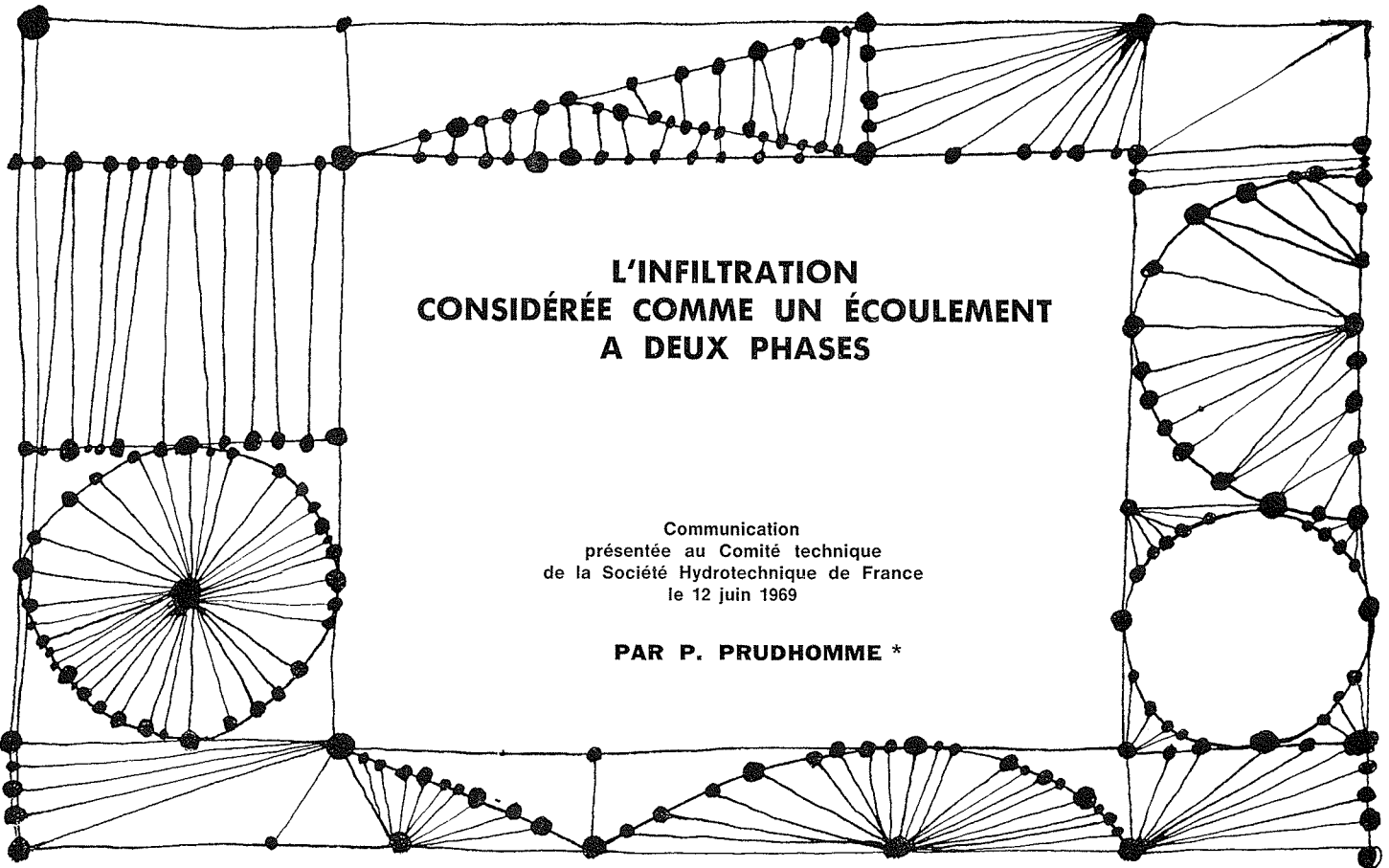


# L'INFILTRATION CONSIDÉRÉE COMME UN ÉCOULEMENT A DEUX PHASES

Communication  
présentée au Comité technique  
de la Société Hydrotechnique de France  
le 12 juin 1969

PAR P. PRUDHOMME \*



L'infiltration se traduit par un écoulement d'eau vertical, descendant dans la zone d'aération, qui s'étend entre la surface du sol et la nappe phréatique. Ceci implique un écoulement simultané d'air et d'eau dans cette zone : l'air étant chassé vers le haut, sous l'effet de l'accumulation dans le sol de l'eau descendant par gravité.

Le but de notre exposé est de présenter une méthode simple d'évaluation de la quantité d'eau s'infiltrant dans le sol, basée sur l'application de relations élémentaires régissant les écoulements à plusieurs phases dans un milieu poreux.

## Généralisation de la loi de Darcy dans le cas d'un écoulement polyphasique

Considérons un échantillon cylindrique de milieu poreux de section  $S$ , à travers lequel on impose un écoulement simultané de deux fluides non miscibles. On constate qu'il s'établit, au bout d'un temps plus ou moins long, un régime permanent caractérisé par l'existence d'une différence de pression constante entre les deux faces de l'échantillon, par l'égalité, pour chacun des fluides, des débits d'entrée et de sortie et par la constance des débits respectifs  $Q_1$  et  $Q_2$  des deux fluides. Ce régime permanent se caractérise également par l'établissement d'une certaine teneur du milieu poreux en l'un et l'autre fluide.

Si l'on répète l'opération pour différents rapports de débits des deux fluides, on remarque que  $Q_1$  et  $Q_2$  répondent à des relations du type de la loi de Darcy :

$$Q_1 = \frac{S}{\eta_1} \frac{dp}{dx} k_1 \quad Q_2 = \frac{S}{\eta_2} \frac{dp}{dx} k_2 \quad (1)$$

$\eta_1$  et  $\eta_2$  représentent les viscosités des fluides ;

$\frac{dp}{dx}$  est le gradient de pression moteur de l'écoulement ;

$k_1$  et  $k_2$  étant des caractéristiques du milieu poreux qui ne dépendent, au moins pratiquement, que de la teneur du milieu poreux en l'un et l'autre fluides ;

$k_1$  et  $k_2$  sont désignés par le terme de *perméabilité effective* aux fluides 1 et 2.

Dans le cas d'un écoulement d'eau et d'air dans un milieu poreux, la variation de la perméabilité relative à l'eau (rapport  $k_e/k$  de la perméabilité effective à la perméabilité intrinsèque du milieu poreux), en fonction de la teneur en eau, conduit à une courbe de la forme de celle de la figure 1.

## Examen du processus d'infiltration

Supposons qu'une certaine période de sécheresse ait permis l'obtention d'un état d'équilibre de l'eau au sein de la zone d'aération. La teneur en eau du milieu poreux varie en fonction de la profondeur,

\* Directeur Général de Géohydraulique

suivant une relation du type de celle représentée par la courbe de la figure 2.

Sous l'effet de la pluie, la partie supérieure du sol est d'abord envahie par l'eau d'infiltration qui descend ensuite progressivement vers la nappe, en établissant des profils de teneur en eau successifs dont l'évolution est schématisée sur la figure 3.

L'évolution schématique, reproduite ci-après, traduit la progression de l'eau vers le bas, jusqu'à l'obtention d'un nouvel état d'équilibre analogue à celui de la figure 2, pour une position supérieure de la surface libre de la nappe phréatique : le relèvement de la surface libre correspondant à l'apport d'eau d'infiltration jusqu'à la nappe.

Le schéma ci-dessus pourrait laisser supposer que la connaissance du profil de teneur en eau, à chaque instant, permettrait de déterminer le volume d'eau d'infiltration. En fait, plusieurs phénomènes altèrent le processus d'écoulement vertical schématisé et faussent l'évaluation de la quantité d'eau infiltrée qui pourrait résulter de l'examen des profils d'humidité :

- évaporation dans la partie supérieure;
- apport d'eau latéral par la nappe phréatique en provenance d'autres zones;
- écoulement non vertical dans la frange capillaire juste au-dessus de la nappe.

De ce fait, il nous paraît nécessaire d'adjoindre, à la connaissance des profils de teneur en eau, celle de paramètres proprement hydrodynamiques aptes à définir et à quantifier l'écoulement de l'eau d'infiltration. C'est le but de la méthode que nous proposons ci-après.

### Utilisation des perméabilités relatives pour le calcul de la quantité d'eau infiltrée dans le sol jusqu'à la nappe

Dans le raisonnement qui suit, nous considérons que l'infiltration de l'eau dans le sol se fait par l'intermédiaire des espaces intergranulaires envahis par l'eau, en considérant qu'il y a continuité de la phase eau et que l'écoulement vertical s'effectue sous le seul effet des forces de pression et de gravité.

Considérons une colonne verticale de terrain de section droite  $S$  et intéressons-nous à l'écoulement qui s'établit dans la colonne à travers le plan horizontal  $N$  (fig. 4).

Plaçons en  $M$  et  $M_1$ , de part et d'autre du plan  $N$ , deux capteurs de pression sélectifs (tensiomètres) ayant pour rôle d'indiquer la pression dans l'eau en ces deux points.

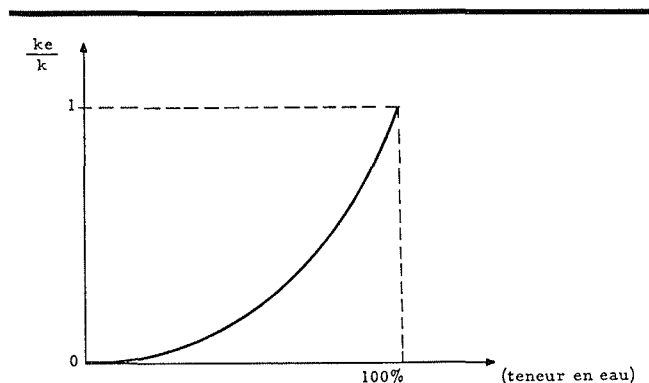
Les indications données par les capteurs permettent de connaître à chaque instant le gradient de charge hydraulique entre  $M$  et  $M_1$  qui est le moteur de l'écoulement entre ces deux points, donc à travers le plan  $N$ .

La généralisation de la loi de Darcy aux écoulements polyphasiques permet d'écrire, dans le cas de l'écoulement de l'eau en milieu non saturé :

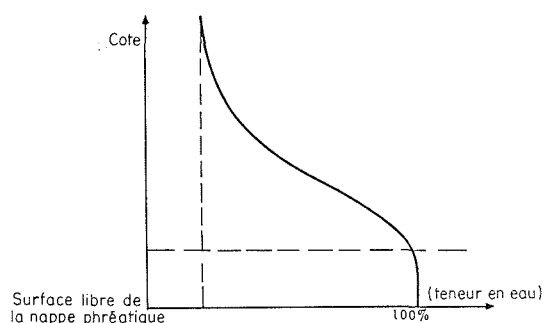
$$q_e = K_e S \frac{\Delta H}{\Delta z} \quad (2)$$

dans laquelle :

$q_e$  = débit d'eau à travers le plan  $N$ ;



1/



2/

$K_e$  = coefficient de Darcy pour l'eau correspondant à une teneur  $\sigma$ ;

$S$  = section droite de la colonne;

$\frac{\Delta H}{\Delta z}$  = gradient de charge hydraulique entre  $M$  et  $M_1$ .

Cette relation est dérivée de l'équation (1) par application de la relation existant entre la perméabilité propre du milieu poreux et le coefficient de Darcy pour l'eau, soit :

$$K_e = \frac{k_e \gamma}{\eta}$$

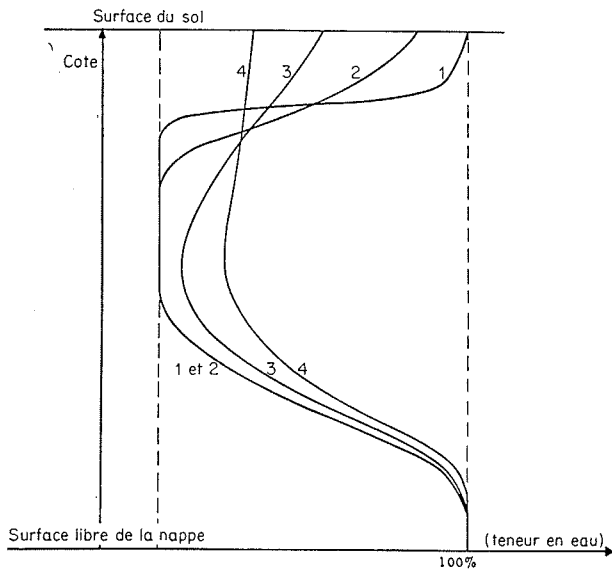
où :  $\gamma$  = poids spécifique de l'eau;

$\eta$  = viscosité de l'eau.

Supposons que l'on connaisse l'évolution dans le temps de la teneur en eau  $\sigma$  au niveau du plan  $N$ , par exemple grâce à l'emploi d'une sonde à neutron. Par ailleurs, nous avons vu que la perméabilité effective à l'un des fluides ne dépendait pratiquement que de la teneur en ce fluide pour un milieu poreux donné. Des mesures de perméabilité effective à l'eau permettent alors d'établir la correspondance entre  $K_e$  et  $\sigma$ , d'où l'on peut déduire la valeur de  $K_e$  à un instant donné, à partir du diagramme de l'évolution de  $\sigma$ .

D'autre part, l'enregistrement des charges hydrauliques en  $M$  et  $M_1$  permet de connaître, à chaque instant, la valeur  $\Delta H/\Delta z$  (qui peut être positive ou négative).

Ainsi, en admettant qu'il existe une relation univoque entre la teneur en eau  $\sigma$  et le coefficient  $K_e$ , l'application de l'équation (2) à différents instants pour lesquels  $\sigma$  et  $\Delta H/\Delta z$  sont connus, permet de définir l'évolution du débit de transfert de l'eau à travers le plan  $N$ .



3/ Evolution du profil de teneur en eau après une pluie abondante.

Du fait de l'accroissement de teneur en eau dans le sol sous l'effet de l'infiltration, on ne peut affirmer que la quantité d'eau traversant le plan N, à l'issue d'une pluie, atteindra la nappe. Il est donc indispensable de déterminer  $q_e$  à différents niveaux, afin d'établir une corrélation entre l'accroissement de teneur en eau observé dans une tranche donnée et les quantités d'apport ainsi déterminées.

Examinons ce qui se passe dans une tranche de sol, comprise entre deux plans horizontaux  $N_1$  et  $N_2$ , dans un intervalle de temps donné (fig. 5).

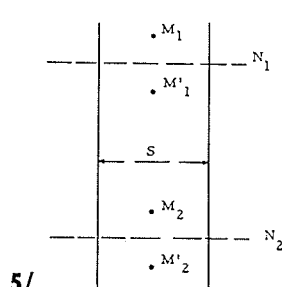
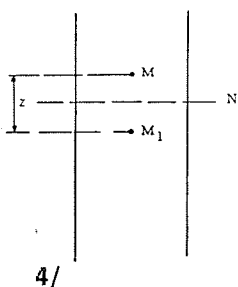
Le tracé des courbes donnant l'évolution des débits  $q_1$  et  $q_2$  en fonction du temps à travers les plans  $N_1$  et  $N_2$ , permet de déterminer les volumes d'eau  $V_1$  et  $V_2$  qui transitent à travers ces plans pendant l'intervalle  $\Delta t$ .

En prenant pour convention que le débit de transfert, donc le volume d'eau correspondant pendant  $\Delta t$ , est positif lorsque l'écoulement se fait de haut en bas (infiltration), on peut écrire :

$$V_1 - V_2 = \Delta\sigma \cdot \omega S \Delta L \quad (3)$$

où :

$\Delta\sigma$  = variation de teneur en eau dans la tranche  $N_1N_2$  pendant  $\Delta t$ ;



$\omega$  = porosité du milieu poreux;  
 $\Delta L$  = hauteur de la tranche  $N_1N_2$ .

Cette relation suppose que les échanges latéraux entre la colonne considérée et le milieu environnant se compensent. Ceci est vraisemblable à l'intérieur d'une zone où le gradient piézométrique horizontal est uniforme.

Le second membre de la relation (3) traduit la variation pendant  $\Delta t$  du volume d'eau emmagasinée dans la tranche  $N_1N_2$ . Si celle-ci peut, par ailleurs, être déduite des profils d'humidité relevés *in situ*, on dispose ainsi d'un moyen de vérification des hypothèses faites, ou d'un moyen de détermination des perméabilités effectives à partir d'une histoire donnée.

### Difficultés que l'on peut rencontrer dans l'application de la méthode

Certains phénomènes parasites risquent d'altérer la précision de la méthode par le fait qu'ils peuvent provoquer des incertitudes sur les valeurs des différents paramètres pris en considération. Nous examinerons ces phénomènes sous un angle purement qualitatif et il est certain que des expériences devraient être entreprises pour définir la plage d'erreur que de tels phénomènes peuvent introduire dans le calcul en fonction de la nature du terrain.

#### Transcription des profils d'humidité en profils de teneur en eau.

Les méthodes mises au point pour la détermination des profils d'humidité ont généralement pour objectif de déterminer le volume d'eau présent dans le sol à différentes profondeurs. La conversion de tels profils en diagrammes de teneur en eau n'est pas toujours aisée pour plusieurs raisons :

a) Nécessité de connaître la porosité totale du milieu. Dans le cas d'un sol homogène, on peut utiliser la valeur trouvée dans la zone saturée mais, dans les sols hétérogènes, la détermination de la porosité pose des problèmes.

b) La porosité totale du milieu peut varier suivant les contraintes internes qui lui sont appliquées (pression de l'eau et de l'air) : c'est le cas dans les milieux argileux. Il faut alors procéder à des mesures en laboratoire sur échantillons, afin d'évaluer l'importance de ce phénomène.

c) Hystérésis de la mouillabilité, qui interdit de s'appuyer sur la mesure des pressions de l'eau, fournie par les capteurs, pour en déduire la teneur en eau.

#### Relation entre la teneur en eau et la perméabilité effective.

On est en droit de se demander s'il existe bien une relation unique, permettant de déduire la perméabilité effective à l'eau de la teneur en eau. En effet, les phénomènes capillaires peuvent introduire les différences dans la distribution de l'eau et de l'air au sein du milieu poreux, suivant que les écou-

lements des deux fluides se font dans le même sens, en sens contraire, ou suivant des directions quelconques.

Des expériences ont été faites dans les laboratoires de Géopétrole, sur des écoulements à contresens de deux fluides non miscibles. Elles ont montré que l'écoulement à sens contraire réduisait sensiblement la perméabilité effective au fluide non mouillant, mais n'altérerait pratiquement pas la perméabilité effective au fluide mouillant. Dans le cas de l'infiltration, on est donc en droit d'espérer que la perméabilité effective, pour une teneur en eau donnée, est indépendante du sens d'écoulement, ce qui assurerait le caractère univoque de la relation.

Cependant, si la plasticité des terrains entraîne la variation de la porosité du milieu sous l'effet des variations des contraintes internes (point *b* du paragraphe précédent), il conviendra de déterminer les valeurs de la perméabilité effective à l'eau pour différentes contraintes.

En pratique, il conviendrait de mettre au point une méthode de mesure *in situ* de la perméabilité

effective à l'eau, afin d'établir la relation de correspondance avec la teneur en eau, en tenant compte des caractéristiques exactes du milieu en place. La méthode de Koitzsch mériterait une attention particulière dans ce domaine.

## Conclusions

L'exposé que nous venons de faire avait pour seul but de présenter une méthode pratique simple d'évolution quantitative de l'infiltration, basée sur les lois d'écoulements polyphasiques. Les contraintes d'application que nous avons soulignées prouvent que la méthode mériterait d'être expérimentée, en commençant par les milieux les moins complexes. La mise en place d'une station de mesure en terrain sableux fin devrait constituer un objectif à court terme qui permettrait de juger la précision de la méthode.

## Discussion

Président : Pr. L. ESCANDE

Après l'exposé de M. PRUDHOMME, M. le Président remercie ce dernier et ouvre la discussion.

Plutôt que de mesurer  $K$  en laboratoire, demande M. VACHAUD, ne peut-on pas à partir des tensiomètres et des mesures à la sonde à neutrons, mesurer les variations de débit, sur le terrain entre deux couches et les relier aux gradients de succion par le coefficient de perméabilité ?

Il serait en effet possible d'exploiter la méthode exposée, répond M. PRUDHOMME, pour déterminer les courbes de perméabilités relatives à partir d'états observés. En fait ceci nécessiterait de s'appuyer, à chaque pas de temps, sur une valeur connue à un niveau quelconque de la perméabilité effective à l'eau.

Certes, on pourrait adopter la valeur de la perméabilité intrinsèque dans la zone saturée en eau, c'est-à-dire à la partie supérieure de la nappe, mais à ce niveau, la composante horizontale de l'écoulement est très importante, ce qui altère considérablement la précision du calcul des transferts verticaux.

Nous considérons donc qu'il est préférable de n'utiliser ce processus de calcul qu'à titre de vérification de l'ensemble des valeurs mesurées indépendamment.

Par contre, il nous semble important d'insister sur la nécessité de mettre au point une méthode de mesure ponctuelle « *in situ* » de la perméabilité effective à l'eau.

M. FEODOROFF s'interroge sur le but poursuivi par M. PRUDHOMME.

Le but ultime de votre proposition, dit-il, est de mesurer un débit. La démarche que vous proposez implique la connaissance d'un coefficient  $k$ . Après l'intervention de M. G. VACHAUD, il apparaît que la détermination de  $k$  nécessite

la mesure de débits à partir de profils hydriques. Dans ces conditions, il semble qu'on a déjà mesuré ce qu'on veut calculer.

On ne peut pas mesurer les débits à partir des profils hydriques, répond M. PRUDHOMME, mais les variations des quantités d'eau au sein du milieu. On a constaté, récemment, sur le bassin de Mielan que si l'on prend en compte l'ensemble des profils d'humidité, on est incapable de dire si, à une époque déterminée, il y a transfert et écoulement vers le bas ou vers le haut. Donc, la connaissance des profils d'humidité a simplement pour objectif de permettre l'établissement de la loi de variation de la teneur en eau et l'établissement de la loi reliant la teneur en eau à la perméabilité effective.

M. le Président clôt la discussion en se félicitant de ce que les efforts faits par M. PRUDHOMME semblent susceptibles d'apporter de nouveaux développements pratiques. Il note, en passant, la différence entre le point de vue du Professeur et celui de l'Ingénieur en ce qui concerne la voie d'approche des phénomènes complexes. Il rappelle cette phrase du grand ingénieur que fût M. EYDOUX qui, dans un de ses livres, déjà ancien, après avoir évoqué les nombreux travaux poursuivis sur la turbulence, écrivait : « Je ne pense pas que les conséquences de ces études aient une répercussion très importante sur l'économie des usines hydroélectriques ».

« Vision prophétique — dit M. le Président — qui doit nous inciter, malgré les difficultés, à rechercher — même au prix d'approximations assez grossières — une voie d'approche relativement simple aux problèmes extrêmement complexes que nous avons abordés aujourd'hui. »