

# Réflexions sur la porosité et la limite inférieure de la loi de Darcy

Some thoughts on porosity  
and the lower limit of Darcy's law

PAR

R. MULLER-FEUGA

DOCTEUR ÈS-SCIENCES, INGÉNIEUR I.G.N.  
INGÉNIEUR A ÉLECTRICITÉ DE FRANCE,  
RÉGION D'ÉQUIPEMENT HYDRAULIQUE ALPES-III

ET

P. RUBY

INGÉNIEUR E.I.H.  
INGÉNIEUR-CONSEIL, AIX-EN-PROVENCE

*De l'expérience peuvent se dégager des questions concernant :*

- la limite inférieure de la loi de Darcy; les auteurs pensent, avec d'autres, qu'il y en a une;
- l'existence d'un « gradient initial » précédant toute mise en mouvement d'un écoulement; les résultats sont insuffisants pour permettre aux auteurs de conclure;
- les notions de porosité.

*La porosité peut être considérée comme une caractéristique intrinsèque d'un terrain. En effet en regard du « coefficient de porosité »  $m$ , on aboutit, lorsque l'eau contenue dans les pores d'un terrain saturé est soumise à un égouttage (gradient = 1), aux notions de capacité d'écoulement et de capacité de rétention.*

*Cependant, pour les gradients différents de 1, on est conduit à penser que d'autres notions liées à l'écoulement dont le terrain est le siège, doivent être considérées :*

*porosité utilisable et porosité inutilisable*

*Ces dernières notions interviennent notamment pour la détermination de la vitesse réelle d'écoulement. Il semble qu'elles varieraient avec le gradient.*

Au cours des années passées, il nous est fréquemment arrivé de mettre sur le compte des conditions dans lesquelles les observations et les mesures étaient réalisées, des anomalies qui concernaient le caractère linéaire de la loi de Darcy et des variations souvent sensibles de la porosité.

*Experience has given rise to questions connected with the following:*

- 1) *The lower limit of Darcy's law. The authors agree with others that there is such a limit.*
- 2) *The existence of an "initial gradient" before the actual flow movement begins. However, in the absence of sufficient results, the authors cannot reach any definite conclusions in this respect.*
- 3) *Porosity concepts.*

*Porosity may be considered as an intrinsic characteristic of a given piece of ground. If the water occupying the voids in a saturated soil is allowed to drain off (gradient=1), in considering the "coefficient of porosity"  $m$ , one finally also has to consider such concepts as flow capacity and retentive capacity.*

*Where the gradient differs from 1, however, there are reasons to suspect that other concepts associated with the flow in the soil ought to be allowed for. There are:*

*usable porosity and unusable porosity.*

*These appear to vary with the gradient and should, in particular, be considered when determining the true flow velocity.*

Ce n'est qu'avec le temps qu'un lien s'est établi entre ces anomalies d'abord et entre les deux aspects énoncés ensuite.

En bref, les résultats qui se dégagent de l'expérience peuvent se résumer ainsi :

... pour de faibles gradients la relation qui lie

la vitesse au gradient  $V$  ( $dh/dl$ ) ne semble pas linéaire; c'est-à-dire que la loi de Darcy aurait une limite inférieure;

- la porosité à considérer dans les calculs peut varier de 1 à 10 suivant la nature du phénomène étudié.

\*\*

Les constatations faites nous ont conduit à procéder à une recherche des travaux déjà effectués sur ces sujets. Nous souhaitons en effet savoir si des conclusions avaient été formulées dans le sens des résultats décrits.

### I. — En ce qui concerne la limite inférieure de la loi de Darcy.

La théorie la plus généralement admise est qu'il n'y a pas de limite inférieure : O.E. Meinzer et V.C. Fishel [1] ont vérifié au moyen d'un appareil spécial la validité de la loi pour un gradient de  $1.10^{-4}$  environ.

Deux autres théories sont en présence :

Certains, les mécaniciens des sols en particulier, qui travaillent sur des terrains homogènes peu perméables, sans mettre en cause le caractère linéaire de la loi, pensent qu'un écoulement ne se met en mouvement que pour une valeur  $i_0$  non nulle du gradient. Ce « gradient initial » varierait selon Florin [2], A. Davidenkoff [3], S.I. Georghitza [4], etc., avec la porosité du matériau.

D'autres pensent que la loi de Darcy est bornée inférieurement, cette limite étant différente de zéro. Selon Cambefort [5] et les travaux de Zunker, la relation serait dans ce cas :

$$i = -aV^2 + bV.$$

Les résultats pratiques de chantier que nous avons obtenus nous rapprochent de l'avis de ces derniers auteurs pour des matériaux alluvionnaires assez perméables. Ces résultats sont insuffisants pour nous permettre de conclure en outre sur l'existence ou l'absence d'un « gradient initial ».

### II. — En ce qui concerne les notions de porosité.

On trouve peu de renseignements. La porosité présente un intérêt pour les pétroliers, pour les mécaniciens des sols, pour les pédologues et pour les hydrauliciens utilisant les formules d'écoulement non permanents et les vitesses réelles d'écoulement.

Il nous semble intéressant d'essayer de faire le point de cette question car, tant sur le plan

théorique que sur le plan pratique, les données habituellement retenues ne semblent plus suffisantes.

Sur le plan théorique parce que, si les vides sont bien tous susceptibles d'être remplis par l'eau, la nature des forces auxquelles cette eau peut être soumise est variable, si bien que la totalité de l'eau considérée ne se comportera pas de façon uniforme.

Sur le plan pratique, car si la notion de pourcentage de vide est intéressante, celle de l'eau susceptible d'être mise en mouvement lors d'un écoulement ne l'est pas moins.

\*\*

La porosité d'un terrain est comprise comme étant le rapport en % du volume des vides au volume total du terrain en place. Elle est représentée par le coefficient  $m$ . Elle a une signification différente selon qu'on la considère relativement au terrain lui-même ou relativement à l'écoulement dont le terrain est le siège.

### III. — La porosité, relativement au terrain, caractéristique intrinsèque de celui-ci.

Si le terrain est caractérisé par le « coefficient de porosité » (porosity) exprimé par  $m$ , il l'est aussi par la quantité d'eau qu'il ne retient pas et par celle qu'il retient lorsque, après avoir été saturé, il est soumis à un égouttage, c'est-à-dire à la pesanteur. On a alors respectivement :

a) La « capacité d'écoulement » (specific yield) qui, en % par rapport au volume total du terrain, exprime la part d'« eau gravitaire », eau susceptible d'être récupérée. Elle englobe l'« eau immédiatement mobilisable » (lors de la mise en route d'un pompage par exemple) et l'« eau de ressuage » obtenue après plusieurs heures ou jours d'égouttage du terrain. Ces deux dernières notions constituent des commodités d'expression; leur délimitation n'est pas précise.

b) La « capacité de rétention » (specific retention) qui, en % par rapport au volume total du terrain, exprime la part d'« eau de rétention », eau non égouttable parce que liée à la roche par adsorption ou par le jeu des tensions superficielles. Les auteurs américains, surtout les pétroliers, expriment également en % l'eau qui est retenue par un échantillon (« effective porosity ») saturé au préalable, soumis à un gradient supérieur à 1 obtenu par l'application d'une force centrifuge donnée constante (moisture equivalent) : l'avantage de cette expression est d'éviter l'égouttage qui peut être long en remplaçant le champ de la gravité par un champ susceptible d'être beaucoup plus fort et qui permet de ré-

duire le temps nécessaire à l'essorage de l'échantillon. La difficulté est d'obtenir, dans tous les cas, le même champ de forces.

\*  
\*\*

La somme de la « capacité d'écoulement » et de la « capacité de rétention » correspond au « coefficient de porosité »  $m$  (à propos duquel quelques auteurs ont parfois parlé de « capacité d'absorption ») soit, en % :

Coefficient de porosité =  
capacité d'écoulement + capacité de rétention  
ce qu'on pourrait écrire :

$$m = c_1 + c_2. \quad (1)$$

Le fluide étant l'eau, les « capacités » expriment bien des caractéristiques propres au terrain lui-même : elles dépendent de l'empilage des grains, éléments ou particules, de la nature minéralogique et chimique et des tensions superficielles auxquelles les constituants du terrain considéré donnent lieu. A ce titre, elles sont précieuses pour définir une roche en mettant en œuvre une force facile à mobiliser : le champ de la pesanteur.

En outre, c'est la « capacité d'écoulement »  $c_1$ , et non  $m$ , qui doit intervenir dans les formules d'écoulements non permanents lorsque, comme dans la formule de Theis :

$$h = \frac{Q}{4\pi KH} Ei \left( \frac{r^2 m}{4 KHt} \right)$$

intervient la notion de porosité du terrain; en fait, on devrait considérer  $Ei(r^2 c_1/4 KHt)$ ,  $Ei$  représentant l'intégrale  $\int [(e-u)/u] du$ .

Ainsi, au cours d'écoulements non permanents que nous avons étudiés dans des terrains alluviaux, on a mesuré entre autres :

— Dans les alluvions de la Basse-Durance :

$$m = 24 \% \quad c_1 = 11 \% \quad K = 4.10^{-3} \text{ m/s}$$

— Dans les alluvions du Rhin (aval de Strasbourg) :

$$m = 23 \% \quad c_1 = 14 \% \quad K = 1.10^{-3} \text{ m/s}$$

— Dans les alluvions du Drac supérieur :

$$m = 25 \% \quad c_1 = 13,8 \% \quad K = 2.10^{-3} \text{ m/s}$$

Par ailleurs, dans tous les cas de mesure du coefficient de Darcy,  $K$  en régime non permanent, par les méthodes de la « courbe type » ou de « la droite » [6], on a obtenu des valeurs de  $c_1$  très différentes de celles correspondant à la porosité  $m$  du terrain.

#### IV. — La porosité, caractéristique d'un écoulement.

En hydrodynamique, les notions de porosité qui viennent d'être rappelées ne sont pas applicables dans tous les cas.

On a bien vu, en effet, qu'une partie de l'eau contenue dans un terrain n'est pas susceptible d'être mise en mouvement (l'eau de rétention est liée à la roche), mais, en plus, dans les écoulements souterrains naturels où l'eau est soumise à un gradient beaucoup plus faible que dans le cas d'un égouttage ( $i=1$ ), nous avons été conduits à conclure que la part d'eau en mouvement est inférieure à celle correspondant à la « capacité d'écoulement »  $c_1$  précédente, et du même coup à retenir les notions de « porosité utilisable » et de « porosité inutilisable » par un écoulement, notions exprimées respectivement par  $m_1$  et  $m_2$ .

Cette distinction découle du fait que la vitesse d'un écoulement est conditionnée par la section utilisée.

Si, en effet, on a une vitesse de Darcy  $V_d = Q/S$  qui est théorique et fait intervenir la « section totale de l'écoulement »  $S$ , on ne peut parvenir à la « vitesse réelle »  $V_r$  de l'écoulement étudié qu'en considérant la « section réelle d'écoulement » qui est  $S m_1$  en écrivant  $V_r = Q/S m_1$ . Des observations faites en cours d'études d'écoulements par des procédés divers nous ont permis de déterminer des valeurs de « porosité utilisable »  $m_1$  nettement inférieures à celles de la « capacité d'écoulement »  $c_1$ .

On a ainsi obtenu, par exemple, à partir d'essais de coloration dans des alluvions,  $m_2=2\%$  (\*), alors qu'on a déduit d'essais par pompages prolongés au même emplacement que  $c_1 = 14\%$ ; ce qui revient à dire que la notion de vitesse réelle de l'écoulement étudié aurait pu varier de 7 à 1 si on n'avait pas fait d'essai par traceurs et si on avait considéré directement  $c_1$  au lieu de  $m_1$ .

\*  
\*\*

Dans le cas d'un écoulement donné, on pourrait ainsi écrire en % :

— Coefficient de porosité =  
porosité utilisable + porosité inutilisable

(\*) Cette valeur de 2 % provient du calcul basé sur la vitesse moyenne de l'écoulement : celle-ci est considérée comme étant la moitié de la vitesse maximale qui correspond elle-même à l'apparition du traceur (P. Danel [7] et G. V. Bogomolov [8]). Si, comme certains auteurs le pensent, la vitesse moyenne n'est que le 1/3 ou même le 1/4 de la vitesse maximale observée, la « porosité utilisable » ne serait encore respectivement que de 3 ou 4 %. On peut dire que la « porosité utilisable »  $m_1$  se situe entre 2 et 4%, ce qui conduit à différencier nettement cette valeur de celle obtenue par égouttage et qui conduit à  $c_1$ , capacité d'écoulement.

ou encore :

$$m = m_1 + m_2 \quad (2)$$

Mais, alors que, dans le cas des caractéristiques intrinsèques d'une roche, les « capacités » d'écoulement et de rétention  $c_1$  et  $c_2$  sont des coefficients qui ne varient pas, certains résultats que nous avons obtenus nous amènent à penser que, pour un terrain donné, les porosités utilisables et inutilisables  $m_1$  et  $m_2$  varient selon le gradient de l'écoulement, leur somme demeurant constante : tout se passe comme si la section utilisée par l'écoulement croissait avec le gradient de ce dernier. Il est possible que  $c_1$  soit un point de la courbe  $m_1(dh/dl)$ ; pour  $(dh/dl) > 1$ , la fonction précédente correspondrait aux valeurs de la « porosité effective » qui constituerait un aspect de la « porosité utilisable ».

\*  
\*\*

Il est à noter que les chercheurs ont abordé le problème de la porosité en soumettant les terrains à un égouttage ( $i = 1$ ), donc sous l'angle de la « capacité d'écoulement » (drainage, stabilité d'ouvrages, rabattement par pompes, etc.).

Lambe [9], qui a travaillé sur des échantillons peu perméables, énonce que pour des gradients supérieurs à 1, la porosité utilisable (\*)  $m_1$  varie proportionnellement à la charge hydraulique. Cet auteur énonce en outre que dans ce cas il y a un gradient-limite, qui est fonction de la granulométrie, au-delà duquel la porosité utilisable (\*) ne varie plus.

Nous n'avons trouvé aucune communication concernant les variations de la porosité utilisable ( $m_1$ ) pour de faibles gradients comme ceux qu'on rencontre couramment dans la nature.

C'est d'ailleurs l'étude de ces écoulements naturels par traceurs (colorants, saumure, isotopes, etc.) qui nous a conduit à ces réflexions.

#### V. — Rapports entre la limite inférieure de la loi de Darcy et la variation de la « porosité utilisable » pour de faibles gradients.

Nous nous demandons si ces deux phénomènes ne sont pas liés.

En effet, pour de très faibles gradients, seuls les cheminements les plus faciles vont s'offrir à l'écoulement, de telle sorte que seule une part relativement faible de l'ensemble des vides est à considérer.

Au fur et à mesure que le gradient va augmenter, des cheminements nouveaux vont s'of-

frir en nombre croissant à l'écoulement et la part de vides à considérer va augmenter elle aussi.

A partir d'une certaine valeur du gradient, le nombre des cheminements ne varie pratiquement plus et la loi de Darcy s'applique alors. En continuant à augmenter le gradient, on arrive à une nouvelle valeur de celui-ci qui constitue la limite supérieure de validité de la loi en question.

Quant au « gradient initial » reconnu par certains auteurs comme nous l'avons rapporté plus haut, n'a-t-il pas échappé à d'autres parce que trop faible pour être mis en évidence pour les matériaux et les gradients utilisés?

\*  
\*\*

La réponse à l'ensemble des questions soulevées ci-dessus, questions qui, rappelons-le, concernent :

- la limite inférieure de la loi de Darcy;
- l'existence du « gradient initial »;
- la nature de la relation entre « la porosité utilisable » et le gradient;

nécessitent des recherches; nous avons commencé certaines expériences, mais la minutie avec laquelle il faut les poursuivre du fait qu'elles concernent des gradients très faibles, ne nous a pas encore permis d'aboutir à des résultats déterminants.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] O.E. MEINZER et V.C. FISHEL. — Tests of permeability with low hydraulic gradients. *A.G.U.T.*, 1934.
- [2] FLORIN. — Grundlagen der Bodenmechanik. Leningrad, Moscou, 1959.
- [3] R. DAVIDENKOFF. — Neue Forschungsarbeiten über die Konsolidierung Wassergesättigter bindiger Böden, février 1960.
- [4] S.I. GHEORGITZA. — Sur le mouvement des liquides incompressibles dans les milieux poreux. *C.R.A.S.*, 12 mai 1958.
- [5] H. CAMBEFORT. — L'écoulement des liquides à travers les milieux pulvérulents. *Travaux*, juin 1948.
- [6] R. MULLER-FEUGA et P. RUBY. — Mesure de la perméabilité en milieux poreux. *VI<sup>es</sup> Journées de l'Hydraulique*, Nancy, 1960, Question I, rapport 11, p. 7, 3 fig.
- [7] P. DANIEL. — La mesure des débits des eaux souterraines. Principes de base des écoulements en milieu poreux. *La Technique de l'Eau*, 15 janvier 1958.
- [8] G.V. BOGOMOLOV. — Hydrologie spécialisée, Moscou, 1955.
- [9] T.W. LAMBE. — Discussion de « Investigation of drainage rates affecting stability of earth dams », par F.H. KELLOG. *A.S.C.E. Transactions*, n° 2356, vol. 113, 1948.

(\*) En fait Lambe parle de la porosité effective (effective porosity).

## DISCUSSION

Président : M. DEJOU

M. le Président remercie MM. RUBY et MULLER-FEUGA de cette communication et, pensant à l'intérêt de cette question pour les pétroliers et les gaziers, pose à M. RUBY la question suivante :

Est-ce que ce sont les mêmes terrains qui ont une bonne porosité pour l'eau et pour le gaz ?

M. RUBY répond qu'il s'est surtout intéressé à des terrains alluviaux et qu'il n'a aucune donnée sur la validité de ses résultats dans les terrains de grès ou de minéraux fins, habituellement prospectés pour le stockage du gaz. Ces chapitres sont assez distincts.

M. RODIER indique que la variation de la porosité utilisable  $m_1$ , dont parle M. RUBY, avec la charge, est à comparer à ce que l'on observe dans une mauvaise section de jaugeage encombrée de rochers. Si l'on examine les courbes d'égales vitesses, on constate pour les faibles débits des zones d'eau morte très importantes. Si le débit croît, l'importance relative de ces zones décroît et peu à peu toute la section tend à être utilisée. Ce phénomène doit être beaucoup plus net dans la circulation à l'intérieur des massifs poreux, où les forces de capillarité jouent un très grand rôle.

M. RUBY ajoute qu'il a travaillé sur des terrains alluviaux qui sont homogènes à grande échelle et hétérogènes à l'échelle fine. Dans ces terrains, la notion de limite inférieure de validité de la loi de Darcy apparaît avec beaucoup plus d'acuité que dans les terrains homogènes, où elle a très bien pu passer inaperçue.

M. FERRARI fait deux remarques :

1° Il convient de féliciter les auteurs de cette communication pour leur effort en vue de mettre un peu d'ordre dans les définitions des différentes « porosités ». Dans ce domaine, une terminologie qui permette d'éviter des confusions s'impose ;

2° La formule de Theis, utilisée pour mesurer la « teneur en eau disponible » d'un terrain aquifère, notion correspondant, semble-t-il, à la « capacité d'écoulement » de MM. MULLER-FEUGA et RUBY, suppose que l'on a affaire à un écoulement transitoire pur, c'est-à-dire à une nappe non réalimentée. En réalité, il existe souvent une réalimentation de la nappe et l'application de la formule de Theis peut alors conduire à une valeur erronée de la « teneur en eau disponible » : c'est peut-être la raison de la différence qui apparaît, en première analyse, entre les valeurs  $c_1$  et  $m_1$ , mises en évidence par MM. MULLER-FEUGA et RUBY.

L'exploitation de l'hypothèse de l'alimentation de la nappe proportionnelle au rabattement, évoquée aux VI<sup>es</sup> Journées de l'Hydraulique par Mme KOTCHINA POLOUBARINOVA et M. BRILLANT, semble permettre d'améliorer la méthode de Theis. M. FERRARI a ainsi établi rigoureusement et complété les résultats théoriques signalés à Nancy par M. BRILLANT et aboutit à une formule de Theis améliorée qui paraît être utilisable pratiquement d'une façon commode. Dans la mesure où la théorie aura été confirmée par les vérifications expérimentales, M. FERRARI

pense faire ultérieurement une communication sur ce sujet à la S.H.F.

Pour répondre à la première remarque de M. FERRARI, M. le Président dit qu'il est souhaitable, mais peu possible, de faire une terminologie, car les gens inventent leurs termes au fur et à mesure qu'ils en ont besoin et ces termes évoluent.

M. MULLER-FEUGA, à la suite de ce qui vient d'être dit, croit bon de souligner ce qu'a précisé M. RUBY en présentant leur note : les réflexions exposées découlent d'une pratique portant sur une dizaine d'années. Elle englobe le dépouillement de près de 3 000 mesures du coefficient de Darcy ; elle s'appuie sur la conception et la réalisation de quatre réalimentations de nappe exécutées dans le cadre de l'aménagement agro-industriel de la Basse-Durance et, ayant mis en œuvre des débits compris entre 200 et 1 000 l/s, elle s'appuie également sur de très nombreux essais de traceurs par coloration ou par saumure. Ce sont ces expériences qui ont conduit à un ajustement progressif des notions de porosité pour aboutir à ce qu'a exposé M. RUBY. La terminologie utilisée dans cet exposé a fait de leur part l'objet d'une attention toute particulière ; on sait que cette terminologie est à l'ordre du jour des occupations de la S.H.F. Elle est conforme à ce qui a été proposé.

Il semble bon également, pour répondre plus spécialement à M. FERRARI, de faire ressortir quelques aspects pratiques propres aux études d'écoulements souterrains. On sera très heureux que la formule de Theis perfectionnée, qui vient d'être évoquée en prémisses d'une communication ultérieure, conduise à la connaissance du paramètre  $m$  de M. FERRARI concernant la caractéristique d'alimentation de la nappe étudiée. Il ne faut cependant pas perdre de vue qu'un écoulement souterrain constitue un phénomène très difficile à étudier et il ne faudrait pas, de ce fait, remplacer un problème par un autre, sur le plan de la mise en œuvre de la méthode d'étude, entre autres. A titre d'exemple, M. MULLER-FEUGA peut indiquer qu'en négligeant dans la formule de Theis le terme correctif introduit par M. MEYER, terme qui tient compte de la pente de la nappe, on commet une erreur de l'ordre de 4 % comme il l'a dit dans d'autres communications ; il n'a pas hésité à négliger cette amélioration car l'erreur dont les autres paramètres (tel que  $K$ ) ou coefficients (tel que  $C_1$ ) peuvent être frappés est bien supérieure à la première. En regard des recherches concernant les écoulements souterrains qui sont offerts à une série de composants difficiles à saisir, telles que les facteurs naturels d'alimentation de la nappe étudiée, le régime de variations saisonnières propre à cette nappe, les caractéristiques propres au milieu aquifère et ses conditions aux limites, etc., il est absolument souhaitable de tenir compte des réalités environnantes. C'est d'ailleurs dans cet esprit, qui veut que la théorie soit soutenue par la pratique, que M. RUBY et lui-même ont livré les questions auxquelles ils ont été conduits à propos de la porosité et de la limite inférieure de la loi de Darcy.

M. le Président remercie M. MULLER-FEUGA de son intervention.