ for $z = 0$). Bottom saturated ($\Psi_m = 0$ for $z = 0$)

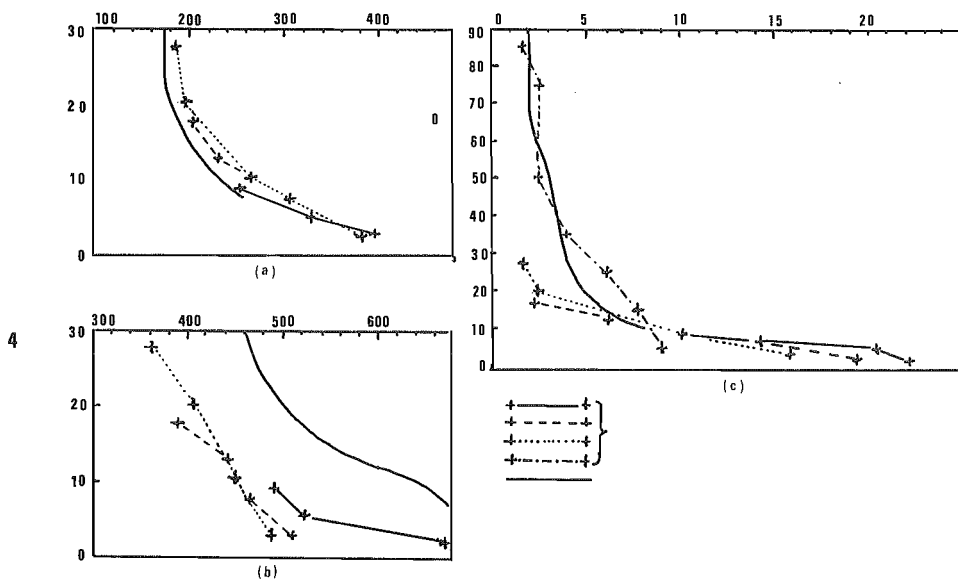


FIGURE VI. — Profils hydriques et courbes potentiel-humidité
 a: sciure, b: vermiculite, c: sable

Moisture profile and water retention curve
 a: Sawdust, b: Vermiculite, c: Sand

Au fur et à mesure qu'on s'élève à partir de la base du massif, le potentiel matriciel diminue. Il s'en suit que la succion croît et que l'humidité diminue. On retrouve donc bien ainsi **la variation qualitative** de l'humidité du milieu poreux avec la cote.

Si les hypothèses formulées précédemment expliquent quantitativement la répartition de l'eau constatée expérimentalement, les profils hydriques sont des portions de la courbe donnant la variation de l'humidité en fonction du potentiel matriciel pris égal à la valeur de la cote changée de signe. De ce fait, l'origine des cotes étant la base des tubes, les profils hydriques doivent se placer sur la courbe humidité-potential déterminée par ailleurs à la centrifugeuse (GRAS), le potentiel matriciel moyen de l'échantillon étant calculé en tenant compte des résultats de SCHAFFER *et al.* (1937).

Dans 11 des 12 cas étudiés, les profils 10, 20 et 30 cm se placent sur une même courbe; cette courbe s'identifie à la courbe potentiel matriciel humidité dans 6 cas (fig. VI a) et elle est parallèle à la courbe humidité potential dans les 5 autres cas (fig. VI b).

Pour deux des trois tubes de 90 cm, la relation potentiel-humidité prévoit avec précision l'humidité des 60 cm supérieurs; la partie subverticale des profils hydriques apparaît donc comme une conséquence de la relation potentiel humidité dont la courbe représentative est aussi subverticale pour les humidités faibles (fig. VI a et c).

Dans la moitié des matériaux étudiés, les hypothèses expliquent donc les variations verticales d'humidité dans le milieu poreux amené à la capacité en bac.

Lorsque les courbes humidité-potential donnent seulement l'allure de la variation, l'importance des écarts ne permet pas de retenir comme explications: l'imprécision des courbes humidité potential, l'hétérogénéité des matériaux, la difficulté de remplir les tubes de manière homogène.

La courbe humidité potentiel surestime l'humidité réelle pour la vermiculite, la perlite, la résine et une tourbe blonde. Il est possible que la limite inférieure du milieu poreux ne soit pas complètement saturée, ce qui entraînerait une translation du profil hydrique vers les humidités inférieures. Effectivement, pour certains de ces matériaux, le ressuyage avec plan d'eau libre à la base donne des humidités supérieures à celle du drainage libre. De plus, pour la perlite et une tourbe blonde, les humidités de la couche inférieure diminuent lorsque l'épaisseur totale de matériau augmente, ce qui accréderait l'hypothèse d'une saturation incomplète de la base du massif : l'influence de l'épaisseur sur l'humidité de la base pourrait s'interpréter par des effets de l'énergie cinétique de l'eau en drainage rapide proportionnels à la longueur de la colonne, lors de la mise en drainage libre.

L'humidité réelle est sous-estimée par la courbe humidité potentiel pour trois matériaux seulement (une autre tourbe blonde, deux tourbes conditionnées). On ne dispose pas pour le moment d'hypothèses explicatives satisfaisantes.

En définitive, les hypothèses proposées (saturation de la limite inférieure, nullité du potentiel total de l'eau) expliquent quantitativement les profils expérimentaux dans la moitié des cas étudiés. Ces hypothèses doivent donc être conservées, mais en tentant d'expliquer les discordances réalité-modèle, ce qui sera fait ultérieurement.

c) Les hypothèses précédentes expliquent aussi pourquoi l'humidité moyenne qu'est la capacité en bac diminue lorsque l'épaisseur h du massif augmente. En effet, le potentiel matriciel au sommet $\Psi_m = -h$ diminue lorsque h croît, ce qui entraîne

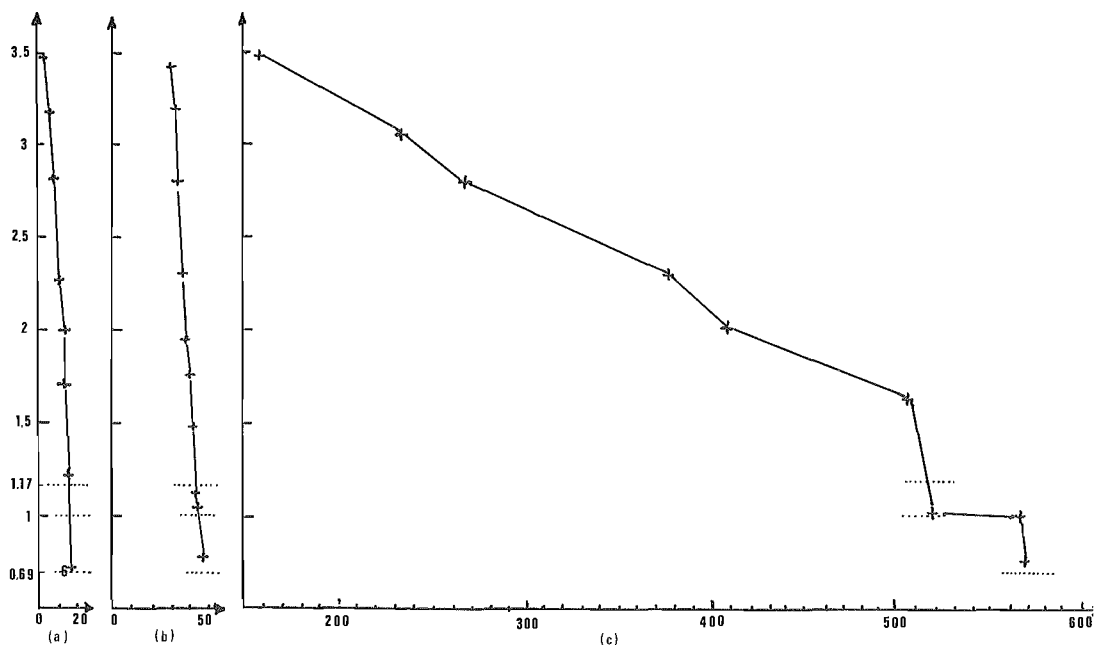


FIGURE VII. — Courbes pF - humidité (% de masse sèche) pour la pouzzolane (a), le tuf (b) et la perlite (c)

Les pF correspondant à $z = h/2$ sont donnés pour $h = 10$, $pF = 0,69$ — $h = 20$ cm, $pF = 1,0$ — et $h = 30$ cm, $pF = 1,17$

Curves pF moisture (per cent dry weight). Pouzzolana (a), Tuff (b), Perlite (c). The pF corresponding with $z = h/2$ are given for $h = 10$, $pF = 0,69$ — $h = 20$ cm, $pF = 1,0$ and $h = 30$ cm, $pF = 1,17$

une diminution de l'humidité ; comme la base est saturée ($\Psi_m = 0$), l'humidité moyenne du massif diminue. Ceci explique l'influence des dimensions du massif poreux en drainage libre sur leur rétention d'eau signalée par BEARDSELL *et al.* (1979) et RIVIERE (1980). La variation de la dimension verticale (épaisseur) joue un rôle essentiel par l'intermédiaire du potentiel total de l'eau placée dans le champ de pesanteur ; la dimension transversale peut intervenir secondairement par le biais de l'importance relative de l'effet parasite de la paroi.

d) On peut évaluer la capacité en bac sous une épaisseur h , en admettant qu'elle correspond au potentiel moyen dans le massif, c'est-à-dire à la cote $h/2$, le potentiel étant nul à la base (fig. V!!).

Ceci revient à assimiler l'arc de la courbe potentiel matriciel humidité entre $\Psi_m = 0$ [base du tube] et $\Psi_m = -h$ (sommet du tube) à un segment de droite. De ce fait, l'approximation est d'autant meilleure que l'arc de courbe est plus court, c'est-à-dire que le massif poreux est moins épais. Effectivement, les évaluations sont d'autant plus précises que les épaisseurs sont plus faibles et elles sont franchement mauvaises au-delà de 30 cm. WHITE (1974) propose de prendre l'humidité correspondant à $\Psi_m = -h$, ce qui donne des évaluations moins proches de la réalité.

e) Nous allons tenter de situer pour un matériau donné les capacités en bac sous des épaisseurs relativement faibles, au plus égales à 30 cm, par rapport à la capacité au champ, en considérant les pressions utilisées pour son estimation au laboratoire.

D'après le paragraphe précédent, les ordres de grandeurs des pressions en centimètres d'eau correspondant aux capacités en bac varient entre 5 pour les épaisseurs de 10 cm et 15 pour les épaisseurs de 30 cm. WHITE et MASTALERZ (1966) indiquent que pour une épaisseur de 17,2 cm, la pression moyenne à la capacité en bac est de 13,3 cm d'eau.

Toutes ces valeurs sont de beaucoup inférieures aux pressions utilisées pour évaluer la capacité au champ : 100 à 1.000. Il s'en suit que, du moins pour les faibles épaisseurs, les capacités en bac sont supérieures à la capacité au champ.

f) La présence à la base d'un matériau A d'un autre matériau poreux B modifie la répartition de l'eau dans A, puisque la loi de sortie d'eau s'applique à la base du matériau B. Des expériences réalisées en laissant se ressuyer une colonne complexe (10 cm de matériau A sur 5, 10 et 20 cm de sable) après saturation de l'ensemble montrent bien dans tous les cas une diminution de l'humidité dans le matériau A d'autant plus importante que l'épaisseur de sable est plus grande. Ceci est cohérent avec l'explication de la nullité du potentiel total de l'eau, l'épaisseur de la colonne complexe variant dans le même sens que l'épaisseur de sable. Les constatations précédentes soulignent les difficultés de principe des mesures de rétention d'eau de milieux poreux consistant à faire se ressuyer le milieu sur un sable plus ou moins humide.

2. COMPORTEMENT ANORMAL.

Il existe des degrés dans le comportement anormal des matériaux (tableau 3).

a) Pour deux matériaux (pouzzolane et tuf palagonitique), les anomalies sont peu marquées. L'humidité de la pouzzolane croît vers le bas, quoique les différences soient faibles, mais les capacités en bac sont sensiblement constantes : 10 cm : 20,2 % - 20 cm : 19,8 % - 30 cm : 20,5 %. Pour le tuf palagonitique, existent simultanément de légères anomalies de répartition de l'humidité (0 à 3 cm : 44,8 % - 3 à 7 cm : 50,8 % - 7 à 10 cm : 48,1 %) et une variation anormale de la capacité en bac avec la profondeur 10 cm : 48,0 % - 20 cm : 46,5 % - 30 cm : 46,6 %.

Pour les deux matériaux précédents, les humidités varient peu en fonction du potentiel matriciel, ce qui correspond à des courbes potentiel-humidité peu inclinées par rapport à la verticale. La figure VII permet de comparer les courbes de pF de ces deux matériaux à la courbe d'un matériau à comportement normal, la perlite.

Compte tenu des faibles différences entre les humidités des différents niveaux d'un même massif poreux, l'hétérogénéité du matériau et les difficultés de réalisation des expériences ne permettent pas toujours la mise en évidence des différences théoriques faibles entre les humidités. Il ne s'agit donc pas véritablement d'exceptions à la règle.

b) Pour les autres matériaux (argile expansée de 2 à 10 mm, massifs de gros grains de résine, laitier bouleté) l'humidité décroît en général lorsqu'on se déplace vers le bas : par exemple, pour le laitier bouleté (0 à 5 cm : 21,6 % - 5 à 10 cm : 22,2 % - 10 à 15 cm : 22,9 % - 15 à 20 cm : 20,3 %) ; la capacité en bac varie dans le même sens que l'épaisseur (tableau 3). Ces anomalies ne sont pas le fait du matériau lui-même, mais de la façon dont il est préparé, comme on l'a déjà signalé : pour l'argile expansée, les grains de 0,5 à 2 mm de diamètre se comportent normalement à l'inverse des grains de 2 à 10 mm ; les fractions inférieures à 1 mm, entre 1 et 2,5 et 2,5 à 4 mm et le monolithe de résine suivent la règle générale tandis que les fractions 2-16 mm, 4-8 mm et supérieures à 10 mm ont un comportement aberrant ; pour le laitier bouleté, ce sont les fractions les plus grossières (4-8 mm, 8-10 mm, supérieure à 10 mm) dont les humidités sont plus faibles à la base. La caractéristique commune de ces matériaux est la dimension relativement élevée des grains les plus gros (8-10 mm), jointe à une pauvreté relative en éléments fins.

Le comportement particulier de ces matériaux tient vraisemblablement à ceci : du fait de la grande dimension des grains, la continuité entre leurs espaces poreux est imparfaitement assurée, les zones de contact entre grains étant peu nombreuses et de surface limitée ; de ce fait, il n'est pas possible de considérer l'empilement de grains comme un massif poreux continu dans lequel un équilibre pourrait s'établir par transfert d'eau entre les diverses parties de l'espace poral, la loi de sortie d'eau s'appliquant aux limites de chaque grain.

De plus, les espaces entre grains sont trop larges pour rester pleins d'eau, celle-ci étant seulement retenue sous forme de pellicules autour des grains et de ménisques à leurs contacts.

La teneur en eau devrait donc être invariante, or il n'en est rien puisque l'humidité est plus faible à la base du tube qu'à son sommet surtout pour les tubes courts et que la capacité en bac varie parallèlement à l'épaisseur.

Il faudrait faire intervenir des phénomènes se produisant au moment de la sortie des tubes de l'eau, et l'évaporation affectant fortement la répartition d'humidité dans un milieu très ouvert.

CONCLUSIONS.

Les matériaux poreux, dont l'épaisseur est limitée, et pour lesquels aucune succion n'est appliquée aux limites, atteignent assez rapidement, après saturation, une humidité telle que l'écoulement d'eau sous forme liquide cesse pour être remplacé par une évaporation lente. Par analogie avec la capacité au champ, on appelle capacité en bac l'humidité moyenne du matériau au moment de l'établissement du régime lent de perte d'eau. La capacité en bac qui dépend de l'épaisseur du matériau constitue la limite supérieure de l'eau utilisable dans les conditions définies ci-dessus.

L'arrêt de perte d'eau sous forme liquide s'interprète pour une grande partie des matériaux en admettant un état d'équilibre tel que la limite inférieure du corps poreux est saturée en vertu de la loi de sortie d'eau et qu'en chaque point au-dessus de cette limite la valeur du potentiel matriciel est égale et opposée à celle du potentiel gravifique. Ceci implique que, pour une épaisseur donnée, l'humidité décroisse, lorsque la cote comptée par rapport à la base du tube augmente ; de même, la

capacité en bac augmente lorsque l'épaisseur du milieu poreux diminue. Les différences d'humidité au sein d'un même massif poreux et les variations de la capacité en bac avec l'épaisseur sont d'autant plus marquées que l'humidité varie plus avec le potentiel matriciel : ces différences sont en général plus importantes pour les matériaux organiques du genre tourbe retenant beaucoup d'eau que pour les matériaux minéraux du genre terre.

C'est en horticulture que le concept de capacité en bac est apparu, parce que des matériaux poreux très divers (terres, tourbes, mélanges...) y sont utilisés sous une épaisseur réduite de l'ordre du dm. Les conséquences de ce concept interviennent sur la mise en œuvre de ces matériaux, puisque l'humidité, et corrélativement la teneur en air, varient en général avec l'épaisseur de matériau utilisé.

Mais la notion de capacité en bac est à prendre en considération dans d'autres domaines, chaque fois qu'on ne peut admettre qu'un milieu poreux peut être tenu pour semi-infini vers le bas, compte tenu des quantités d'eau qui pénètrent par sa surface : en d'autres termes, l'eau apportée doit parvenir à la limite inférieure du milieu. Nous allons donner quelques exemples de ces domaines.

Dans les cases lysimétriques préalablement saturées, l'humidité moyenne à la cessation de drainage est la capacité en bac, qui varie avec la profondeur de la case. Pour des profondeurs de l'ordre du mètre, la teneur en eau varie peu avec la cote pour les 50 à 60 cm supérieurs ; elle se rapproche de la capacité au champ, sans qu'on puisse l'y assimiler en toute rigueur.

In situ, chaque fois qu'un horizon de surface peu épais repose sur un substrat drainant dépourvu de succion (sable, matière organique grossière, gravier), l'humidité après saturation et ressuyage est la capacité en bac pour l'épaisseur de l'horizon. Cette humidité est supérieure à la capacité au champ du matériau pris sous une grande épaisseur.

Au laboratoire, le drainage libre de terre préalablement saturée permet d'obtenir la capacité en bac sous l'épaisseur considérée ; la capacité au champ ne saurait en aucun cas lui être assimilée.

Enfin, il faut souligner l'importance de la loi de sortie d'eau d'un corps poreux, qui intervient chaque fois que l'eau saturante parvient à la limite inférieure des massifs poreux.

SUMMARY

INFLUENCE OF THE THICKNESS OF POROUS MEDIA ON THEIR RETENTION. CONTAINER CAPACITY

When porous media are saturated with water and left in free drainage, the water flow through the bottom decreases and stops after several hours (fig. I). The average moisture of the medium is then specific.

This average moisture, which is generally decreasing when the thickness of the medium increases (table 2), is therefore typical of the material with a given thickness. We named it container capacity at the given thickness.

Moisture vary in a medium at container capacity and increases generally when one moves toward the bottom of the container (fig. II and III). This feature has been established in lysimeters (fig. IV) also.

This increasing moisture content toward the bottom is explained by the RICHARDS' outflow law and the fact that total water potential is zero. This late hypothesis imply the sum of matric potential and gravific potential is zero.

The container capacity concept is useful in horticulture for growing media, for lysimeters and for thin soils lying on permeable materials with zero suction.

Bibliographie

- BEARDSSELL D.V., NICHOLS D.G. et JONES D.L. (1979) — Physical properties of nursery potting mixtures. *Scientia horticulturae*, 11, 1-8.
- BUNT A.C. (1961). — Some physical properties of peat plant composts and their effect on plant growth : 1. Bulky physical conditions. *Plant and Soil*, 13, 322-323.
- COLMAN E.A. et HAMILTON E.L. (1947). — The San Dimas lysimeters. U.S. Dept of Agric. California Forest and Range Expt. Sta. Research. Note no 47 pt 1 and 2, p. 1-33.
- GRAS R. — Etablissement de la relation potentiel matriciel - humidité par centrifugation. Rapport non publié.
- HANAN J.J. et LANGHANS R.W. (1961). — Soil aeration ; Introduction and characterization of greenhouse soils. *N.Y. State Flower Gro. Bul.* 192 : 1, 6-10.
- LUNT O.R. (1957). — Ornamental crop production. *Calif. Agr.* 11 (4), 15-18.
- LUTHIN J.N. et MILLER R.D. (1953). — Pressure distribution in soil columns draining into the atmosphere. *Soil Sc. Soc. Amer. Proc.* 17, 329-333.
- RICHARDS L.A. (1950). — Laws of soil moisture. *Trans. Amer. Geophys. Union* 31, 750-756.
- RIVIERE L.M. (1980). — Importance des caractéristiques physiques dans le choix des substrats pour les cultures hors-sol. *P.H.M.* n° 209, 23-27.
- SCHAFFER R.J., WALLACE J. et GARWOOD F (1937). — The centrifuge method of investigating the variation of hydrostatic pressure with water content in porous materials. *Trans. Faraday Soc.* 33, 723-734.
- SCHLOESING cité par DEMOLON (1952). — Dynamique du sol. 1 Vol. Dunod. p. 218.
- SPOMER L.A. (1974). — Two classroom exercices demonstrating the pattern of container soil water distribution. *Hort. Science.* 9, 152-153.
- WHITE J.W. (1964). — The concept of « container capacity » and its application to soil moisture fertility regimes in the production of container grown crops. Ph. D. Dissertation. The Pennsylvania State University. University Park. Pa.
- WHITE J.W. et MASTALERZ J.W. (1966). Soil moisture as related to « container capacity ». *Proc. Amer. Soc. Hort. Sc.* 89, 758-765.
- WHITE J.W. (1974). — Criteria for selection of growing media for greenhouse crops. *Florist review.* 28, 74.
- WIDSTOE J.A. et W.W. Mc LAUGHLIN (1912). — The movement of water in irrigated soils. *Utah Agr. Exp. Sta. Bul.* 115, 268 p.
-