

# Pour une théorie modifiée de l'infiltration

## I<sup>re</sup> partie : pourquoi ?

Hubert J. MOREL-SEYTOUX

Chargé de Recherches au C.N.R.S.,  
Université Scientifique et Médicale de Grenoble  
et Professeur de Génie civil à l'Université d'Etat  
du Colorado, Fort-Collins (Colorado)

### RÉSUMÉ

*L'auteur passe en revue des résultats expérimentaux et des observations sur le terrain qui montrent que la présence de l'air peut réduire considérablement l'infiltration. Cette réduction peut résulter de la compressibilité de l'air, ou de sa résistance visqueuse, ou encore de la pression capillaire d'entrée. Il montre que la théorie traditionnelle, c'est-à-dire l'équation de Richards ne saurait rendre compte de ces effets.*

### ABSTRACT

*Published laboratory and field results are reviewed and they show that air effects can reduce infiltration rates considerably. Air compressibility, its viscous resistance or the capillary entry pressure will separately or jointly produce this reduction. These effects cannot be modeled with the traditional theory, i. e. with Richards' or the diffusivity equation.*

Dans une série d'articles sur la théorie de l'infiltration, et d'une manière générale sur la théorie de l'écoulement en milieu poreux non saturé, un certain nombre de questions vont être soulevées. Le titre même de cet article indique que l'on sent un besoin de changement dans l'approche traditionnelle, mais que ce changement n'est pas considéré comme révolutionnaire. Malgré tout, comme des modifications, même parfaitement justifiées, peuvent parfois soulever de vives résistances, il a paru sage de répondre d'abord à la question : pourquoi? Est-il, sinon nécessaire, du moins souhaitable de traiter le problème de l'infiltration d'une manière plus complète et plus rigoureuse en introduisant l'effet de l'air? D'abord il est bon de rappeler que la formulation théorique courante ne tient pas compte de cet effet. Cet aspect est exposé dans les passages sur l'« Insuffisance de la Théorie Traditionnelle » et la « Dérivation Traditionnelle de l'Equation de Richards ». Il va de soi que la critique est facile et que, de toute manière, même une nouvelle théorie ne sera pas complète. Il fallait donc s'attacher à montrer que l'effet d'air est important et que sa prise en compte est le raffinement le plus urgent dans la théorie. C'est pourquoi on a rassemblé, dans le paragraphe sur l'« Importance de la Présence de l'Air sur l'Infiltration », un ensemble de résultats d'expérience assez probants.

« Si le lecteur est convaincu, il s'intéressera sans doute à un autre article traitant de la deuxième question : Comment ? »

### 1. INSUFFISANCE DE LA THÉORIE TRADITIONNELLE

la pression de l'air dans le milieu poreux est partout et en tout temps égale à la pression atmosphérique ambiante, ce qui ne peut être. Malheureusement les mots-clés du conte de fée « il était une fois », qui préviennent l'adulte et l'enfant de ne plus se préoccuper désormais de la vraisemblance du récit, n'apparaissent plus dans les articles. Bien au contraire, ces articles prennent les équations de Richards, ou de la diffusivité, comme le point de départ incontesté de la vérité sur l'infiltration. Depuis Richards, qui lui était parfaitement conscient de l'hypothèse simplificatrice faite (Richards, 1931), le ton a changé. On est aujourd'hui plus dogmatique : « au commencement était l'équation de Richards ».

Ces propos peuvent paraître exagérés, et en fait ils le sont. Néanmoins, que le lecteur prenne la peine de consulter des ouvrages récents, par exemple le livre de HILLEL (1971) et les chapitres de SWARTZENDRUBER (DE WIEST, 1969) et de PHILIP (CROW, 1969). Il est constaté que l'on a déduit toujours le mouvement de l'eau par rapport à la pression de l'eau par rapport à l'atmosphère et non par rapport à la pression de l'air dans le sol (HILLEL, 1971, p. 57, 76 ; SWARTZENDRUBER, 1969, p. 218 ; PHILIP, 1969, p. 220) et que, dans la dérivation de l'équation de Richards, l'hypothèse de l'uniformité et de la constance de la pression de l'air n'est pas même mentionnée (HILLEL, 1971, pp. 109-113 ; SWARTZENDRUBER, 1969, p. 222 ; PHILIP, 1969, pp. 220-222).

Il va de soi que des chercheurs aussi réputés que par exemple PHILIP, HILLEL et SWARTZENDRUBER sont, eux, conscients de l'hypothèse simplificatrice faite, même s'ils la passent sous silence dans leurs dérivations. C'est particulièrement clair chez PHILIP (1969, pp. 226-227) qui dit : « L'analyse développée dans la section II.C néglige tout effet occasionné par la présence de différences de pression dans l'air du sol. » Philip pense que, dans la plupart des applications, cet effet est sans importance car « les différences de pression dans l'air du sol sont trivialement faibles » (1). Cependant, ajoute-t-il, « Ces considérations ne semblent pas être en général de bien grande importance en pratique, bien que, comme l'auteur le sait par expérience personnelle dans la *Riverina d'Australie*, des empêchements à l'échappée de l'air peuvent avoir un effet sur l'infiltration dans des zones inondées de grande surface. En fait, les pressions de l'air du sol peuvent devenir suffisamment élevées au point de soulever la chaussée des routes traversant les régions inondées » (1) (PHILIP, 1969, p. 227). Pour PHILIP donc, en résumé, les effets d'air ne sont pas assez importants en général et en pratique pour que l'on s'en préoccupe.

HILLEL (1971, p. 243) reconnaît que dans l'équation de Richards « plusieurs mécanismes n'ont pas été considérés et que, pour dire que cette équation simule l'écoulement de l'eau dans le sol, il faut accepter des hypothèses supplémentaires », entre autres : « que l'air s'échappe librement et instantanément du système au fur et à mesure que l'eau s'y accumule » (1). Pour HILLEL, il n'y a pas de justification rationnelle pour cette hypothèse sinon « que l'on ne sait pas encore à l'heure actuelle comment simuler cet effet » (1) (HILLEL, 1971, p. 243).

En résumé on n'a pas étudié jusqu'à maintenant l'effet de l'écoulement de l'air sur l'infiltration pour deux raisons : d'abord on pense que ce n'est pas en général important, ensuite on ne sait comment s'y prendre. Avant d'exposer une théorie nouvelle de l'infiltration qui tient compte de l'écoulement de l'air, il serait bon de montrer rapidement que les deux raisons invoquées ci-dessus ne sont pas ou ne sont plus valables.

## 2. IMPORTANCE DE LA PRÉSENCE DE L'AIR SUR L'INFILTRATION

L'influence de la phase air sur la capacité du sol à absorber l'eau disponible en surface a été mise en évidence

par des expériences (FREE et PALMER, 1940 ; HORTON, 1940 ; WILSON et LUTIN, 1965 ; PECK, 1965 ; KUTLER, 1970 ; VACHAUD et al., 1973), et par des observations et même des mesures sur le terrain (FEODOROFF, 1966 ; DIXON et LINDEN, 1972).

Les résultats des modèles mathématiques sont suspects car ils dépendent des hypothèses du modèle. On peut donc toujours contester leur valeur.

Les mesures sur le terrain sont difficiles, plus sujettes à erreurs que les mesures faites en laboratoire, et leur interprétation est délicate car beaucoup de variables ne peuvent être contrôlées efficacement sur le terrain. Au contraire, les mesures en laboratoire sont précises, les conditions de l'expérience sont en général bien définies et l'interprétation des résultats est donc relativement aisée. Pour ces raisons, il paraît logique de passer d'abord en revue les résultats de laboratoire.

Dans leur introduction, FREE et PALMER (1940) indiquent la raison pour laquelle ils se sont intéressés à la question de la relation entre l'infiltration et le mouvement de l'air : « La croyance que le mouvement de l'air ait un effet important semble largement répandue. Cependant, il existe peu de données expérimentales relatives à l'effet du piégeage et du cheminement de l'air sur le mouvement de l'eau, et il en existe encore moins sur l'importance pratique du problème » (1) (FREE et PALMER, 1940, p. 390). À la fin de l'article, les deux auteurs concluent : « Les résultats expérimentaux montrent que la plupart des conditions sur le terrain considérées comme responsables d'écoulements de surface excessifs coïncident avec les conditions qui, dans notre étude, rendaient difficile le mouvement et l'échappement de l'air » (1) (FREE et PALMER, 1940, p. 398).

Du point de vue quantitatif, l'étude de FREE et PALMER sur des colonnes de sable de 57 cm de hauteur a montré « qu'il fallait 10 à 100 fois plus longtemps pour humidifier des colonnes fermées à la base que des colonnes ouvertes (1) » (FREE et PALMER, 1940, p. 395).

(1) Traduction libre par l'auteur de cet article.

HORTON (1940) ne pense pas au départ que l'effet d'air soit important : « On a prétendu, en particulier des hommes de science russes, que la compression de l'air dans le sol peut réduire ou même arrêter l'infiltration sur de grandes étendues, notamment sur les terrains de steppe plats. L'auteur n'a pas encore, quant à lui, trouvé un exemple authentique de ce phénomène aux Etats-Unis » (1) (HORTON, 1940, p. 412). Pourtant, de tous les effets passés en revue par HORTON et pouvant influencer ce qu'il appelle la « capacité d'infiltration » (un concept assez mal défini), pratiquement le seul pour lequel il soit passé de l'hypothèse spéculative à la mesure, est justement l'effet d'air. A la suite de ses expériences faites sur des sols comprenant 25% (en poids) de limon fin et 75% de sable fin dans des bocaux en verre de 5 pouces (12,5 cm) de diamètre et 8 pouces (20 cm) de hauteur, il constate que :

« Dans la seconde expérience, avec des tubes capillaires perforant dans le sol une lame d'eau de 1/4 de pouce (6 mm) d'air à travers la lame d'eau en surface » (de hauteur constante d'environ un quart de pouce soit 6 mm) ou sur le périmètre, la pression de l'air dans le sol resta à zéro pendant toute l'expérience et la capacité d'infiltration augmenta substantiellement, étant, à la fin de l'expérience « (80 minutes) » environ deux fois plus forte que dans l'expérience sans provision pour échappée d'air » (1) (HORTON, 1940, p. 414).

Le résultat de l'expérience d'HORTON sur l'effet d'air est d'autant plus troublant que, si l'on compare la figure 1 (la figure 6 dans l'article d'HORTON, p. 414) et la figure 2 (également la figure 2 dans l'article d'HORTON, p. 405),

surface sous la pique dans l'essai initial et plus en profondeur dans l'essai humide, invoquée par HORTON.

Coïncidence supplémentaire : noter que la capacité d'infiltration finale dans l'essai initial est justement environ deux fois plus forte que dans l'essai humide !

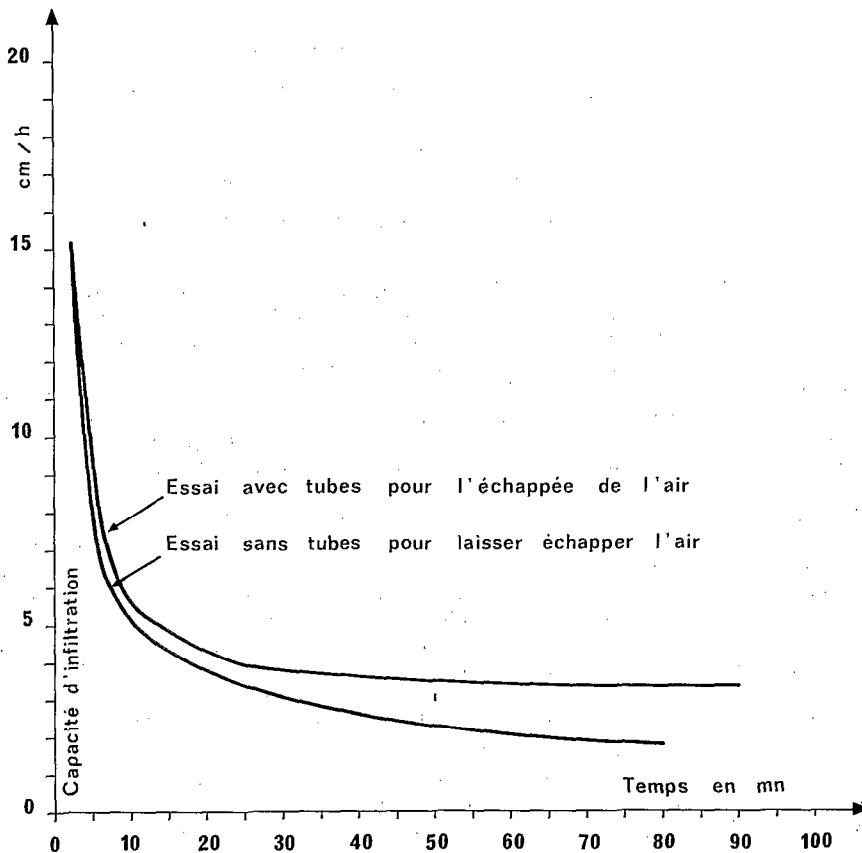


Fig. 1 — Courbes de capacité d'infiltration avec ou sans tubes pour laisser l'air s'échapper (d'après Horton, 1940)

(1) Traduction libre par l'auteur de cet article.

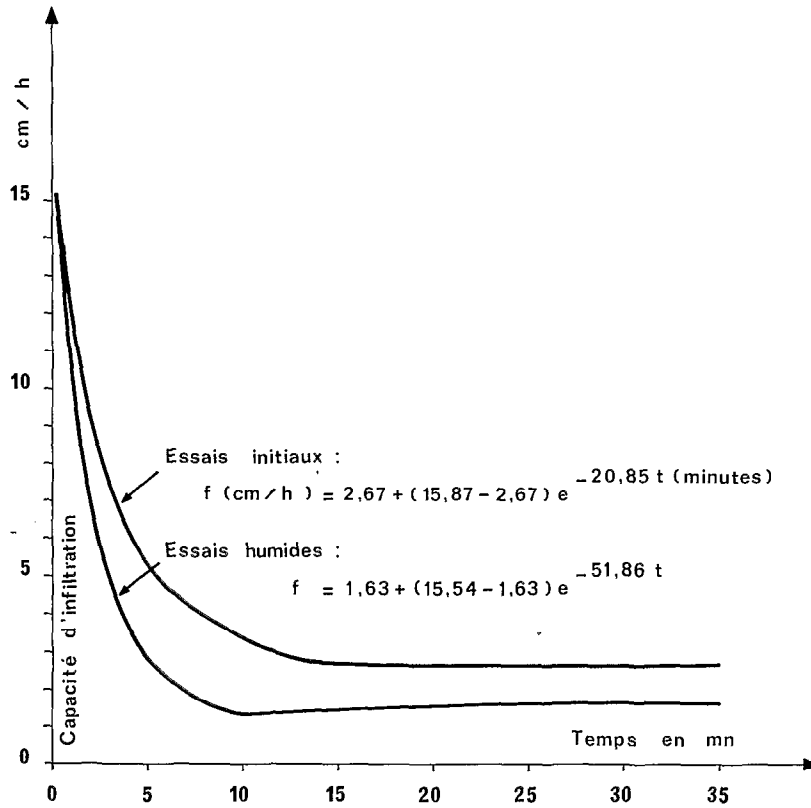


Fig. 2 — Courbes de capacité d'infiltration pour essais initiaux et humides, sols d'Arizona (d'après Horton, 1940)

Bien des années plus tard, WILSON et LUTHIN (1963) s'inquiètent à nouveau de ce que « les analyses théoriques de l'infiltration négligent l'influence de l'air sur l'avance du front d'humectation. On suppose usuellement que l'air s'échappe sans difficulté et qu'il reste à la pression atmosphérique. On suppose également que la viscosité et la densité de l'air sont négligeables en comparaison de celles de l'eau » (1) (WILSON et LUTHIN, 1963, p. 136). Ils font des expériences pour démontrer l'effet de l'air sur l'infiltration dans des colonnes de sol horizontales. Pour cela, ils effectuent quatre types d'expérience d'imbibition : des expériences sur colonnes homogènes, des expériences sur colonnes hétérogènes (le sol en aval étant 40 ou 88 fois moins perméable que le sol en amont), des expériences sur des colonnes homogènes et fermées en bout et des expériences pendant lesquelles la pression de l'air juste à l'aval du front d'eau est maintenue égale à celle de l'atmosphère. Sur des colonnes de 31 cm de longueur, au bout de 15 minutes l'infiltration est pour les colonnes homogènes, hétérogènes (rapport de perméabilités de 40 et 88) et fermées, respectivement égale à : 2, 1,5, 1,3 et 0,5 cm<sup>3</sup>/min. L'effet d'air a donc, dans ces différents cas, réduit l'infiltration dans des rapports de l'ordre des 3/4, des 2/3 et du 1/4, respectivement. Ces réductions sont considérables. Si le cas de la colonne fermée est extrême, les cas des colonnes hétérogènes mais ouvertes semblent eux bien réalistes. Comme le disent WILSON et LUTHIN, « L'usage de la théorie de la diffusion devient encore moins valable quand on l'applique à un sol stratifié ou de perméabilité à l'air décroissante avec la profondeur. Et pourtant, c'est justement cette condition qui prévaut d'habitude sur le terrain. Dans la plupart des sols, la perméabilité à l'air décroît avec la profondeur. Ce peut être dû à la genèse naturelle du sol (stratification) ou à des accroissements de teneur en eau, ou même encore à la présence d'une nappe phréatique » (1) (WILSON et LUTHIN, 1963, p. 142).

Peu après WILSON et LUTHIN, PECK (1965) a fait des expériences d'infiltration sur des colonnes verticales fermées en bout. Comme FREE, PALMER et HORTON avant lui, PECK s'intéresse essentiellement à un seul aspect de l'effet d'air sur l'infiltration : la résistance à l'infiltration due à la compression de l'air piégé. C'est pourquoi, il simule des hauteurs de colonne de 133, 332 et 490 cm par des réservoirs d'air placés en bout d'une colonne relativement courte (environ 30 cm). WILSON et LUTHIN s'étaient eux, intéressés en plus, et même surtout, à un autre aspect de l'effet d'air sur l'infiltration : la résistance à l'infiltration due à la résistance visqueuse au cheminement de l'air.

(1) Traduction libre par l'auteur de cet article.

Cet aspect n'est pas proprement pris en compte dans les expériences de PECK. Cependant, il faut noter que pour cette raison les résultats de PECK donneront des valeurs d'infiltration supérieures (donc optimistes) à celles qu'on obtiendrait sur des colonnes réelles de même hauteur. Or PECK dit dans son résumé : « avec la poussière d'ardoise, les débits d'infiltration étaient réduits par un facteur allant jusqu'à 9 dans les colonnes fermées, une valeur qui se situe dans la gamme des résultats déjà publiés. Dans le sable, par contre, on a observé un facteur de 500, qui est de loin supérieur à toute valeur publiée précédemment et illustre le phénomène de « solidification » apparente de l'eau dans ce matériel » (1) (PECK, 1965, p. 50). Les résultats optimistes (!) de PECK montrent bien à quel point la présence de l'air influe sur l'infiltration.

Peu après, et au cours d'expériences fort semblables, ADRIAN et FRANZINI (1966) ont trouvé que « dans certaines conditions, c'est-à-dire si le milieu poreux est constitué par les particules assez fines, l'accroissement de pression peut effectivement arrêter l'infiltration » (1) (ADRIAN et FRANZINI, 1966, p. 586). Il ne s'agit donc pas d'une réduction de l'infiltration, mais bien de son arrêt complet.

Comme WILSON et LUTHIN, KURAZ et KUTILEK (1970) ne sont pas satisfaits des hypothèses habituelles de la théorie de l'infiltration : « Toutes les équations qui ont été développées et tous les calculs qui ont été faits considèrent l'infiltration dans un profil de teneur en eau initial uniforme. La situation rencontrée le plus fréquemment en pratique ne peut être considérée même grossièrement comme une condition de teneur en eau constante, surtout dans les zones climatiques tempérées » (1) (KURAZ et KUTILEK, 1970, p. 184). Pour mieux comprendre les conditions d'infiltration sur le terrain, KURAZ et KUTILEK entreprirent des expériences d'infiltration sur une colonne verticale dont la teneur en eau initiale croît avec la profondeur. Notons au passage que, dans les expériences de tous les autres auteurs cités précédemment (FREE et PALMER, HORTON, WILSON et LUTHIN, PECK), les teneurs en eau initiales étaient uniformes et le plus souvent les colonnes étaient initialement complètement sèches. Dans leurs expériences sur colonnes fermées avec forte croissance de teneur en eau initiale avec la profondeur, « la valeur finale de l'infiltration en régime quasi-permanent est inférieure à la conductivité hydraulique du sable par deux ordres de grandeur, c'est-à-dire pratiquement nulle » (1) (KURAZ et KUTILEK, 1970, p. 187).

Des expériences récentes (VACHAUD et al., 1973) sur une colonne verticale stratifiée de sable, ont montré sans ambiguïté l'importance de l'air dans ce cas. Dans une expérience on permet à l'air de s'échapper latéralement par des trous, dans une autre l'air ne peut s'échapper que par le haut de la colonne. Quand l'air ne peut s'échapper latéralement il se comprime dans la deuxième couche (plus grossière) et empêche la transmission de l'eau de la couche supérieure à la couche inférieure. La couche du haut se sature, se remplit d'eau et finalement se comporte

---

indéfiniment.

Quelle conclusion peut-on tirer de l'ensemble de ces expériences ? Tout au moins en laboratoire, il est net que la présence de l'air réduit considérablement l'infiltration. L'ordre de grandeur de cette réduction est telle que l'entêtement courant à négliger cet effet dans les études théoriques est un défi au bon sens. Soit, mais qu'en est-il sur le terrain ?

« On a observé sur le terrain que les drains souterrains commencent quelquefois à débiter peu après le début de la pluie et avant que l'eau de pluie infiltrée ait atteint la nappe phréatique. Cet écoulement est probablement induit par l'air piégé qui est chassé du sol par l'eau qui y entre. Il est possible que la présence de drains souterrains accroisse le débit d'infiltration en permettant à l'air de s'échapper librement. Cet écoulement de l'air par les drains a été fréquemment observé sur le terrain » (1) (WILSON et LUTHIN, 1963, p. 143). L'effet rapporté ci-dessus n'est pas purement national. Comme HORTON le signalait il a été observé en Russie. Il a aussi été observé en France : « Enfin, il nous a été donné d'examiner dans le Gâtinais et en Puisaye un comportement qui ne s'apparente à aucun des cas décrits plus haut : la couche arable, qui ne repose pas sur une zone imperméable caractérisée (sous-sol ou semelle de labour), est truffée de poches d'eau de la grosseur du poing. La surface du sol est fortement battue et tassée par les pluies. Le substratum apparemment poreux et perméable est nettement mieux drainé et même ressuyé.

« Contre toute attente, le drainage par tuyaux se montre efficace dans ces terrains. On en arrive à se demander si de l'eau libre ne se maintient pas dans la couche arable par suite d'une compression de l'air du sol, dont l'échappement est interdit vers le haut. Les tuyaux de drainage joueraient alors le rôle d'une soupape de décompression. Si cette hypothèse se vérifie expérimentalement, il n'est pas impensable qu'un procédé moins coûteux que le drainage classique, par nappes de drains, puisse avoir le même effet » (FEODOROFF et GYUON, 1966, p. 758).

DIXON et LINDEN ont même fait des mesures sur le terrain pour voir l'importance de la présence de l'air sur l'infiltration dans le périmètre d'irrigation de la région de Fallon, Nevada. « La pression de l'air et le débit d'infiltration ont été mesurés au cours d'irrigations par bordure habituelles et d'autres simulées dans une zone de limon sableux uniforme de peu de profondeur au-dessus de la nappe phréatique » (en fait oscillant autour de 2 m). « Les mesures d'infiltration ont montré que la pression de l'air, montant jusqu'à un maximum de 18 cm d'eau, a réduit l'infiltration totale d'un tiers » (1) (DIXON et LINDEN, 1972, p. 948).

(1) Traduction libre par l'auteur de cet article.

Les mesures et les observations sur le terrain recourent les résultats de laboratoire. Les simulations mathématiques citées plus haut donnent des résultats dans la même direction avec les mêmes ordres de grandeur. Il paraît plus logique cependant de discuter ces résultats après avoir d'abord présenté les méthodes utilisées pour les obtenir. Auparavant, il est souhaitable de revoir rapidement les bases traditionnelles de la théorie de l'écoulement

### 3. DÉRIVATION TRADITIONNELLE DE L'ÉQUATION DE RICHARDS

Il est traditionnel, chez les physiciens des sols et chez les hydrologues, de définir la pression de l'eau dans le sol (que nous dénoterons  $p_w$ ) par rapport à la pression atmosphérique  $p_A$  et non seulement de la mesurer en hauteur d'eau mais aussi de l'exprimer en hauteur d'eau. Cette quantité  $\psi$ , qui a reçu divers noms (suction, tension, potentiel) est donc définie par la relation :

$$\psi = \frac{p_w - p_A}{\varphi_w g} \quad (1)$$

où  $\varphi_w$  est la masse volumique de l'eau et  $g$  l'accélération de la pesanteur. Pour des tensions faibles, on sait mesurer la quantité  $\psi$  au moyen d'un appareil dit tensiomètre. Des schémas de cet appareil sont présentés dans tous les ouvrages de science des sols (SWARTZENDRUBER, 1969, p. 218) et même dans la plupart des traités d'hydrologie (Kirkham, 1964, p. 5, 13). Il est important de remarquer que sur tous ces schémas on montre clairement que le tube manométrique est ouvert à l'atmosphère. L'appareil mesure donc bien la quantité définie par l'équation (1).

Il est traditionnel de définir une loi de Darcy généralisée à l'écoulement non-saturé qui prend la forme (pour un écoulement unidimensionnel dans la verticale) :

$$v_w = -K_w \frac{\partial}{\partial z} [\psi - z] = -K_w \frac{\partial \psi}{\partial z} + K_w \quad (2)$$

où  $v_w$  est la vitesse de l'eau dans le sens de Darcy (c'est-à-dire un flux volumétrique par unité de surface totale dans une section perpendiculaire à l'écoulement).  $K_w$  est la conductivité hydraulique (une fonction de la teneur en eau,  $\theta$ ) et  $z$  la coordonnée verticale orientée positive vers le bas. Les notations varient un peu selon les auteurs par le choix des conventions algébriques (par exemple  $z$  est orienté positif vers le haut ou le bas, etc.), mais fondamentalement toutes les équations dites de Darcy, généralisées à l'écoulement non-saturé (PHILIP, 1969, p. 220 ; SWARTZENDRUBER, 1969, p. 219 ; HILLEL, 1972, p. 110 ; NIELSEN et al., édit., 1972, p. 29) sont identiques à l'équation (2).

Exprimant mathématiquement le principe de la conservation de masse, ou d'une manière équivalente celui de la conservation de volume puisque l'eau est pratiquement incompressible, on obtient :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ -K_w \frac{\partial}{\partial z} (\psi - z) \right] = 0 \quad (3)$$

qui s'écrit plus explicitement :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left( K_w \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial K_w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

et qui est l'équation de Richards (PHILIP, 1969, p. 221 ; SWARTZENDRUBER, 1969, p. 222 ; HILLEL, 1972, p. 110 ; NIELSEN et al., 1972, p. 30). Si l'on peut supposer que la relation  $\psi(\theta)$  est biunivoque, on peut définir une fonction de  $\theta$ , dite « diffusivité », c'est-à-dire :

$$D(\theta) = K_w(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (5)$$

et l'équation de Richards se transforme en :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + K_w \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

où  $K_w$  est la notation pour indiquer la dérivée de  $K_w$  par rapport à  $\theta$ . Traditionnellement, l'équation (6) s'appelle l'équation de la diffusivité. Elle a fait couler beaucoup d'encre et apparemment continue...

### 4. DÉRIVATION DES ÉQUATIONS DE L'ÉCOULEMENT

La dérivation traditionnelle de l'équation de Richards, c'est-à-dire telle qu'elle est présentée dans les ouvrages même récents sur le sujet, a l'inconvénient de passer sous silence une hypothèse pourtant suspecte et, également d'utiliser une forme de la loi de Darcy qui n'est pas générale. En plus (ou même au lieu) de la définition de  $\psi$  il

est bon d'introduire la notion de pression capillaire pour un système eau (fluide mouillant) et air (non mouillant), c'est-à-dire :

$$p_c = p_a - p_w \tag{7}$$

où  $p_a$  est la pression de l'air dans le sol. Bien que cette conséquence ne soit en rien logique ni prévisible, il semble bien que l'introduction de la quantité  $\psi$  ait eu pour résultat de creuser le fossé entre les physiciens du sol et les hydrologues d'une part, et les mécaniciens des fluides et les pétroliers d'autre part. On peut remarquer que  $\psi$  et  $p_c$  sont liés par la relation d'équivalence :

$$\psi = -\frac{p_c}{\varphi_w g} + \frac{p_a - p_A}{\varphi_w g} = -h_c + \frac{p_a - p_A}{\varphi_w g} \tag{8}$$

Cette relation montre que  $\psi$  ne correspond numériquement (et en valeur absolue) à la pression capillaire (exprimée en hauteur d'eau) que si la pression de l'air dans le sol est égale à la pression atmosphérique.

On peut montrer (par exemple MOREL-SEYTOUX, 1973, p. 127) que la loi de Darcy généralisée pour un fluide compressible, disons le fluide  $i$ , est de la forme :

$$v_i = -K_i \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \int_{p_0}^{p_i} \frac{d\Pi}{\varphi_i g} - z \right\} \tag{9}$$

où  $K_i$  a comme  $K_w$  la dimension d'une vitesse. L'équation (9) est plus générale que l'équation (2) mais son écriture est lourde. Remarquant que  $K_i$  peut s'exprimer sous la forme équivalente :

$$K_i = \frac{k_i \varphi_i g}{\mu_i} \tag{10}$$

où  $K_i$  est la perméabilité effective (qui a la dimension d'une surface) et  $\mu_i$  est la viscosité (dynamique), on montre facilement (MOREL-SEYTOUX, 1973, p. 127) que l'équation (9) prend la forme simple :

$$v_i = -\frac{K_i}{\mu_i} \frac{\partial p_i}{\partial z} + K_i \tag{11}$$

aussi concise que l'équation (2), mais par contre valable pour un fluide compressible.

$$\frac{\partial(\varphi_i \theta_i)}{\partial t} + \frac{\partial(v_i \varphi_i)}{\partial z} = 0 \tag{12}$$

et utilisant l'équation (11) on obtient :

$$\frac{\partial(\varphi_i \theta_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( -\frac{K_i}{\mu_i} \frac{\partial p_i}{\partial z} + K_i \right) \varphi_i \right] = 0 \tag{13}$$

On obtient l'équation pour l'eau en substituant l'indice  $w$  à l'indice  $i$  et pour l'air en substituant l'indice  $a$ . Si l'on suppose l'eau incompressible et l'air compressible, on obtient les deux équations :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{1}{\mu_w} \frac{\partial}{\partial z} \left( k_w \frac{\partial p_w}{\partial z} \right) + \frac{\partial K_w}{\partial z} \tag{14}$$

$$\frac{\partial(\varphi_a \theta_a)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_a}{\mu_a} \frac{\partial p_a}{\partial z} \right) + \frac{\partial K_a}{\partial z} = 0 \tag{15}$$

L'équation pour l'eau se réécrit, en utilisant les équations (7), (8) et (10), sous la forme :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + K'_w \frac{\partial \theta}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_w}{\mu_w} \frac{\partial p_a}{\partial z} \right) = 0 \tag{16}$$

qui ne se réduira à l'équation traditionnelle de la diffusivité que si l'on néglige à la fois l'équation (15) in toto et le dernier terme de l'équation (16), c'est-à-dire si la pression de l'air reste partout et en tout temps constante. Les expériences de WILSON et LUTHIN et de VACHAUD et al. montrent bien que, même pour des colonnes ouvertes et pour des pluies qui ne saturent pas le sol en surface, cette hypothèse trahit la réalité.

Dans les expériences décrites précédemment, les résultats étaient interprétés en tenant compte de l'effet possible de l'air. En fait on recherchait cet effet. Il est évident que l'effet d'air est plus ou moins important, peut-être même négligeable, mais néanmoins toujours présent, qu'on recherche son effet ou non, présent même encore si on essaye à tout prix d'en éliminer les effets. Dans les expériences traditionnelles de laboratoire, on prend bien soin de faire des trous régulièrement tout le long de la colonne pour que l'air puisse s'échapper non seulement en bout mais encore latéralement. Or il arrive qu'on obtienne des résultats anormaux.





Si l'on compare équation (17) et équation (20), on voit que le rapport du flux sur la pente du profil de teneur en eau n'est pas égal à  $D$  et qu'il en est d'autant plus différent que le gradient de pression d'air est important. Or c'est souvent le cas pour les teneurs en eau proches de la saturation, car la résistance visqueuse à l'écoulement de l'air

est  $\frac{\partial h_{aw}}{\partial x}$ . Mais il faut aussi remarquer que la diminution de  $D$  avec l'augmentation de la teneur en eau est négative. Il faut donc être négatif pour des valeurs proches de la saturation, c'est-à-dire que la tendance au mouvement de l'air sera à contre-courant de celui de l'eau. Lorsque le débit d'imbibition est faible, on peut montrer que c'est souvent le cas parce que la résistance totale à l'écoulement (une quantité qui sera définie plus précisément par la suite comme l'inverse de la somme des mobilités des deux fluides) est maximale non pas à saturation, mais pour une valeur plus faible. Il est permis de penser que les mesures de BRUCE et KLUTE n'étaient pas en erreur, mais que leur interprétation, particulièrement l'utilisation de l'équation (17), était incorrecte.

## 5. CONCLUSION

Les résultats de laboratoire et sur le terrain montrent bien qu'une théorie réaliste de l'infiltration (ou du drainage) doit tenir compte des effets d'air. La théorie traditionnelle utilise couramment une équation incomplète et néglige totalement l'équation de conservation de masse pour l'air, en dépit du caractère bien établi de ce principe en mécanique des fluides. Une théorie plus complète fait intervenir un système de deux équations. Apparemment la résolution de ce système est plus complexe. Dans un deuxième article, on montrera qu'en fait il n'en est rien, ou presque.

## BIBLIOGRAPHIE

- ADRIAN (D.D.), FRANZINI (J.B.) - 1966 - Impedance to infiltration by Pressure Build-up ahead of the wetting Front. *Journal of Geophysical Research*, vol. 71, n° 24, December 1966, pp. 5857-5862.
- BRUCE (R.R.), KLUTE (A.) - 1956 - The measurement of soil moisture diffusivity. *Soil Science Society of America Proceedings*, vol. 20, pp. 458-462.
- BRUSTKERN (R.L.), MOREL-SEYTOUX (H.J.) - 1970 - Analytical Treatment of Two-Phase Infiltration. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers Proceedings*, vol. 96, n° HY 12, December 1970, pp. 2535-2548.
- CHOW (V.T.) (éditeur) - 1964 - Handbook of Applied Hydrology, Mc Graw Hill, New-York.
- CHOW (V.T.) (éditeur) - 1969 - Advances in Hydrosience, vol. 51, Academic Press, 305 p.
- DE WIEST (J.M.R.) (éditeur) - 1969 - Flow through Porous Media. Academic Press, New-York, 530 p.
- DIXON (R.M.), LINDEN (D.R.) - 1972 - Soil air pressure and water infiltration under border irrigation. *Soil Science Society of America Proceedings*, vol. 36, n° 5, sept.-oct. 1972, pp. 948-953.
- FEODOROFF (A.), GUYON (M.) - 1966 - Remarques sur le choix d'un système d'assainissement des sols adapté aux conditions du milieu. *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France du 8 juin 1966*, pp. 754-760.
- FREE (G.R.), PALMER (V.J.) - 1940 - Interrelationship of infiltration, air movement, and pore size in graded silica sand. *Soil Science Society of America Proceedings*, vol. 5, pp. 390-398.
- HILLEL (D.) - 1971 - Soil and Water. Physical Principles and Processes. Academic Press, New-York, 288 p.
- HORTON (R.E.) - 1940 - An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Science Society of America Proceedings*, vol. 5, pp. 399-417.
- KIRKHAM (D.) - 1964 - Soil Physics. Chapitre 5 dans *Handbook of Applied Hydrology*, V.T. Chow, édit., Mc Graw Hill, New-York, pp. 5.1-5.26.
- KURAZ (V.), KUTILEK (M.) - 1970 - Vertical Infiltration of water in Soil of a Non uniform Moisture. Czechoslovak National Committee of the International Commission on Irrigation and Drainage. *International Water Erosion Symposium*. Prague, pp. 183-197.
- MOREL-SEYTOUX (H.J.) - 1973 - Two-phase flows in porous media. Chapitre dans volume 9 de *Advances in Hydroscience*, V.T. Chow, édit., Academic Press, pp. 119-202.
- NIELSEN (D.R.) et al. (éditeurs) - 1972 - Soil Water. American Society of Agronomy, Madison Wisconsin, 175 p.
- NOBLANG (A.), MOREL-SEYTOUX (H.J.) - 1972 - Perturbation Analysis of two-phase infiltration. *Journal of the Hydraulics Division, A.S.C.E.*, vol. 98, n° HY 9, September 1972, pp. 1527-1541.

- PECK (A.J.) - 1965 - Moisture profile development and air compression during water uptake by bounded porous bodies : 3. vertical columns. *Soil Science Journal*, vol. 100, n° 1, pp. 44-51.
- PHILIP (J.R.) - 1969 - Theory of Infiltration. In *Advances in Hydrosience*, vol. 5, V.T. Chow, édit., Academic Press, pp. 215-305.
- PHUC (L.V.), MOREL-SEYTOUX (H.J.) - 1972 - Effect of soil air movement and compressibility on infiltration rates. *Soil Science Society of America Proceedings*, vol. 36, n° 2, March-April 1972, pp. 237-241
- RICHARDS (L.A.) - 1931 - Capillary conduction of liquids in porous media. *Physics*, New-York, vol. 1, pp. 318-333.
- SWARTZENDRUBER (D.) - 1969 - The flow of water in unsaturated soils. In *Flow Through Porous Media*, De Wiest, édit., Academic Press, New-York, pp. 215-292.
- VACHAUD (G.), VAUCLIN (M.), KHANJI (J.) et WAKIL (M.) - 1973 - Effects of air pressure on water flow in an unsaturated stratified vertical column of sand. *Water Resources Research Journal*, vol. 9, n° 1, February 1973, pp. 160-173.
- WILSON (L.G.), LUTHIN (J.N.) - 1963 - Effect of airflow ahead of the wetting front on infiltration. *Soil-Science Journal*, vol. 96, n° 2, August 1963, pp. 136-143.