

ETUDE, AU MOYEN DE L'EAU TRITIÉE, DE LA CIRCULATION DE L'EAU DANS UN SOL SABLEUX DU SENEGAL

C. CHARREAU ET L. JACQUINOT
INSTITUT DE RECHERCHES AGRONOMIQUES TROPICALES
ET DES CULTURES VIVRIERES, CENTRE DE RECHERCHES
AGRONOMIQUES, BAMBEY, SENEGAL

Abstract — Résumé

THE USE OF TRITIATED WATER TO STUDY WATER CIRCULATION IN A SANDY SOIL IN SENEGAL. The authors have carried out a study in Senegal on the behaviour, with respect to the soil solution, of a flow of water infiltrating a sandy soil under a constant head.

The experimental set-up consisted of a cylindrical lysimeter 2 m high and 1 m in diameter. The initial water content of the soil was increased to near field capacity. A sheet of tritiated water 3 cm deep was then maintained on the soil surface. The drainage water was collected in 5-litre amounts and the radioactivity measured in the laboratory.

The authors first compare the infiltration and drainage rates for dry and wet soil. From examination of the curve showing variations in the concentration of tritiated water in the drainage water as a function of the amount of drainage water it can be seen that the tritiated water begins to appear in the drainage water before the water initially in the soil has been completely replaced. The concentration then increases rapidly and approaches the original value. From the shape of the curve the authors conclude that the soil solution is not immediately displaced in its entirety by the applied water, even in very sandy soil; instead, there is an intermediate phase during which the two solutions present are progressively mixed. This phase involves a total of 102 mm of water, of which 42 mm is tritiated water. The mixing occurs within an 80-cm thick soil layer.

In conclusion, the authors discuss possible agronomic consequences of the processes studied.

ETUDE, AU MOYEN DE L'EAU TRITIÉE, DE LA CIRCULATION DE L'EAU DANS UN SOL SABLEUX DU SENEGAL. Le comportement vis-à-vis de la solution du sol d'un flux aqueux circulant per descensum sous l'effet d'une charge constante a été étudié dans un sol sableux du Sénégal.

Le dispositif expérimental consistait en un lysimètre cylindrique de 2 m de hauteur et 1 m de diamètre. Le stock d'eau du sol a été amené au voisinage de la capacité au champ. Une nappe d'eau tritiée a été ensuite maintenue sur une épaisseur constante de 3 cm au-dessus de la surface du sol. L'eau de drainage a été recueillie par fractions de 5 litres, dont la radioactivité a été mesurée ensuite au laboratoire.

Les auteurs comparent d'abord les débits d'infiltration et de drainage sur le sol sec et sur le sol humide. Ils examinent ensuite la courbe des variations de concentration d'eau tritiée dans l'eau de drainage en fonction des hauteurs d'eau écoulée. De cet examen il ressort que l'eau tritiée commence à apparaître dans l'eau de drainage avant que le stock d'eau initial n'ait été complètement renouvelé. La concentration augmente ensuite rapidement jusqu'à approcher la valeur d'origine. De l'allure de la courbe les auteurs concluent que le déplacement intégral de la solution du sol par l'eau d'infiltration («effet piston») ne s'opère pas immédiatement, même en sol très sableux, mais est précédé d'une phase intermédiaire correspondant au mélange progressif des deux solutions en présence. Dans l'expérience en question, cette phase intéresse une hauteur d'eau globale de 102 mm, dont 42 mm d'eau d'infiltration marquée au tritium. Le mélange s'opère dans une tranche de sol de 80 cm d'épaisseur.

En conclusion quelques conséquences agronomiques pouvant découler des processus préalablement étudiés sont évoquées.

1. INTRODUCTION

Une expérience a été conduite, en case lysimétrique, sur un sol sableux du Sénégal, dans le double but de

- comparer les débits d'infiltration et de drainage sur un sol sec et sur le même sol préalablement humidifié au voisinage de la capacité de rétention,
- examiner le comportement de l'eau d'infiltration par rapport à la solution du sol préexistante et déceler dans quelle mesure il y a mélange entre les deux phases liquides.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

2.1. Le sol

Il s'agit d'un sol ferrugineux tropical faiblement lessivé sur sable, ou sol «Dior», très répandu au Sénégal. Ses propriétés physiques et son comportement vis-à-vis de l'eau ont fait l'objet d'un certain nombre d'études, parmi lesquelles celle de Charreau [1]. Les principales caractéristiques physiques et hydrodynamiques de ce sol figurent dans le tableau I.

La densité apparente varie entre 1,5 et 1,7; la porosité globale entre 36 et 43%. La stabilité de la structure est difficile à mesurer pour des sols aussi sableux: les valeurs de I_s (indice d'instabilité structurale de Henin) sont de l'ordre de 0,5, ce qui laisserait supposer une stabilité assez bonne, alors que les observations de terrain sont en contradiction avec cette hypothèse.

TABLEAU I. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SOL DIOR

Profondeur (cm)	Granulométrie (%)					Capacité au champ (%)	Humidité à pF (%)	
	Sable grossier	Sable fin	Limon	Argile	Argile + limon		3,0	4,2
0 - 5	22,3	73,7	2,0	2,0	4,0	4,38	2,92	1,24
5 - 10	21,1	74,9	1,5	2,5	4,0	4,40	2,93	1,24
10 - 20	22,6	72,4	1,0	4,0	5,0	5,79	3,86	1,68
20 - 40	21,9	71,7	2,5	4,5	7,0	6,28	4,18	1,82
40 - 60	25,0	66,0	1,0	8,0	9,0	6,65	4,43	1,93
60 - 80	22,4	70,1	2,0	5,5	7,5	5,28	3,52	1,53
80 - 100	24,9	68,1	3,0	4,0	7,0	6,01	4,01	1,74
100 - 120	24,3	68,7	1,5	5,5	7,0	5,73	3,82	1,66
120 - 140	22,5	71,5	1,5	4,5	6,0	5,43	3,62	1,57
140 - 160	22,9	71,6	1,0	4,5	5,5	5,79	3,86	1,68
160 - 180	25,2	67,8	2,5	4,5	7,0	5,88	3,92	1,71
180 - 200	25,6	67,9	1,0	5,5	6,5	6,48	4,32	1,88

Les teneurs en carbone sont très faibles et ne dépassent pas 3% en surface. La capacité d'échange est de l'ordre de 2 méq/100 g avec un taux de saturation moyen de 50%. Les pH varient généralement entre 5 et 6.

2.2. Mode opératoire

Vingt-quatre lysimètres sont installés à Bambey, pour la mesure des bilans hydriques et minéraux annuels; nous avons utilisé l'un d'eux pour cette expérience. Il s'agit d'un lysimètre cylindrique de 2 m de hauteur et 1 m de diamètre.

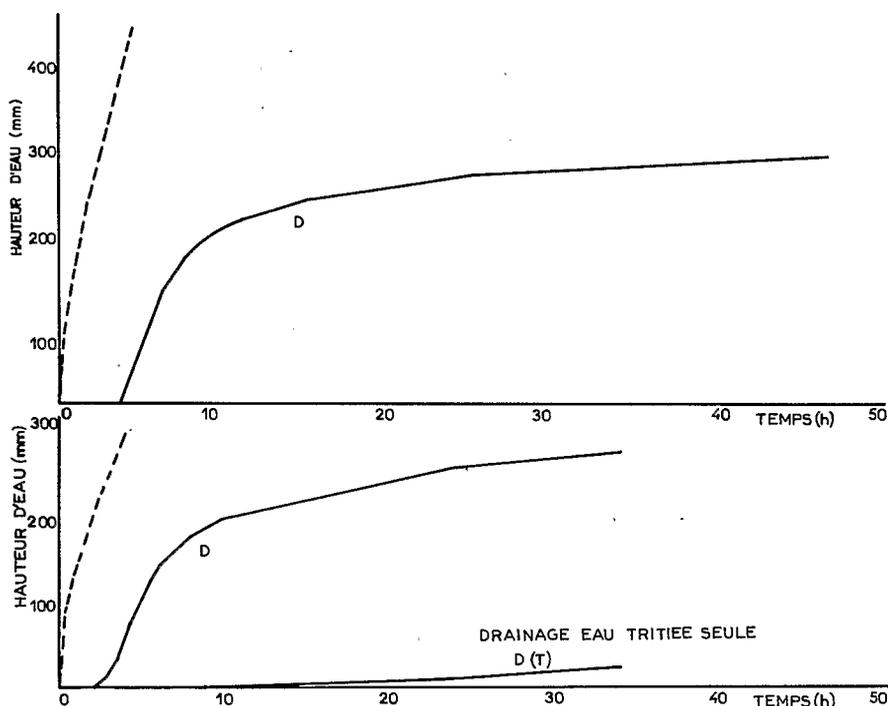


FIG.1. Comparaison des hauteurs d'eau infiltrées (----) et drainées (—) en fonction du temps.

- A. Première mesure (eau pure).
- B. Deuxième mesure (eau tritiée).

Le remplissage du lysimètre a été effectué quatre ans avant l'expérience en question; le profil de sol Dior a été reconstitué horizon par horizon. La rotation suivante a été ensuite appliquée: mil - arachide - sorgho. L'expérience a été réalisée en mars 1964, c'est-à-dire en fin de saison sèche, la récolte du sorgho ayant été effectuée et les pailles enlevées au mois de décembre précédent.

Les opérations suivantes ont été effectuées:

- Arrosage par submersion du sol avec de l'eau pure (distillée) en maintenant une lame d'eau d'une épaisseur constante (3 cm) à la surface du sol; un volume de 370 litres d'eau a été utilisé, correspondant

à une hauteur d'eau de 452 mm. Au cours de cette opération les débits d'infiltration et de drainage ont été mesurés.

- Ressuyage du sol, sous couverture plastique, jusqu'à cessation complète du drainage, soit pendant deux jours.

- Préparation d'une solution d'eau tritiée par mélange de 1,60 Ci d'eau tritiée avec 242 litres d'eau pure (distillée).

- Arrosage par submersion du sol dans les mêmes conditions que précédemment avec mesure des débits d'infiltration et de drainage.

Hauteur d'eau infiltrée: 302 mm.

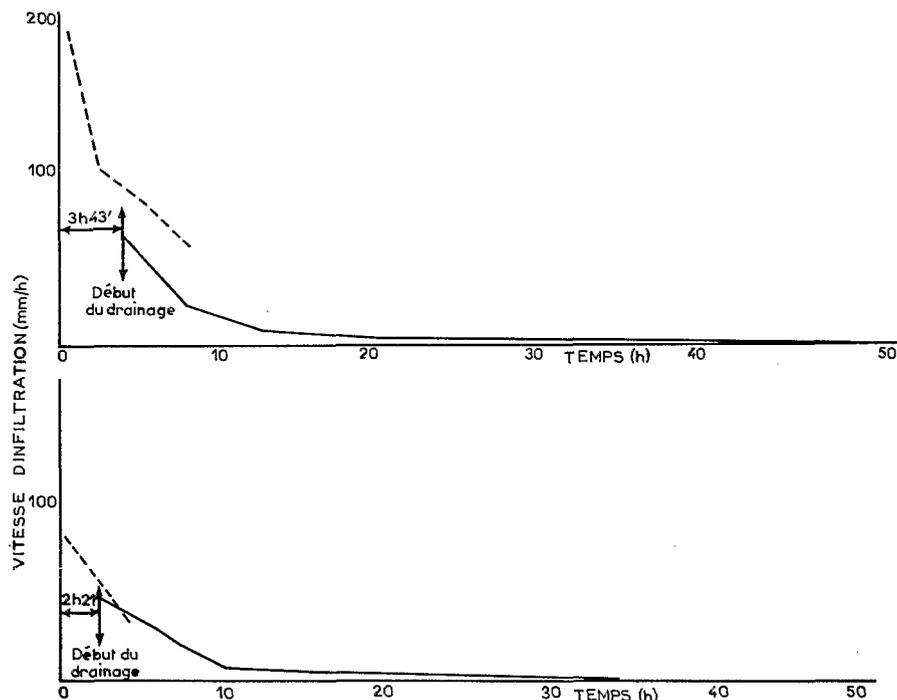


FIG. 2. Variations comparées de la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol et du débit de drainage en fonction du temps.

----- infiltration de l'eau dans le sol; ——— drainage.

A. Première mesure (eau pure).

B. Deuxième mesure (eau tritiée).

Prélèvement des eaux de drainage par fractions de 5 litres: détection de l'eau tritiée d'après la méthode OMS-FAO (rapport technique FAO-OMS n° 173, Rome, 1959) au moyen d'un photomultiplicateur à cuve de quartz et scintillateur liquide.

Le mélange était le suivant: 1 ml d'échantillon, 10 ml d'éthanol absolu, 14 ml de toluène et 50 mg de paradiphényl-oxazol.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

On examinera successivement

- la comparaison des débits d'infiltration et de drainage,

- les relations entre eau d'infiltration et solution du sol préexistante, telles qu'on peut les déduire des variations de concentration de l'eau tritiée dans les eaux de drainage.

3.1. Comparaison des débits d'infiltration et de drainage

Les résultats sont donnés aux figures 1, 2 et 3. La figure 1 permet de comparer les courbes d'infiltration et de drainage correspondant aux deux expériences successives: eau pure et eau tritiée. La courbe D(T) est celle de l'eau tritiée seule.

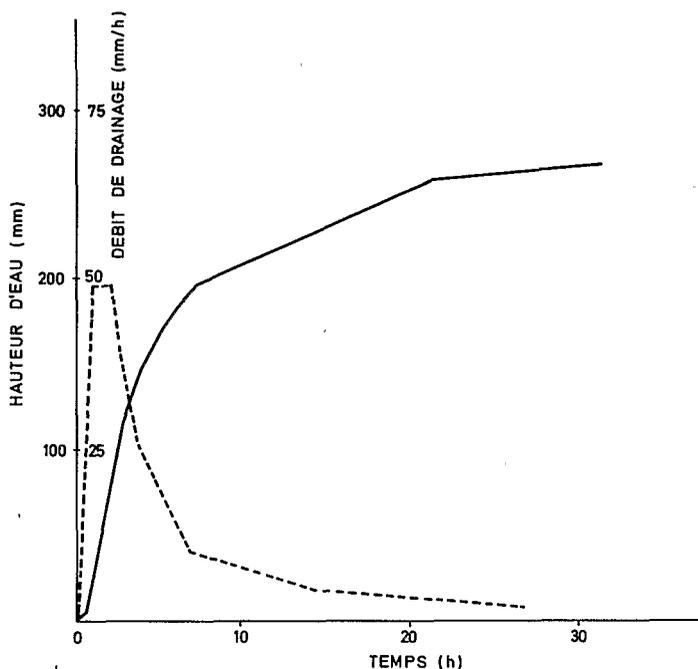


FIG.3. Drainage cumulé (—) et débit de drainage (---) en fonction du temps lors de la seconde mesure (eau tritiée).

La figure 3 montre les courbes de drainage cumulé et de variation de débit du drainage établies au cours de la deuxième mesure: l'échelle a été agrandie de façon à préciser l'allure des variations de débit du drainage pendant les premières heures. Cela n'a pas été possible pour la première expérience, où nous ne disposons pas d'observations suffisamment rapprochées.

3.1.1. Hauteurs d'eau infiltrées et drainées

Au cours de la première mesure, pour une hauteur d'eau infiltrée de 452 mm, 292 mm ont été récupérés dans les eaux de drainage. La différence, soit 160 mm, représente la hauteur d'eau retenue par le sol. Si l'on admet que le stock d'eau restant dans le sol après drainage représente la capacité au champ, le chiffre de 160 mm représente donc le

déficit de rétention du sol jusqu'à 2 m de profondeur à cette époque de l'année. Or les mesures faites au champ indiquent suivant les années et les cultures des valeurs comprises entre 105 et 160 mm, tandis que la capacité de rétention se situe au voisinage de 180 mm pour le sol Dior jusqu'à 2 m de profondeur [1].

On a donc le choix entre deux hypothèses:

- ou bien on se trouvait, au moment de l'expérience, dans un cas extrême (mais possible) de dessèchement et le stock d'eau du sol avant submersion était très faible (de l'ordre de 20 mm);
- ou bien le stock d'eau restant dans le sol après drainage représente davantage que la capacité au champ.

Ainsi que de nombreuses études l'ont montré, cette valeur particulière est en effet difficile à saisir. Feodoroff et Betremieux [2], entre autres, ont mis en évidence l'influence des facteurs extérieurs au sol (intensité et dose d'arrosage) sur l'allure générale de la redistribution de l'humidité du sol et son évolution dans le temps. Il est possible que les conditions de submersion qui ont prévalu dans notre expérience, associant une forte dose d'arrosage à un débit d'infiltration élevé, aient conduit à un stockage d'eau dans le sol plus important que celui correspondant à la véritable capacité au champ. Ces points seront repris plus loin à l'occasion de l'examen des variations de concentration d'eau tritiée dans les eaux de drainage.

Au cours de la deuxième mesure, la hauteur d'eau drainée (281 mm) a correspondu presque entièrement à la hauteur d'eau infiltrée (302 mm).

3.1.2. Comparaison de l'infiltration et du drainage en fonction du temps

L'allure des courbes d'infiltration et celle des courbes de drainage sont nettement différentes, l'amortissement avec le temps étant beaucoup plus marqué pour les secondes.

Dans la première expérience, 452 mm s'infiltrèrent en 4 h 28 min, soit un débit moyen de 101 mm/h; 292 mm drainent en 42 h 45 min, soit un débit moyen de 6,8 mm/h.

Dans la deuxième mesure, l'infiltration est de 302 mm en 4 h, soit 75,5 mm/h en moyenne, et le drainage de 281 mm en 31 h 42 min, soit un débit moyen de 8,9 mm/h.

Le débit de l'infiltration diminue d'une manière constante et assez rapide avec le temps: de 200 à 60 mm/h dans le cas du sol sec, de 90 à 35 mm/h dans le cas du sol préalablement humidifié. Les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que celles qui ont été mesurées en plein champ par la méthode Muntz [1, 3]; toutefois la décroissance des débits en fonction du temps paraît moins accusée en plein champ.

Le débit de drainage présente au contraire une courbe beaucoup moins régulière; si l'on examine la figure 3 concernant le drainage lors de la deuxième expérience, on voit que la courbe des débits comporte quatre phases distinctes:

- une phase d'augmentation rapide pendant la première heure,
- un palier situé au niveau de 50 mm/h pendant la deuxième heure,
- une phase de décroissance rapide qui dure environ 5 h et amène les débits au niveau de 10 mm/h,
- une phase de décroissance lente qui se prolonge jusqu'à la fin du drainage.

Les débits du drainage sont toujours inférieurs à ceux de l'infiltration lors de la première mesure (sol sec); ils leur sont légèrement supérieurs, lors de la deuxième mesure, pendant la période qui correspond à la fin de l'infiltration et au début du drainage.

Le mouvement de descente de l'eau dans le sol sec est très rapide: le délai entre l'application d'eau à la surface du sol et l'apparition du drainage à 2 m de profondeur est de 3 h 43 min dans la première expérience, soit une vitesse de progression du front d'humidité de 54 cm/h. Cette valeur est nettement plus élevée que celles qui ont été observées dans les mêmes conditions d'humidité sur le sol en place et qui sont de l'ordre de 5 à 10 cm/h [1]. Elle est également plus forte que les valeurs théoriques maximales trouvées par Feodoroff [4] pour la progression du front d'humidité en sol sableux sec soumis à de fortes intensités d'arrosage (24 cm/h). Ces différences peuvent tenir aux conditions particulières de l'expérience (possibilité d'un cheminement préférentiel de l'eau le long des parois du lysimètre).

En ce qui concerne le sol préalablement humidifié au voisinage de la capacité au champ, le délai entre le début de la submersion et le début du drainage à 2 m de profondeur est de 2 h 21 min, soit une vitesse de transmission du mouvement dynamique de descente de l'eau de 85 cm/h. Mais les premières traces d'eau tritiée ne sont décelées dans l'eau de drainage que 9 h 10 min après le début de la submersion. Les molécules de l'eau d'infiltration ne progressent donc dans le sol qu'à la vitesse maximale de 22 cm/h.

3.2. Relations entre l'eau d'infiltration et la solution du sol

Pour étudier ces relations, il est nécessaire que l'une ou l'autre des deux solutions soit marquée de façon que son déplacement et sa répartition puissent être suivis. La préférence a été donnée ici au marquage de l'eau d'infiltration. Le problème qui se pose ensuite est celui du choix du traceur.

3.2.1. Choix du traceur

Le traceur peut être un élément quelconque, radioactif ou non, pourvu qu'il soit absent du sol étudié ou, du moins, s'y trouve en quantité négligeable. Il doit également satisfaire aux deux exigences suivantes:

- la diffusion propre du traceur doit être négligeable, le traceur devant se déplacer avec sa solution,
- l'interaction du traceur avec le sol doit être la plus faible possible.

Un certain nombre d'études peuvent fournir des éléments de réponse à ces questions. Wang et al. [5] ont mesuré la diffusion de l'eau tritiée dans l'eau pure et ont trouvé une valeur de $2,44 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Nakayama et Jackson [6] ont mesuré le coefficient apparent de diffusion de l'eau tritiée dans divers matériaux (billes de verre, gel d'agar-agar) et dans différents sols. Les valeurs dans les sols s'étagent entre $0,87$ et $1,14 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, lorsque le sol est saturé d'eau; elles peuvent toutefois être multipliées par 3 lorsque la teneur en eau du sol est faible. Rachinskii [7], étudiant les échanges isotopiques d'hydrogène dans le sol, dans des conditions statiques puis dans des conditions dynamiques, conclut que la sorption du tritium est peu importante et que

cet élément peut donc être utilisé comme indicateur d'eau dans les recherches sur les relations sol-eau; cependant la vitesse moyenne du mouvement d'eau marquée au tritium serait de 10% inférieure à la vitesse moyenne d'un courant d'eau dans le sol, à cause du processus de sorption d'isotopes échangeables. Corey et Kirkham [8] ont comparé, dans différentes conditions expérimentales, l'utilisation de solutions de nitrates et d'eau tritiée en tant que traceurs. Dans toutes les expériences auxquelles ils ont procédé, et qui comportaient, après passage sur les sols des solutions de traceurs, le lessivage par un éluant, le tritium a été récupéré intégralement dans les eaux de drainage, ce qui n'a pas toujours été le cas pour le nitrate.

De toutes ces études il ressort que l'eau tritiée paraît bien satisfaire aux conditions fixées plus haut et qu'elle constitue un traceur de choix pour l'étude des relations sol-eau. Par ailleurs, l'eau tritiée présentait dans notre cas particulier un avantage supplémentaire: celui de sa neutralité vis-à-vis du sol, du point de vue physico-chimique; cela permettait, une fois l'expérience terminée, d'utiliser à nouveau le sol placé dans le lysimètre pour d'autres études (mesure des bilans hydriques et minéraux annuels).

3.2.2. Représentation théorique du phénomène

Le comportement de l'eau d'infiltration vis-à-vis de la solution du sol, lorsque celui-ci a été préalablement amené au voisinage de la capacité de rétention, peut s'imaginer de deux façons différentes, illustrées schématiquement de la manière suivante (voir fig. 4):

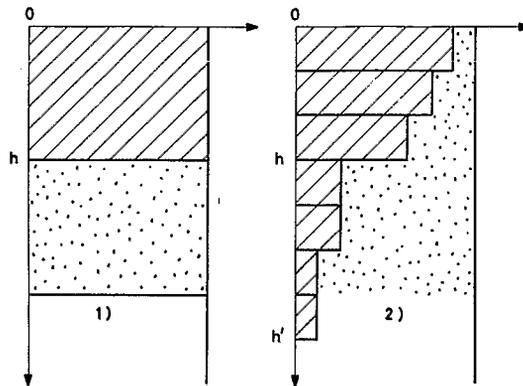


FIG. 4. Représentation schématique de la distribution de l'eau d'infiltration dans le sol:

1) dans l'hypothèse de l'effet piston intégral;

2) dans l'hypothèse du mélange des phases.

▨ eau d'infiltration; ▤ solution du sol préexistante de l'horizon 0-h.

Soit V un volume de solution du sol occupant une certaine fraction des pores du sol (correspondant à la capacité de rétention) sur une hauteur h et une section S .

Si l'on applique, en submersion, un même volume d'eau à la surface du sol, on peut trouver après infiltration deux types de distribution possibles pour l'eau d'infiltration dans la colonne de sol:

- ou bien cette eau d'infiltration a chassé devant elle, à la manière d'un piston, la solution du sol préexistante et a pris sa place dans le sol sur la hauteur h (en supposant que le taux d'humidité n'a pas varié);
- ou bien un mélange se produit entre les deux phases liquides et une partie de l'eau d'infiltration atteint une profondeur h' supérieure à h .

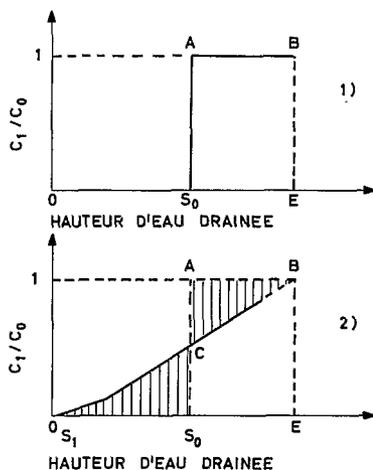


FIG. 5. Représentation schématique des variations de concentration du traceur dans l'eau de drainage:
 1) dans l'hypothèse de l'effet piston intégral;
 2) dans l'hypothèse du mélange des phases.

Pour étudier ce comportement, il est nécessaire d'arroser la colonne de terre avec de l'eau marquée. On peut ensuite, soit rechercher dans la colonne la répartition du traceur et celle de l'eau ou, s'il y a drainage, suivre les variations de concentration du traceur dans l'eau de drainage en fonction du temps, soit poursuivre l'arrosage avec un éluant et procéder comme précédemment. Beaucoup d'auteurs ont adopté la deuxième formule.

Pour des raisons de commodité, nous nous sommes arrêtés à la première, en étudiant les variations de concentration du tritium dans les eaux de drainage en fonction du temps, sans examiner sa répartition dans la colonne de terre.

Dans ce dernier cas, les représentations théoriques des variations de concentration du traceur dans l'eau de drainage en fonction des hauteurs d'eau drainées peuvent être schématisées comme le montre la figure 5. Sur ces modèles on a porté en ordonnée les valeurs du rapport C_1/C_0 , où C_1 représente la concentration du traceur dans l'eau de drainage et C_0 la concentration dans la solution d'origine, et en abscisse les hauteurs d'eau drainées.

Dans l'hypothèse de l'effet piston intégral, le traceur apparaît brutalement dans les eaux de drainage avec sa concentration d'origine au moment précis où la hauteur d'eau écoulée correspond au stock d'eau initial S_0 . La courbe des variations de concentration suit le trajet S_0 -A-B.

Dans l'hypothèse du mélange des phases, le traceur apparaît dans l'eau de drainage avant que le stock d'eau initial n'ait été complètement renouvelé, soit en S_1 . La concentration de l'eau de drainage est égale à celle de la solution d'origine. La courbe suit le trajet S_1 -C-B.

Les surfaces S_0 ABE et S_1 CBE représentent respectivement les quantités de traceur trouvées dans les eaux de drainage, pour un même volume de drainage (E) dans la première et dans la seconde hypothèse.

Si l'on admet remplies les conditions suivantes: stock d'eau dans le sol identique avant et après drainage (voisin de la capacité de rétention), non-rétention du traceur par le sol, les concentrations de traceur dans les eaux de drainage doivent être égales à partir du moment où ces eaux ont la même concentration en traceur que la solution d'origine. En d'autres termes, les surfaces S_0 ABE et S_1 CBE doivent être équivalentes. Comme ces surfaces comportent une partie commune: S_0 CBE, il s'ensuit que les aires hachurées S_1 CS₀ et ACB doivent être aussi égales.

En fait, il semble bien que le modèle 1 (effet piston intégral) doive être considéré comme purement théorique: si faible soit-elle, une certaine diffusion se produit inévitablement entre les deux phases liquides en présence.

C'est ce que montrent divers travaux utilisant des voies expérimentales très diverses: entre autres, les travaux anciens de Schlaesing cité par Demolon [9], et ceux plus récents de Feodoroff [4] et Corey et Kirkham [8]. Ces derniers auteurs ont opéré non seulement sur des sols mais aussi sur des matériaux inertes (billes de verre). Ils ont montré que, même dans ces conditions, il n'y avait pas d'effet piston intégral mais qu'un certain mélange entre les deux phases liquides se produisait au cours de l'infiltration.

Le modèle 2 (mélange des phases) représente donc le cas général. Mais, suivant les conditions expérimentales (nature du sol, humidité initiale, débit d'arrosage ou d'infiltration), les courbes S_1 CB pourront présenter des allures très diverses. Le mélange des phases sera d'autant plus important que l'écart entre S_1 et S_0 sera plus grand et que la courbe présentera une pente générale plus faible. En sens inverse, l'effet piston sera d'autant plus prononcé que l'écart entre S_1 CB se rapprochera davantage de la verticale.

La longueur du segment S_1 E représente la hauteur d'eau intéressée par le mélange des phases, avant que l'eau d'infiltration n'ait remplacé la solution du sol. Connaissant la teneur en eau du sol, on peut faire correspondre à cette hauteur d'eau une profondeur de sol. Par le calcul de la surface S_1 BE on peut connaître la quantité d'eau marquée intéressée par le mélange des phases.

3.2.3. Résultats expérimentaux (tableau II)

Comme on peut le constater, le traceur est apparu dans l'eau de drainage après qu'une hauteur d'eau de 194 mm eut été recueillie. La concentration augmente ensuite assez rapidement jusqu'à une valeur maximale de 70% de la concentration de la solution d'origine. Il est regrettable que les derniers prélèvements aient été trop espacés et que, par ailleurs, la hauteur d'eau infiltrée ait été insuffisante pour retrouver la concentration originelle.

TABLEAU II. RESULTATS DE MESURE DE RADIOACTIVITE SUR LES EAUX DE DRAINAGE

N° de prélèvement	Fraction du drainage		Comptage net/30 s	Rapport C_1/C_0
	En volume (litres)	En hauteur d'eau (mm)		
Solution d'origine	-	-	212 000	1,00
1	0 - 5	0 - 6	0	0,00
.....
31	150 - 155	188 - 194	0	0,00
32	155 - 160	194 - 200	200	0,01
33	160 - 210	200 - 262	39 000	0,18
34	210 - 225	262 - 282	147 000	0,70

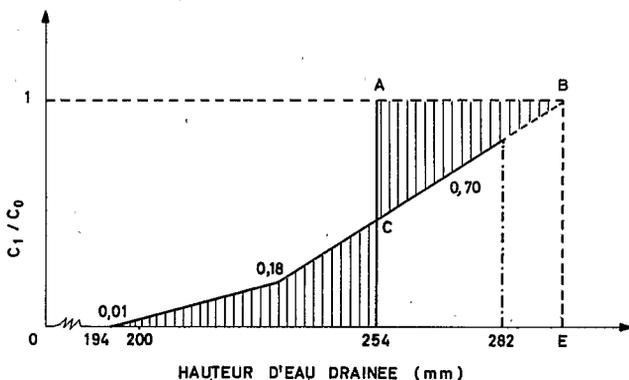


FIG. 6. Variations de concentration de l'eau tritiée dans l'eau de drainage en fonction des hauteurs d'eau écoulées.

Malgré ces imperfections expérimentales, il est possible, cependant, de tracer la courbe des variations de concentration relative de l'eau tritiée dans l'eau de drainage en fonction des hauteurs d'eau écoulées (fig. 6).

Cette courbe a été extrapolée jusqu'au point B où l'on doit, en principe, retrouver la concentration originelle. La courbe expérimentale ainsi obtenue offre une grande similitude avec la courbe théorique de l'hypothèse 2 (mélange des phases, fig. 5).

L'interprétation qui avait été proposée plus haut paraît pouvoir s'appliquer ici. Les deux conditions préalables semblent bien en effet remplies :

- le stock d'eau du sol n'a pratiquement pas varié entre le début de l'infiltration et la fin du drainage puisque la hauteur d'eau drainée est presque équivalente à la hauteur d'eau infiltrée;

- d'après les études citées plus haut il est fort peu probable qu'une quantité appréciable d'eau tritiée correspondant au volume drainé ait été retenue par le sol dans les conditions où s'est déroulée l'expérimentation (débit important, temps très bref).

En recherchant la position du point S_0 , stock d'eau initial, d'après les principes énoncés plus haut, c'est-à-dire de telle manière que les surfaces S_1CS_0 et ACB soient équivalentes, on trouve une valeur de 254 mm. Cette valeur est nettement supérieure à celle de 176 mm trouvée pour la capacité de rétention par mesure directe au champ sur le même sol. Les erreurs de mesure ne peuvent expliquer un écart aussi grand. On est ainsi conduit à admettre que le stock d'eau du sol après cessation du drainage se trouve être nettement supérieur à celui correspondant à la capacité au champ. Il s'agirait ici d'un état de pseudo-équilibre, consécutif à un débit d'infiltration très important. Cela rejoint les observations de Feodoroff [4] selon lesquelles le stock d'eau du sol augmente avec les débits d'arrosage, cela entraînant comme corollaire que la mesure de la capacité au champ ne peut se réaliser après application d'une seule dose d'irrigation.

Sur ces bases, le stock d'eau préexistant dans le sol avant l'expérience serait de $254 - 160 = 94$ mm (160 mm représentant la hauteur d'eau retenue par le sol après la première mesure). Le déficit de rétention serait donc de $176 - 94 = 82$ mm.

Cette dernière valeur est assez faible pour l'époque de l'année considérée, mais cependant plausible. Il est naturellement regrettable que les conditions particulières dans lesquelles s'est déroulée l'expérience n'aient pas permis d'effectuer une mesure in situ du déficit de rétention initial.

En ce qui concerne la distribution de l'eau d'infiltration dans le sol on peut, sur les mêmes bases, calculer la hauteur d'eau correspondant au mélange des phases. Celle-ci se trouve être de $296 - 194 = 102$ mm. Si l'on admet que les 254 mm représentant le stock d'eau du sol sont répartis uniformément sur 2 m de profondeur, cette hauteur d'eau de 102 mm correspond à une tranche de sol de 80 cm d'épaisseur. Le calcul de la surface S_1BE permet d'estimer à 42 mm la hauteur d'eau tritiée mélangée à la solution du sol (soit 14% de l'eau tritiée infiltrée).

On peut considérer que le fait d'avoir opéré sur un sol très sableux avec des débits d'infiltration importants favorisait pleinement la manifestation de l'effet piston et s'étonner de ce que les hauteurs d'eau et de sol intéressées par le mélange de phases soient aussi grandes. Cela rejoint pourtant les observations faites sur le même sol par Blondel [10] suivant en plein champ, à la suite d'application de pluies artificielles, la migration en profondeur de nitrates initialement apportés à la surface du sol. Cet auteur constate que, lorsque le sol a été préalablement humidifié au voisinage de la capacité de rétention, une pluie de 10 mm entraîne une partie des nitrates à plus de 20 cm de profondeur alors que si l'effet piston avait été intégral la totalité des nitrates aurait dû rester dans l'horizon 0 - 10 cm. Bien que des calculs précis n'aient pas été effectués, on peut estimer à environ 40% la proportion de nitrates entraînés en dessous de la limite théorique.

Même en sol très sableux, les phénomènes de diffusion et de mélange des phases liquides seraient donc loin d'être négligeables.

4. CONCLUSIONS

Il n'est pas inintéressant pour l'agronome de pouvoir apprécier, après un arrosage naturel (pluie) ou artificiel (irrigation), la distribution de l'eau d'infiltration dans le sol et ses rapports avec la solution du sol préexistante. De cette appréciation dépend en effet pour une grande part celle de la migration des sols solubles et de leur répartition dans le profil après arrosage. On conçoit que cela revête une certaine importance pour la nutrition minérale des plantes et son amélioration possible par le perfectionnement des techniques d'épandage d'engrais solubles (fractionnement, localisation, etc.).

Cette connaissance est également utile dans un autre domaine: celui de la mise en valeur des sols salés, qui occupent de vastes superficies au Sénégal. Dans le cas le plus répandu ici où lessivage et drainage du sol sont pratiquement impossibles à réaliser, la réussite de la culture dépend essentiellement du degré de dessalement par l'eau de pluie ou de ruissellement de l'horizon superficiel du sol et de la possibilité de maintien, en superposition, de la lame d'eau douce sur la nappe salée. Il s'agit là encore du problème du rapport de deux phases liquides dans le sol. Dans le cas plus favorable où le lessivage préalable est possible, il est important de prévoir dans quelle mesure et sur quelle profondeur la solution préexistante du sol aura été remplacée par l'eau d'arrosage.

C'est dans le but de tenter d'apporter une réponse à ces diverses questions que l'expérience décrite a été mise sur pied. Les résultats obtenus ne fournissent, bien sûr, qu'une réponse très partielle aux questions posées. Il serait nécessaire de corriger les insuffisances expérimentales et d'étudier systématiquement l'influence des principaux facteurs (nature du sol, taux d'humidité, débit d'arrosage) sur l'allure du phénomène.

Par sa facilité d'emploi, la commodité et la sensibilité de sa mesure, sa neutralité vis-à-vis du sol, l'eau tritiée paraît être le traceur de choix pour ce genre d'études.

REFERENCES

- [1] CHARREAU, C., Dynamique de l'eau dans deux sols du Sénégal, Agr. Trop. 5 (sept.-oct.1961) 504-61.
- [2] FEODOROFF, A., BETREMIEUX, R., Une méthode de laboratoire pour la détermination de la capacité au champ, Sci. Sol (2^e sem.1964) 109-18.
- [3] BONFILS, P., FAURE, J., Etude comparative des sols du C.R.A. de Bambey, Annals CRA Bambey (1955) 5-24.
- [4] FEODOROFF, A., Etude 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, Annals Agron. XVI 2 et 3 (1965) 127-76 et 231-64.
- [5] WANG, J.H., ROBINSON, C.V., EDELMAN, I.S., Self-diffusion and structure of liquid water: III. Measurement of the self-diffusion of liquid water with H², H³ and O¹⁸ as tracers, J. Am. chem. Soc. 75 (1953) 466-70.
- [6] NAKAYAMA, F.S., JACKSON, R.D., Diffusion of tritiated water in soils, Proc. Soil Sci. Soc. Am. (1963) 255-58.
- [7] RACHINSKII, V.V., Etude de l'interaction de l'eau marquée au tritium avec les sols, I. Effets isotopiques lors de la sorption par les sols de l'eau marquée au tritium, Izv. timiryazev. sel'.-khoz. Akad.1 (1965) 133-44; ibid. II. Conférence, Izv. timiryazev. sel'.-khoz. Akad.3 (1965) 218-36.

- [8] COREY, J. C., KIRKHAM, D., "Miscible displacement of ^{15}N -tagged nitrate and tritiated water in water-saturated and water-unsaturated soil", *Isotopes and Radiation in Soil-Plant Nutrition Studies*, IAEA, Vienna (1965) 157-70.
- [9] DEMOLON, A., *Dynamique du sol*, Dunod, Paris (1952) 322-51.
- [10] BLONDEL, D., *Premiers résultats sur la dynamique de l'azote dans deux sols du Sénégal*, Rapport miméogr. IRAT/Sénégal (1967) 36-37.

DISCUSSION

U. ZIMMERMANN: These experiments are very interesting and provide further proof of the layered water movement in soils. I think it would be useful to carry out a similar experiment with tritiated water in dry soil; this would produce rather interesting results, since the conditions would be extreme.

With regard to the molecular diffusion of water in soils, I cannot agree with the statement in Section 3.2.1 of your paper that the molecular diffusion coefficients of tritiated water are about three times higher in unsaturated than in saturated soils. The molecular diffusion coefficients in saturated soils are 20-30% smaller in saturated soils than in free water, because of the resistance caused by bottlenecks in the soil. In unsaturated soils one obtains about the same diffusion coefficient values as in saturated soils. But here we have different mechanism, the diffusion coefficient depending in this case on diffusion in the liquid phase, the absorbed phase and the gaseous phase. Moreover, the tortuosity of the pathways plays a role.

M. HAJDUKOVIĆ: I find your nitrogen leaching somewhat high in the light of results obtained by Broeshart and Aleksić at the International Atomic Energy Agency's laboratory at Seibersdorf. They have found a high rate of nitrogen volatilization caused by intense micro-organism activity. I am surprised that, with the high temperatures dominating in your experiments, as much as 40% of the nitrogen was leached.

L. JACQUINOT: The results mentioned in the paper relate to an experiment performed during the very short wet season, when surface evaporation is virtually zero. We did not observe any nitrates emerging at the surface or, because of the short duration of the experiment, any nitrogen volatilization. The leaching of nitrates is a common phenomenon in these soils, particularly at the beginning of the rainy season.

J. MARCESSE: I should simply like to point out that the fact that drainage has ceased does not mean that the soil has attained field capacity. Observations *in situ* have shown that filtration occurs at an extremely slow rate below this value.

leds

Reprint from

"ISOTOPE AND RADIATION TECHNIQUES
IN SOIL PHYSICS AND IRRIGATION STUDIES"

Charreau (C.) Jaquinot (L.)

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
VIENNA, 1967

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

Collection de Référence

n° 13834

- 3 MARS 1970