

Extrait de la publication no. 63 de l'A.I.H.S.  
Symposium Eaux de Surface, pp. 442-453

**QUELQUES RELATIONS ENTRE PLUIE,  
RUISSELLEMENT ET INFILTRATION  
OBTENUES EN LABORATOIRE  
SUR DES SOLS INITIALEMENT SECS**

**Ch. RIOU**

Chargé de recherches à l'ORSTOM<sup>(1)</sup>  
Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie  
Laboratoire de Bioclimatologie

**RÉSUMÉ**

L'étude de l'infiltration sur des colonnes verticales de terre sèche, auxquelles on applique une charge d'eau, conduit à une formule simple qui traduit bien le phénomène.

Plusieurs auteurs ont d'ailleurs été conduits à la même formule à partir d'expériences sur des colonnes horizontales de terre. Dans les deux cas, seule la pression de succion au niveau du front d'humectation semble intervenir dans la circulation de l'eau.

Cette formule a été appliquée ici pour évaluer l'infiltration obtenue à la suite d'une aspersion de très fines gouttelettes d'eau, sur des colonnes de terre sèche, inclinées, et sur lesquelles on peut ainsi noter avec précision le début du ruissellement. Elle a conduit à des relations simples, en accord avec l'expérience, entre la hauteur d'eau infiltrée, le temps et l'intensité de l'aspersion.

Ces relations permettent d'évaluer le temps écoulé avant l'apparition du ruissellement et la quantité d'eau infiltrée, quand on poursuit l'aspersion après le ruissellement.

Dans un troisième temps, les colonnes de terre ont été soumises à une pluie simulée, dont les gouttes, douées d'une certaine énergie cinétique, provoquent des modifications dans la structure de la couche superficielle du sol. Pour les terres argileuses, les résultats obtenus mettent en évidence des écarts importants avec les formules établies précédemment, notamment une très nette diminution de la quantité d'eau infiltrée.

**ABSTRACT**

Study of infiltration into vertical dry soil columns under hydraulic charge leads

tration de la pluie. Les travaux présentés ici ont pour but de préciser ces observations. Nous avons utilisé trois procédés expérimentaux :

- infiltration d'une lame d'eau libre sur une colonne de terre.
- Aspersion avec une intensité connue, de très fines gouttelettes, pratiquement sans énergie.
- Application d'une pluie simulée, d'intensité connue, et douée d'une certaine énergie cinétique.

## 2. INFILTRATION D'UNE LAME D'EAU LIBRE

### 2.1. Méthode

Elle est simple et connue. Deux tubes de verre de 24 cm<sup>2</sup> de section et 50 cm de long, sont placés l'un au-dessus de l'autre, le tube supérieur contient l'eau, l'autre la terre homogénéisée et tassée aussi régulièrement que possible. Les deux tubes sont gradués de manière à suivre dans le temps, la hauteur d'eau infiltrée et la progression du front d'humectation.

Un dispositif «Vase de Mariotte» permet de maintenir une charge d'eau constante. Enfin le tube contenant la terre est ouvert à son extrémité inférieure pour permettre le libre écoulement de l'air.

Nous avons utilisé plusieurs types de terre :

- un sable moyen (1),
- un sable fin (2),
- différentes fractions de sol limono-argileux séparées par tamisage,
- agrégats de diamètre compris entre 0,5 et 2 mm,
- agrégats de diamètre compris entre 0,2 et 0,5 mm,
- micro-agrégats de diamètre moyen inférieur à 0,2 mm.

Le dessèchement était effectué suivant le cas à l'air libre ou à l'étuve.

### 2.2. Résultats

Pour toutes les terres utilisées, il apparaît une relation entre la hauteur d'eau infiltrée  $I$  et le temps  $t$  de la forme.

$$I = a\sqrt{t} + b$$

$a$  est un coefficient qui varie avec le type de terre,  $b$  est un paramètre pratiquement constant pour une charge donnée, et peu différent de celle-ci. L'origine des temps est en effet choisie avant la mise en communication des deux tubes, et  $b$  correspond à l'eau écoulée pour l'établissement de la charge. Si l'on passe à la profondeur  $Z$  du front d'humectation, on trouve une relation de la même forme

$$Z = \alpha\sqrt{t} + \beta$$

$\beta$  est ici pratiquement nul. Le rapport  $a/\alpha$  représente la porosité.

En fait ces relations sont très étroites jusqu'à une profondeur  $Z_0$  du front d'humectation variant avec  $a$ . Ensuite  $Z$  augmente plus vite que prévu. Pour le sable (1)  $Z_0$  est de l'ordre de 30 cm. Pour ce même sable initialement à 4% de taux d'humidité.  $Z_0$  n'est plus que de 15 cm,  $a$  étant diminué de 40%.

Enfin nous avons fait varier la charge d'eau au-dessus de la terre, de 1 à 8 cm, sans modifier les coefficients  $a$  et  $\alpha$ . Dans les limites de l'expérience, la charge paraît donc être sans influence sur l'infiltration.

### 2.3. *Interprétation*

KIRKHAM et FENG en 1949 utilisant des colonnes horizontales de terre ont trouvé des relations identiques. Par la suite SWARTZENDRUBER et ses collaborateurs ont

### 3. ASPERSION DE FINES GOUTTELETTES

#### 3.1. Méthode

Elle consiste à projeter sur la surface de très fines gouttelettes d'eau, d'une très faible énergie cinétique, obtenues par pulvérisation.

La terre est placée dans des tubes de 39 cm<sup>2</sup> de section inclinés à 45° de manière à noter avec précision le début du ruissellement  $t_0$ . L'extrémité inférieure du tube est en communication avec l'air.

L'intensité  $p$  de l'aspersion sur la colonne de terre est mesurée, en pesant le tube aussitôt le ruissellement apparu, ce qui nous donne la hauteur d'eau infiltrée  $I_0$ .

Nous avons ainsi  $p = I_0/t_0$  on a vérifié par ailleurs que  $p$  restait constant dans le temps. Nous avons utilisé les mêmes terres que précédemment.

#### 3.2. Hypothèse préalable

Nous avons supposé qu'une intensité  $p$  d'aspersion inférieure à la vitesse d'infiltration initiale théorique ne modifiait pas la forme des profils hydriques, obtenus dans les expériences précédentes, et qu'il existait la même relation entre la hauteur d'eau infiltrée et la position du front d'humectation, que dans les cas de l'infiltration d'une lame d'eau libre.

Ceci admis, si nous reprenons la formule établie précédemment :

$$I = a'\sqrt{t} + b'$$

On en déduit la vitesse d'infiltration

$$v = \frac{dI}{dt}$$
$$v = \frac{a'}{2\sqrt{t}}$$

Et en négligeant  $b'$  qui est ici pratiquement nul

$$v = \frac{a'^2}{2I}$$

Cette dernière expression ne préjuge pas de la relation entre  $I$  et  $t$ .

Nous avons supposé qu'elle reste valable dans les conditions de l'expérience.

Au moment  $t_0$  du ruissellement la vitesse d'infiltration est égale à l'intensité  $p$  de l'aspersion et  $I = pt_0$ .

On a donc :

$$p = \frac{a'^2}{2pt_0}$$
$$P\sqrt{t_0} = \frac{a'}{\sqrt{2}}$$

Autrement dit, si notre hypothèse est valable, on doit trouver, pour une terre donnée, un produit  $p\sqrt{t_0}$  constant quelque soit  $p$ .

#### 3.3. Résultats

Ils sont conformes aux prévisions, comme le montre le tableau I.

D'autre part une fois le ruissellement commencé, la nature du sol devient le seul facteur limitant l'entrée de l'eau. Pour tenir compte de la première phase de l'infiltra-

tion ou  $v = p$ , il suffit d'introduire un paramètre,  $\varphi$  représentant un temps fictif tel que nous ayons.

$$I = A \sqrt{t - \varphi}$$

La condition à la limite impose :

$$I(t_0) = pt_0 = A\sqrt{t_0 - \varphi}$$

avec

$$A = p \sqrt{2t_0}.$$

Ce qui donne :

$$\varphi = \frac{t_0}{2}$$

TABLEAU I

Terre utilisée	$P$ cm/min.	$t_0$ min - sec.	$p\sqrt{t_0} = a'/\sqrt{2}$
Sable fin	0.33	27.18	1.86
	0.55	11.47	1.89
	1.66	1.10	1.79
Terre limono-argileuse	0.14	22.18	0.66
	0.33	3.00	0.67
	1	0.25	0.65
Fraction comprise entre 0,2 et 0,5 mm	0.34	9	1.02
	0.40	7.46	1.12
	0.52	4.42	1.13
	0.95	1.18	1.08

Nous avons prolongé l'aspersion, après le ruissellement et suivi l'évolution de  $I$  en fonction du temps, par pesées successives des colonnes de terre. Les résultats sont en bon accord avec la relation.

$$I = A\sqrt{t - t_0/2}$$

Pour mettre ceci en évidence, il suffit de porter sur un diagramme  $I^2$  en fonction de  $t$ . On trouve une droite de pente  $K$  et qui coupe l'axe des  $t$  en  $t'$ . Il suffit alors de comparer  $a'^2 = 2p^2t_0$  et  $K$ ,  $t'$  et  $t_0/2$  qui doivent être identiques.

TABLEAU II

	$P$ cm/min.	$t'$ min. sec.	$t_0/2$	$K$	$a'^2$
Sable fin	0.66	2.30	2.22	4.30	4.12
Fractions limono- argileuses	0.71	2.40	2.30	5.30	5.80
	0.495	6.30	6.25	6.40	6.25
	0.40	3.42	3.53	2.40	2.50

On tire immédiatement des relations précédentes la vitesse d'infiltration après le début du ruissellement :

$$v = \frac{a'}{2\sqrt{t - t_0}}$$

$v$  dépend donc indirectement de l'intensité de l'aspersion, par l'intermédiaire de

$$t_0 = \frac{a'^2}{2p^2}$$

#### 3.4. Interprétation

Ces résultats mettent encore ici l'accent sur l'influence de la pression de succion au niveau du front d'humectation. La vitesse d'infiltration reste une fonction de la profondeur humectée. Les profils hydriques évoluent encore suivant le schéma donné par BODMAN et COLMAN, montrant l'extension d'une « zone de transmission » à humidité constante, limitée par un front d'humectation commandant le phénomène.

Ceci va permettre d'interpréter un résultat qui peut paraître paradoxal.

Si nous procédons à une aspersion sur une colonne de sable surmontée d'une couche de 2 cm de limon, tout se passe pratiquement comme si la couche superficielle limoneuse n'intervenait pas. En effet, le front d'humectation pénètre dans le limon, avec une vitesse constante liée à l'intensité  $p$  de l'aspersion (0,54 cm/mm ici). Il atteint la limite sable-limon sans que la vitesse théorique d'infiltration du limon s'abaisse jusqu'à  $p$ . Le front d'humectation progresse ensuite dans le sable et c'est au niveau du sable, que la vitesse théorique d'infiltration continuant à diminuer atteint  $p$ . Finalement la couche la plus « imperméable » a été sans effet.

La très fine pluie utilisée est évidemment différente des pluies réelles, et il nous a paru nécessaire de répéter ces expériences avec des gouttes douées d'une énergie cinétique plus importante, capables de modifier la structure du sol.

### 4. INFILTRATION ET RUISSELLEMENT OBTENUS SOUS UNE PLUIE SIMULÉE

#### 4.1. Méthode

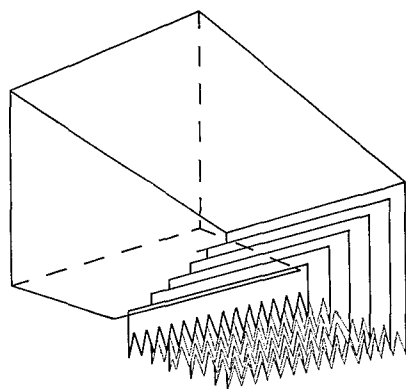
Le simulateur de pluie (Fig. 1) utilisé ici est d'un type nouveau dont la qualité essentielle est la simplicité et la facilité de mise en œuvre. Grâce à de l'air comprimé on envoie de l'eau pulvérisée sur des lames dentées à leur bord inférieur et placées en escalier, les unes derrière les autres. L'eau glisse sur les lames, s'accumule sur les pointes et tombe sous forme de gouttes. La variation de pression de l'air comprimé permet de modifier l'intensité de la pluie de 40 à 600 mm/heure. Les dents des lames sont telles que les gouttes ont environ 3 mm de diamètre. Leur énergie dépend de la hauteur de chute. Dans les expériences nous avons adopté une hauteur de 1 mètre. L'énergie d'une goutte est alors voisine de l'énergie terminale d'une goutte de pluie de 2 mm de diamètre.

#### 4.2. Résultats

Pour les sables, comme on pouvait l'attendre les résultats sont identiques à ceux des expériences précédentes. Il n'y a pas de modifications de structure en surface et l'infiltration n'est pas modifiée.

Pour les fractions limono-argileuses, les résultats sont très différents. Nous avons groupé dans le tableau (3), le temps  $t_0$  du bout duquel le ruissellement apparaît, en regard des intensités  $p$  utilisées nous y avons porté également quelques valeurs  $t'_0$  tirées des expériences précédentes d'aspersion de fines gouttelettes.

Le produit  $p\sqrt{t_0}$  n'est plus constant mais varie de 0,53 pour la plus forte valeur de  $p$  à 0,31 pour les faibles valeurs de  $p$ . Pour la même terre, l'aspersion fine donnant  $p\sqrt{t_0} = 1,1$ .



DETAIL DU SIMULATEUR DE PLUIE

Fig. 1

TABLEAU III

*Sol limono-argileux fraction comprise entre 0,2 et 0,5 mm*

$P$ cm/ min.	$t_0$ (min. sec.)	$t'_0$ (min. sec.) aspersion fines gouttelettes
0.097	10.05	
0.14	6.36	62
0.18	4.45	
0.28	2.00	
0.42	1.10	6.51
0.48	0.54	
0.62	0.39	3.08
0.75	0.27	
0.84	0.23	1.43

D'autre part, si l'on maintient la pluie après le début du ruissellement, l'infiltration qui suit est également beaucoup plus faible que dans le cas de l'aspersion de fines gouttelettes. Après 20 minutes de pluie  $I$  est de 1,7 cm au lieu de 6,7 cm pour l'aspersion. La quantité d'eau infiltrée ne varie guère pour les différentes intensités utilisées.

Ces résultats conduisent à supposer que ce n'est plus au niveau du front d'humectation, mais au niveau de la surface que s'exerce le «frein» à l'infiltration. Ils rejoignent des résultats obtenus sur des sols saturés par Mc INTYRE qui a mis en évidence la formation d'une fine couche de 0,1 mm d'épaisseur, abaissant la perméabilité et formée à la suite de pluie de 65 mm/heure.

TABLEAU IV

$P$ cm/min.	hauteur/d'eau 1 cm infiltrée après 20 minutes de pluie
0.097	1.55
0.14	2.10
0.45	1.50
0.54	1.65
0.88	1.70

Cette croûte surmonte une couche de 2,5 mm dont la porosité a été fortement réduite. A. R. BERTRAND et KAMIL SOR ont également mis en évidence des modifications de la couche 0-1,5 cm, maxima pour une pluie de 70 mm/heure, au bout de 30 minutes d'application. La couche 1,5-3 cm présentait aussi une compacité plus forte.

Pour mettre en évidence, l'influence de la surface, nous avons fait deux expériences avec les sols suivants :

- 1) couche de 2 cm de limon sur du sable,
- 2) couche de 2 cm de sable sur du limon.

L'expérience (1) donne les mêmes résultats qu'une colonne de limon, bien que le front d'humectation au moment du ruissellement ait largement pénétré dans le sable.

L'expérience 2 au contraire, donne des résultats à peu près identiques à ceux obtenus par aspersion de fines gouttelettes sur le limon.

TABLEAU V

Expérience	$P$ cm/min.	$t_0$ min. sec.	$p\sqrt{t_0}$
1	0.47	0.53	0.44
	Hauteur d'eau infiltrée au bout de		15 min. 1.7 cm
2	0.47	4.34	1.03
	Hauteur d'eau infiltrée au bout de		20 mm 5.3 cm.

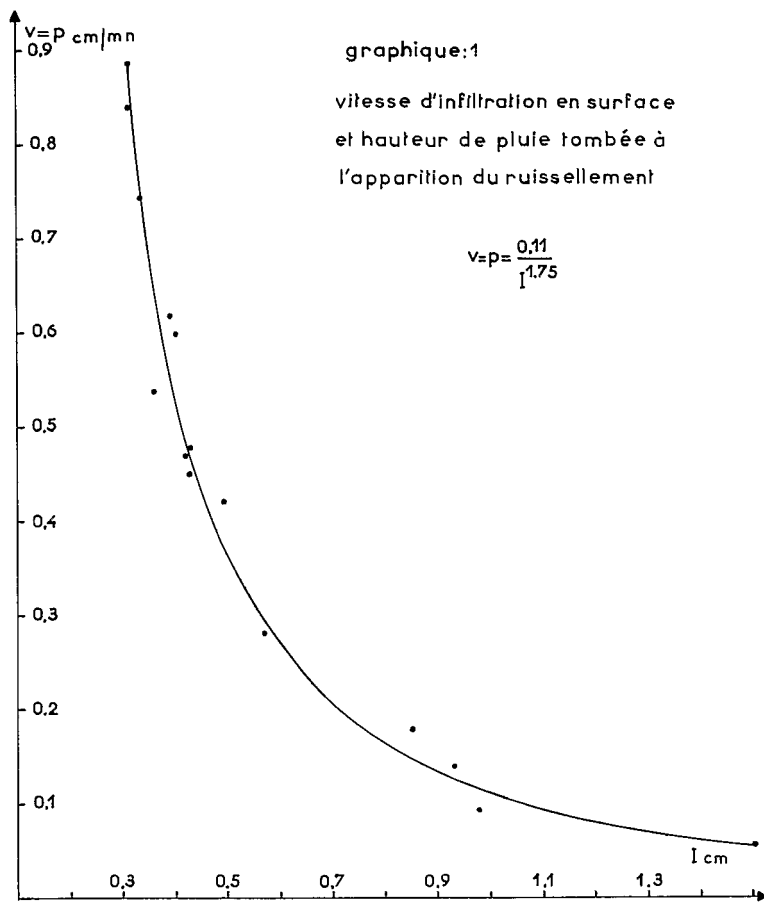
Ces deux expériences traduisent l'influence déterminante de la tranche superficielle du sol sur l'infiltration des pluies à forte énergie cinétique, contrairement à ce qui a été observé dans le cas de l'aspersion de fines gouttelettes. Les processus de pénétration de l'eau sont donc très différents dans les deux cas.

Elles indiquent également qu'en protégeant la surface du sol, on peut améliorer la pénétration de l'eau.

La relation entre  $p$  et  $I$  au moment du ruissellement ne traduit plus ici l'influence de la pression de succion, mais la vitesse de pénétration de l'eau en surface en regard de la hauteur de pluie tombée. (Graph. I).



La courbe  $p = f(I)$  montre l'évolution de cette vitesse, le ruissellement se produit en effet quand la vitesse de pénétration de l'eau en surface atteint  $p$ . On voit que  $v$  décroît d'abord rapidement, puis diminue lentement en tendant vers 0. Les études de Mc INTYRE, KAMIL SOR et BERTRAND sur la perméabilité de la couche superficielle montrent que celle-ci évolue de la même façon.



Graphique 1 — Vitesse d'infiltration en surface et hauteur de pluie tombée à l'apparition du ruissellement.

##### 5. ÉVOLUTION DE LA SURFACE DU SOL SOUS L'INFLUENCE DES ALTERNANCES D'HUMECTATION ET DE DESSICATION

Nous avons appliqué les techniques précédemment décrites pour évaluer l'effet des cycles humectation dessication humectation sur l'entrée de l'eau. La méthode consiste à arrêter l'aspersion au moment où le ruissellement apparaît sur la colonne de terre. Par la suite on soumet cette colonne à une évaporation intense (ventilation + chauffage), pour la ramener à son poids initial et on recommence l'aspersion. On peut

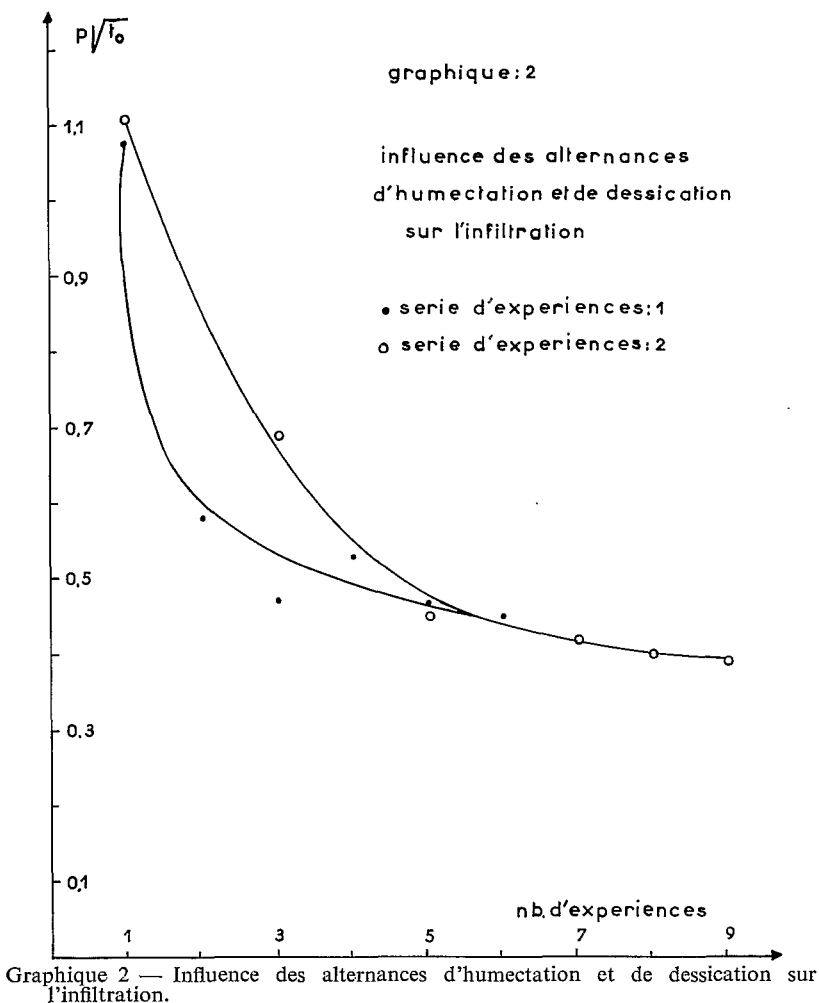
suivre ainsi la variation du produit  $p\sqrt{t_0}$  qui nous donne l'ordre de grandeur de l'infiltration. Nous avons appliqué cette technique à 2 types de terre, en utilisant l'aspersion de fines gouttelettes et une pluie simulée de faible énergie cinétique pour ne pas faire intervenir la destruction de la structure sous le choc des gouttes.

*Série d'expériences 1*

- Fraction limono-argileuses, agrégats compris entre 0,2 et 0,5 mm de diamètre.
- Pluie simulée, gouttes 3 mm de diamètre, hauteur de chute 25 cm intensité 0,85 cm/min. (510 mm/heure).

*Série d'expériences 2*

- Sol limono-argileux.
  - Pulvérisation de fines gouttelettes. Intensité 0,55 cm/min. (330 mm/heure).
- Entre les 2 premières aspersions (Exp 1 et 3) une humectation était réalisée par les



## 6. CONCLUSION

Les résultats font apparaître l'importance de l'énergie cinétique de la pluie pour l'infiltration. D'une façon plus générale on voit que les études traditionnelles sur l'infiltration qui concernent la pénétration d'une lame d'eau libre ne sont pas directement utilisables pour évaluer la pénétration des pluies. Celle-ci dépend à la fois du sol, et de la manière dont l'eau arrive sur le sol. C'est là un point important qui n'est pas toujours présent à l'esprit des hydrologues ou des agronomes.

Les résultats trouvés permettent de préciser quelques points, en ce qui concerne les sols «secs».

1) Pour une pluie à faible énergie cinétique, la pénétration de l'eau est d'abord déterminée uniquement par la succion au niveau du front d'humectation. Il existe alors une bonne relation entre l'intensité de la pluie, l'apparition du ruissellement,

et la hauteur d'eau infiltrée. Cette relation fait apparaître un paramètre lié au sol plus représentatif que le coefficient de DARCY, valable en milieu saturé.

2) Pour les sols limono-argileux l'alternance des humectations et des dessèchements entraîne cependant la formation d'une couche superficielle dégradée, qui réduit fortement la pénétration de l'eau.

3) Pour ces sols, les pluies à forte énergie cinétique modifient la couche superficielle, et c'est cette dernière qui limite la pénétration de l'eau. Une protection de la surface du sol (couche de sable, végétation) en supprimant ce processus peut améliorer considérablement l'infiltration.

Ces résultats trouvés dans le cadre du laboratoire ne sont pas directement utilisables pour des études hydrologiques qui sont d'une toute autre échelle. Ils rejoignent cependant les préoccupations de nombreux hydrologues qui étudient la capacité d'infiltration qui n'est autre que la vitesse  $v$  d'infiltration des expériences. D'autres hydrologues s'attachent à l'étude de la capacité d'absorption, et de la précipitation limite donnant lieu à un ruissellement (BOUCHARDEAU et RODIER). Enfin, des études localisées (petit bassin versant, parcelle d'expérimentation) se rapprochent des conditions du laboratoire. Les résultats obtenus pourraient alors permettre d'éclairer certains points. C'est là leur ambition.

#### BIBLIOGRAPHIE

- A. R. BERTRAND & KAMIL SOR: The effects of rainfall intensity on soil structure and migration of colloid materials in soils. *Soil Science Society of America proceedings*. Vol. 26 — Mai-Juin 1962.
- G. B. BODMAN et E. A. COLMAN : Moisture and energy conditions during downward entry of water into moist and layered soils. *Soil. Science Society America — Proc.* 9 (1944).
- A. BOUCHARDEAU & J. RODIER : Nouvelle méthode de détermination de la capacité d'absorption en terrains perméables. S.H.F. No 1, 1960.
- A. FEODOROFF : Influence des propriétés structurales sur la pénétration de l'eau dans un sol sec. *C.R. Académie d'Agriculture de France*, No 4, 1961.
- V. E. HANSEN : Infiltration and soil water movement during irrigation. *Soil Science*, No 79, 1955.
- KAMIL SOR & A. R. BERTRAND : Effects of rainfall energy on the permeability of soils. *Soil Science Society of America Proc.* 26, N° 3, 1962.
- KIRKHAM & FENG : Somme tests of the diffusion theory and laws of capillary flow in soils. *Soil Science* 67, — 1949.
- A. N. KOSTIAKOV : On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Trans. G.H. Comm. ISSS 5 Russian part A*) 1932.
- J. LETEY, J. OSBORN & R. E. PELISHEK : Measurement of liquid — solid contact angles in soil and sand. *Soil. Science*, March 1962, Vol 93, No 3.
- D. S. MC INTYRE : Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Science*, Vol. 85 — Avril 1958 — No 4.
- B. J. MASON : The physics of clouds — *Oxford monographs on météorology*.
- J. R. PHILIP : The theory of infiltration. *Soil Science* 83-84, 1957.
- G. REMENIERAS : L'hydrologie de l'ingénieur — *Eyrolles* — Paris.
- A. E. SCHEIDEGGER : The physics of flow through porous media, 1957.
- D. SWARTZENDRUBER : D. M. F.. DE BOODT & D. KIRKHAM : Capillary intake rate of water and soil structure. *Soil Science, Society America Proc.* 18 — 1954.
- J. VESSELING : Principales of the insaturated flow and their application to the penetration of moisture into the soil. *Technical bulletin* 23 — 1961. Wageningen.