

# De l'application de la perméabilité à l'air des sols en agronomie. I. Notion de perméabilité à l'air : théorie et méthodologie, mise au point bibliographique

P. Hinsinger et H. Mettauer

INRA, Station d'Agronomie, 28, rue de Herrlisheim, 68021 Colmar, France

(reçu le 21-12-1987, accepté le 14-10-1988)

**Résumé** — L'objectif de ce premier article est de fournir les fondements théoriques de la notion de perméabilité à l'air et les bases méthodologiques de sa métrologie. Un second article montrera l'intérêt de cette notion pour une appréciation peu destructive et rapide de la structure du sol, *in situ*. Dans une première partie, la loi de Darcy est présentée sous sa forme généralisée au cas de l'écoulement d'un gaz, en présence de deux phases (liquide et gaz). Les limitations conceptuelles à son utilisation sont passées en revue. Hormis l'influence de la teneur en eau sur la perméabilité à l'air, celles-ci sont peu contraignantes (hypothèse d'écoulement laminaire et isotherme en milieu isotrope). Une seconde partie fait la synthèse des techniques de mesure développées, en insistant particulièrement sur leurs limites, notamment dans l'optique de mesures *in situ*. Parmi l'ensemble de ces techniques, une seule paraît intéressante pour sa facilité de mise en oeuvre et sa fiabilité. En son état actuel, elle ne résout pas totalement le problème de la mesure *in situ* de la perméabilité de l'air.

**loi de Darcy – techniques de mesure – écoulement d'un gaz**

**Summary** — **Air permeability of soil and its application in agronomy. I. Air permeability : theory and methodology.** *The aim of this paper is to provide both a theoretical and a methodological basis for the concept of air permeability. A second paper examines this approach when applied to a rapid and relatively non-damaging investigation of soil structure in situ. In the first part, Darcy's law is presented as a definition of permeability, with the example of gas flow in the presence of two phases (liquid and gas). The conceptual limits regarding its application are reviewed. Apart from the influence of water content on air permeability, these limits are not of major importance (hypothesis of laminar isothermal flow in an isotropic medium). The second part gives a synthesis of the techniques available for measurement; their limits are indicated, particularly as regards in situ measurement. Only one of these techniques seems to be of interest, in that it is easy to use and reliable. But it does not provide a totally adequate solution to the problem of the in situ measurement of air permeability.*

**Darcy's law – measuring techniques – gas flow**

## Introduction

Les théories explicitant la perméabilité aux gaz de matériaux poreux ont été, principalement, développées en géologie dans les années 30 (Muskat et Botset, 1931). Elles trouvaient une application directe dans l'évaluation des gisements de gaz naturel et de pétrole (calcul du rendement des puits). Cet intérêt économique justifia le développement de formalismes très élaborés, concernant les écoulements multiphasiques.

Ce n'est qu'une ou deux décennies plus tard que cette notion de perméabilité à l'air s'est développée en physique du sol (Kirkham, 1947; Childs et Collis-George, 1950). L'objectif des physiciens du sol était alors de parfaire leur connaissance de l'état de compacité du sol et de son aération. Si l'intérêt agronomique d'une telle grandeur physique a été immédiatement ressenti, sa valorisation par les agronomes fut assez tardive (Kirkham *et al.*, 1959; Kmoch, 1962). Ce type d'investigations a quasiment cessé depuis 1970 : cela résulte pro-

bablement des impasses rencontrées en essayant de relier la production végétale à l'état physique du sol défini au travers de ce seul facteur. Ce désintéressement tient aussi au choix du rendement comme objet d'étude des agronomes de l'époque. Or, celui-ci dépend de nombreux autres facteurs et de leurs interrelations qu'il était alors impossible de prendre en compte dans les méthodologies statistiques bidimensionnelles disponibles.

Actuellement, les agronomes disposent de méthodologies statistiques multidimensionnelles qui permettent l'intégration de nombreux facteurs déterminant la productivité végétale (Harrach *et al.*, 1987). Par ailleurs, de nouvelles méthodologies d'investigation du système racinaire se sont développées (Bohm, 1979); or, le comportement de ce dernier reflète sans doute mieux l'effet de la structure du sol sur le végétal que la productivité.

Toutefois, la complexité du système sol/plante (système racinaire) qui fait l'objet d'étude de l'agronomie implique de nombreuses approximations dans l'application des diverses théories sur lesquelles elle se fonde. Cela explique, en particulier, pourquoi le formalisme relatif à la perméabilité à l'air a été notablement simplifié par les agronomes (écoulement monophasique, unidirectionnel, etc.) en regard de celui développé par les physiciens en recherche pétrolière.

Ce dernier article a pour objet de préciser ces aspects théoriques simplifiés, dans l'optique d'une utilisation agronomique de la perméabilité à l'air. C'est également dans ce but qu'il passe en revue les différentes méthodologies mises en œuvre pour sa mesure.

Dans un second article (Mettauer et Hinsinger, 1989), les auteurs s'attachent à montrer l'intérêt de l'application de la perméabilité à l'air en agronomie. Ils procèdent, pour cela, à un inventaire préalable des difficultés imposées par l'appréciation agronomique de la structure du sol et qui invalident bon nombre d'approches classiques de cette structure. Par contre, la perméabilité à l'air paraît surmonter une bonne partie de ces contraintes et s'avère, ainsi, être un critère intéressant qu'il conviendrait de réhabiliter en agronomie.

### **Théorie de l'écoulement convectif de l'air dans le sol. Notion de perméabilité à l'air**

Dans le sol, les transferts gazeux sont de deux types majeurs. Ils relèvent, d'une part, de phéno-

mènes de diffusion des gaz liés à l'existence de pressions partielles différentes entre les deux compartiments considérés. Ils correspondent, d'autre part, à des phénomènes de convection, ou écoulement en masse (*mass-flow*), lorsqu'il existe un gradient de pression totale de l'air.

Ces deux formes de transferts différentes et, éventuellement, interdépendantes (lois de diffusion et d'effusion de Graham) concourent au renouvellement de l'atmosphère du sol, dans des proportions très différentes. En effet, il est très généralement admis que l'entrée d'oxygène dans le sol et la sortie concomitante de gaz carbonique sont, essentiellement, le fait de phénomènes de diffusion.

Par contre, la notion de perméabilité à l'air relève de l'écoulement en masse. Sa mesure nécessite l'application à l'atmosphère externe au sol d'une légère surpression. Il convient, avant de préciser la méthodologie, de définir clairement cette notion en explicitant ses fondements théoriques.

*Formulation de la loi phénoménologique de l'écoulement en milieu poreux (loi de Darcy). Définition de la perméabilité*

L'écoulement en masse (écoulement convectif ou *mass-flow*) des fluides en milieu poreux est classiquement décrit par la loi empirique formulée par Darcy (1856), dont voici l'expression généralisée; dans le cas d'une seule phase fluide :

$$\vec{q}_v = -K \text{ grad } \phi \quad (1)$$

où  $\vec{q}_v$  est le flux macroscopique ou débit volumique par unité de surface (vitesse de Darcy) – dimension  $L.T^{-1}$ ,  $\phi$  est le potentiel total du fluide (hauteur capillaire) – dimension  $L$ ,  $K$  est la conductivité – dimension  $L.T^{-1}$ .

En fait, ce coefficient  $K$  dépend à la fois du fluide d'écoulement et du milieu, dont il est possible de préciser les effets respectifs en définissant la perméabilité intrinsèque (propre au seul milieu poreux) par :

$$k = \frac{\mu}{\rho g} K \quad (\text{Carman, 1961}) \quad (2)$$

où  $k$  est la perméabilité intrinsèque – dimension  $L^2$ ,  $\mu$  est la viscosité dynamique du fluide – dimension  $M.L^{-1}.T^{-1}$ ,  $\rho$  est la masse volumique du fluide – dimension  $M.L^{-3}$ , et  $g$  est l'accélération de la pesanteur – dimension  $L.T^{-2}$ .

Il est donc possible d'écrire l'équation de Darcy (1) sous la forme suivante :

$$qv = - \frac{k}{\mu} \text{grad } P \quad (3)$$

où grad P est le gradient de pression – dimension  $M.L^{-2}.T^{-2}$  (avec  $P = \rho.g \phi$ , pression du fluide).

En se ramenant au cas plus simple de l'écoulement unidirectionnel (suivant la direction  $x$ ), l'équation (3) devient :

$$qv = - \frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (4)$$

Signalons que lors d'un écoulement vertical du fluide, il conviendrait en toute rigueur de rajouter un terme gravitationnel. En fait, dans le cas de l'écoulement des gaz, ce terme peut être négligé (Kirkham, 1947), étant donnée leur faible masse volumique.

La loi de Darcy ainsi formulée correspond à un formalisme empirique décrivant l'écoulement macroscopique d'un fluide newtonien dans un milieu poreux, en présence de cette seule phase fluide. D'autres formalismes plus sophistiqués ont été développés (formalismes de Poiseuille, de Kozeny-Carman) en ce qui concerne les écoulements dans des milieux poreux simples (capillaires réguliers, réseaux de capillaires parallèles) (Kozeny, 1933). Dans le milieu poreux que constitue le sol, ils ne s'appliquent que pour une approche microscopique de l'écoulement, en raison de la complexité de la géométrie des pores, à l'échelle macroscopique. Ils ne feront donc pas ici l'objet de développements supplémentaires (Hubert, 1978). Tous ces formalismes trouvent leur fondement dans les équations de Navier et Stokes (Philip, 1970). L'intégration de ces dernières a permis de proposer récemment (Whitaker, 1986 a; Whitaker, 1986 b) des démonstrations de la loi de Darcy qui tendent à atténuer son caractère empirique.

La présence conjointe de deux phases fluides (air, indice a, et eau, indice w) dans un milieu poreux tel que le sol nécessite une mise en équation et une terminologie plus précises pour décrire l'écoulement de chacune de ces deux phases. La définition (2) de la conductivité et de la perméabilité intrinsèque devient ainsi :

$$K_w = \frac{k.k_{rw}(\theta)}{\mu_w} \rho_w.g \quad (5), \text{ dans le cas de l'eau,}$$

$$K_a = \frac{k.k_{ra}(\theta)}{\mu_a} \rho_a.g \quad (6), \text{ dans le cas de l'air,}$$

où  $K_w$  et  $K_a$  sont, respectivement les conductivité hydraulique et conductivité à l'air – dimension  $L.T^{-1}$ ,  $k$  est la perméabilité intrinsèque (*stricto sensu*) – dimension  $L^2$ ,  $k_{rw}(\theta)$  et  $k_{ra}(\theta)$  sont respectivement les perméabilités relatives à l'eau et à l'air qui sont, toutes deux, fonction de la teneur en eau  $\theta$  (Brooks et Corey, 1966) - sans dimension.

Il faut noter que, lorsque la teneur en eau du sol tend vers zéro (sol sec),  $k_{ra}(\theta)$  tend vers 1 et  $k_{rw}(\theta)$  tend vers 0. A l'inverse, lorsque la teneur en eau du sol tend vers 1 (sol saturé en eau),  $k_{rw}(\theta)$  tend vers 1 et  $k_{ra}(\theta)$  tend vers 0.

Dans la suite de l'exposé, nous appellerons *perméabilité à l'air* le produit :

$$k.k_{ra}(\theta) = K_{air} \quad (7)$$

Compte tenu des remarques précédentes, il apparaît que  $K_{air}$  se ramène à la perméabilité intrinsèque  $k$  lorsque la teneur en eau du sol  $\theta$  est nulle (en sol sec).

#### *Expression de la perméabilité à l'air en fonction des grandeurs physiques mesurables*

L'intégration de l'équation de Darcy (4) appliquée à l'air est compliquée par le caractère compressible de ce fluide (interdépendance entre la masse volumique et la pression). Elle demeure possible en se référant aux hypothèses d'écoulement isotherme et constant (Dullien, 1979). L'hypothèse de l'écoulement constant (*steady state*) traduit la loi de conservation de la masse qui se formule en termes de constance du flux massique, dans l'espace, soit :

$$\rho.qv = \text{constante} \quad (8)$$

Il s'agit là d'une forme simplifiée de l'équation de continuité qui est applicable à une phase continue dans le milieu poreux (l'air peut être considéré comme formant une phase continue si la teneur en eau est réduite; cf. le paragraphe «Limitations théoriques à l'utilisation de la loi de Darcy»). En assimilant l'air à un gaz parfait, l'hypothèse de l'écoulement isotherme se formule ainsi, en première approximation :

$$P = \rho.r.T \quad (9)$$

avec  $r.T = \text{constante}$ . En multipliant par  $P$  les deux membres de l'équation (4), elle devient :

$$P qv dx = - \frac{K_{air}}{m} P.dP \quad (10)$$

En considérant l'écoulement à travers un échantillon poreux de longueur  $L$ , de surface de section  $A$  et de pressions d'entrée d'air  $P_1$  et de sortie d'air  $P_2$ , l'équation (10) peut s'intégrer sachant que  $P \cdot qv = \text{constante}$  en (combinant (8) et (9)). (10) devient ainsi :

$$P \cdot qv \cdot L = \frac{k_{\text{air}}}{\mu} \frac{P_1^2 - P_2^2}{2} \quad (11)$$

D'où finalement, en posant

$$P = P_2 \text{ et } qv = \frac{Q_m}{\rho_2^A}$$

(où  $Q_m$  est le débit massique constant et  $\rho_2$  la masse volumique de l'air à la sortie de l'échantillon) :

$$k_{\text{air}} = 2 \frac{\mu}{\rho_2} \frac{L}{A} \frac{P_2}{P_1^2 - P_2^2} Q_m \quad (12)$$

Cette expression de la perméabilité à l'air se ramène, en fait, à des expressions simplifiées différentes, suivant la méthode de mesure utilisée (cf. le chapitre « Méthodologies développées pour la mesure de la perméabilité à l'air »).

#### *Limitations théoriques à l'utilisation de la loi de Darcy*

La loi de Darcy est valable dans un domaine restreint qu'il convient de cerner, compte tenu des hypothèses formulées. L'hypothèse la plus contraignante paraît être celle d'un écoulement à caractère laminaire. Ce type d'écoulement repose sur l'existence de vitesses d'écoulement relativement faibles (gradient de pression et/ou débit faibles) (Muskat, 1946.). Au-delà d'une vitesse limite  $V$ , l'écoulement devient turbulent. Celle-ci est ainsi définie :

$$V = \frac{\mathcal{R}v}{d} \quad (\text{Scheidegger, 1974}) \quad (13)$$

où  $\mathcal{R}$  est le nombre de Reynolds (sans dimension),  $d$  est le diamètre maximal des pores - dimension  $L$ , et  $v$  est la viscosité cinématique - dimension  $L^2 \cdot T^{-1}$  avec

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Il est généralement admis, dans le cas de l'écoulement de l'eau, que  $\mathcal{R}$  doit être  $\leq 1$  pour satisfaire à l'hypothèse d'écoulement laminaire (Hillel, 1980). La viscosité cinématique de l'air étant plus de 100 fois supérieure à celle de l'eau, il est possible de retenir des valeurs allant jusqu'à 10, voire 20 pour le nombre de Reynolds qui détermine le cas limite d'écoulement laminaire de l'air (Muntzer et Zilliox, communication personnelle).

Ainsi, dans le cas d'un diamètre maximal de pore voisin du millimètre, si  $\mathcal{R} = 10$ ,  $v = 14 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  (à  $20^\circ\text{C}$ ), on obtient  $V = 14 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$  comme vitesse d'écoulement limite satisfaisant à la condition d'écoulement visqueux.

L'intégration de la loi de Darcy est possible, dans le cas d'un fluide compressible tel que l'air, à la condition que sa température puisse être, effectivement, considérée comme constante lors de l'écoulement. De la constance de la température dépend, en effet, celle de la viscosité cinématique : en fait, la viscosité dynamique et, encore plus, la masse volumique (gaz) varient notablement avec la température. Dans la réalité, il apparaît qu'entre  $15$  et  $25^\circ\text{C}$ ,  $\mu$  et  $v$  n'augmentent respectivement que de  $3$  et  $7\%$ . Cette hypothèse d'écoulement isotherme est donc peu contraignante puisque des écarts de quelques  $^\circ\text{C}$  peuvent être considérés comme acceptables. Le contrôle de la constance de la température aux deux extrémités d'un échantillon traversé par un flux d'air est facile à réaliser. Muskat et Botset (1931) l'ont montré, jusqu'à des pressions de plusieurs atm. Il conviendra simplement de tenir compte de la température approximative de l'air au moment de chaque série de mesures et de déterminer des coefficients correctifs pour comparer des séries de mesures effectuées à différentes températures.

Le coefficient de perméabilité  $k$  tel qu'il est défini par l'équation (3) est une caractéristique de la géométrie du milieu poreux traversé par un écoulement dans les trois dimensions de l'espace dont il est une fonction complexe. En toute rigueur, le passage à l'équation (4) décrivant le cas simplifié d'un écoulement unidirectionnel est mathématiquement simple seulement dans l'hypothèse d'un milieu poreux isotrope et homogène :  $k$  se ramène alors à un scalaire alors que, dans le cas contraire (milieu anisotrope et hétérogène), il relève du calcul tensoriel (Philip, 1970). Or les sols, cultivés en particulier, sont des milieux poreux caractérisés par de fortes hétérogénéité et anisotropie (dépendance à l'égard des directions d'écoulement prises en compte (Rice *et al.*, 1970). L'application de la loi de Darcy à de tels milieux poreux demeure

possible, par extrapolation des calculs de perméabilité obtenus dans l'hypothèse d'isotropie et d'homogénéité. Il s'agit là d'une approximation nécessaire. Il convient toutefois de se placer dans des conditions favorisant la prédominance d'une direction d'écoulement donnée, ce qui paraît délicat lors de mesures *in situ* (cf. le paragraphe «Problèmes liés à la mise en oeuvre de mesures *in situ*»). Dans tous les cas, il est important de préciser la direction d'écoulement prise en compte (verticale, le plus souvent).

Enfin, la généralisation de la loi de Darcy au cas d'un écoulement biphasique a montré qu'il existe autant de coefficients de perméabilité à l'air que de teneurs en eau (équation 7) (Millington et Quirk, 1961). Ce coefficient diminue considérablement lorsque l'humidité du sol augmente, jusqu'à tendre à s'annuler lorsque le sol approche la saturation en eau (Collis-George, 1953). En fait, peu d'auteurs étudiant la perméabilité à l'air se sont penchés sur ses liaisons avec la teneur en eau du milieu poreux. De tels travaux ont été, principalement, le fait des spécialistes de mécanique des fluides, lors d'études de l'écoulement d'eau en milieu non saturé (Vachaud *et al.*, 1974). Ces derniers ont ainsi montré que la perméabilité à l'air ( $k_{ra}(\theta)$ ) tend vers zéro bien avant que le sol n'atteigne la saturation en eau, lors d'une phase d'infiltration. La saturation complète est d'ailleurs rarement atteinte, en raison de phénomènes d'occlusion d'air (Constantz *et al.*, 1988). Toutefois, dans de tels domaines de répartition des phases fluides du sol, il paraît dangereux d'appliquer l'équation de Darcy : l'hypothèse de continuité de la phase gazeuse qui autorise son utilisation n'est alors plus vérifiée. Par suite, la saturation n'étant jamais parfaite (sauf lorsque l'infiltration d'eau est réalisée sous vide), dans la réalité, la perméabilité à l'eau restera largement inférieure à la perméabilité intrinsèque ( $k_{rw}(\theta) < 1$ ). Au contraire, le dessèchement complet du sol étant, physiquement, possible, la perméabilité à l'air pourra tendre effectivement vers la perméabilité intrinsèque dans ces conditions. Ces travaux révèlent que la mesure de la perméabilité à l'air est la seule voie pour la détermination de cette grandeur caractéristique de la géométrie du milieu poreux (et de lui seul) (*Ibid.*). Aljibury et Evans (1965) ont également décrit la réduction de la perméabilité à l'air et l'augmentation concomitante de la perméabilité à l'eau, en fonction de la tension d'eau de sols de différentes granulométries. Sur les sols étudiés, la perméabilité à l'air présentait généralement un palier, plus ou moins important, dans une gamme de tension hydrique correspon-

dant à la capacité au champ. Ce résultat, bien que dépourvu de toute interprétation physique, pourrait intervenir en faveur du choix d'une telle humidité standard pour la mesure de la perméabilité à l'air *in situ* (cf. le paragraphe «Problèmes liés à la mise en oeuvre de mesures *in situ*»). Il conviendrait, au préalable, de confirmer ce résultat par de nombreuses autres mesures et d'en fournir une explication (Mettauer, travaux en cours). De toute façon, l'approche de la teneur en eau au travers de la tension hydrique est intéressante, dans cette optique, dans la mesure où il est possible d'y associer une fraction déterminée de l'espace poral, délimitée par un diamètre moyen de pores remplis d'air. Dans tous les cas, il apparaît extrêmement regrettable que la teneur en eau des sols étudiés soit aussi rarement mentionnée dans la bibliographie concernant la métrologie de la perméabilité à l'air. La précision de l'humidité du sol est indissociable de la mesure de la perméabilité à l'air.

### Méthodologies développées pour la mesure de la perméabilité à l'air

Deux cas de figures se présentent suivant que l'écoulement d'air est réalisé en maintenant une pression d'entrée d'air constante ou variable (*Falling head*). Il est en outre possible de réaliser les mesures *in situ* ou sur des échantillons prélevés (remaniés ou non). Ces diverses distinctions nous conduisent à plusieurs méthodes de mesure de la perméabilité à l'air dont les limites respectives sont indiquées.

#### Méthode de mesure à pression variable (*Falling head*)

Dans ce cas, le débit massique a pour expression :

$$Q_m = \frac{dM}{dt} \quad M \text{ représentant la masse d'air écoulée}$$

$$= V \frac{dp}{dt} \quad \text{le volume } V \text{ étant constant dans}$$

le système (cf. Fig. 1) (14)

D'après l'équation (9), il vient :

$$Q_m = \frac{V}{r.T} \frac{dP}{dt}$$

#### Expression de la perméabilité à l'air mesurée

D'après (12) et (15), on obtient, après simplification et en posant  $P_1 = P$  et  $P_2 = P_{atm} = P_{atm}$ .  $r.T$  (ceci est valable dans le cas où l'échantillon est prélevé [cf. Fig. 1]) :

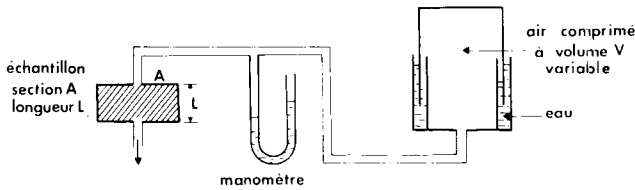


Fig. 1. Mesure de la perméabilité à l'air. Méthode à pression variable.

$$\frac{dP}{P^2 - P_{atm2}} = k_{air} \frac{A}{2\mu \cdot L \cdot V} dt \quad (16)$$

Cette équation différentielle peut s'intégrer entre les instants  $t_1$  (où la pression  $P$  vaut

$P_{t1} = P_{atm} + P_{m1}$ ) et  $t_2$  (où elle vaut  $P_{t2} = P_{atm} + P_{m2}$ ), d'où :

$$\frac{1}{2 P_{atm}} \ln \frac{P_{t2} + P_{atm}}{P_{t2} - P_{atm}} - \ln \frac{P_{t1} + P_{atm}}{P_{t1} - P_{atm}} = k_{air} \frac{A}{2\mu \cdot L \cdot V} (t_2 - t_1) \quad (17)$$

soit encore :

$$k = \frac{\mu \cdot L \cdot V}{A \cdot P_{atm} (t_2 - t_1)} \ln \frac{P_{m1}}{P_{m2}} \frac{2 + \frac{P_{m2}}{P_{atm}}}{2 + \frac{P_{m1}}{P_{atm}}} \quad (18)$$

Cette expression peut encore se simplifier en faisant les approximations suivantes :  $P_{m1}$  et  $P_{m2}$  (quelques cm de hauteur d'eau pour satisfaire à la condition de l'écoulement laminaire) sont très petits devant  $2P_{atm}$  (2 000 cm d'eau), d'où :

$$\frac{2 + \frac{P_{m2}}{P_{atm}}}{2 + \frac{P_{m1}}{P_{atm}}} \approx 1$$

On obtient finalement :

$$k \approx 2,3 \frac{\mu}{P_{atm}} \frac{L}{A} \frac{V}{t_2 - t_1} \log_{10} \frac{P_{m1}}{P_{m2}} \quad (19)$$

#### Mise en œuvre des mesures limites

Cette méthode de mesure correspond à un écoulement en régime transitoire alors qu'elle se fonde sur des équations valables dans l'hypothèse d'un régime perma-

nent (cf. le paragraphe «Expression de la perméabilité à l'air en fonction des grandeurs physiques mesurables»). En fait, cette hypothèse peut être considérée comme valable si la pression chute suffisamment lentement : à cette condition, une phase de transfert quasi permanent détectable suivra une phase initiale à régime transitoire et autorisera l'application des équations (14) à (19). Cette limite méthodologique est donc repoussée par la solution technique qui consiste en l'utilisation de réservoirs de volume  $V$  très important, seuls permettant d'atteindre des conditions d'écoulement quasi permanent mesurable, car durable. Cette solution s'avère, toutefois, peu pratique.

Deux types d'appareils fondés sur ce même principe d'écoulement à pression variable ont vu le jour successivement. En premier lieu, le matériel de Kirkham (1947) a montré rapidement des limites d'application en raison de la dépendance de la taille du réservoir (Fig. 2) - de volume  $V$  - à l'égard de la perméabilité des sols : la pression a ainsi tendance à chuter rapidement, rendant les lectures difficiles, si le réservoir a un volume trop faible (pour un sol très perméable, par exemple). Il faut donc adapter la taille du réservoir au type de sol rencontré, ce qui apparaît, encore une fois, peu pratique.

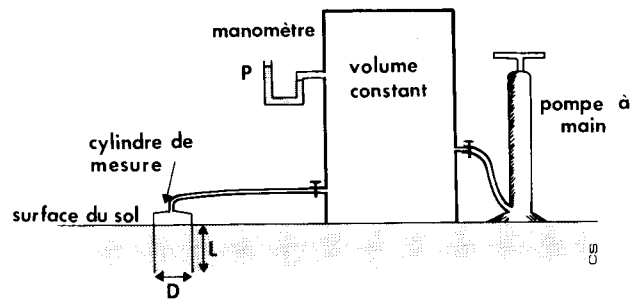


Fig. 2. Perméamètre à air de Kirkham.

Ultérieurement, cette difficulté a été surmontée grâce au remplacement du réservoir par une bouteille d'air comprimé (Steinbrenner, 1959; Rid, 1960). Mais, dans ce cas, se pose alors le problème de la fidélité de l'appareillage au fur et à mesure que la bouteille se vide (Van Groenewoud, 1968). La répétition des mesures révèle que lorsque la bouteille est à des niveaux de remplissage différents, elle ne délivre pas les mêmes débits d'air pour une même chute de pression. Les méthodes fondées sur un écoulement à pression variable présentent donc des limites techniquement irréductibles.

#### Méthode de mesure à pression constante

Dans ce cas, l'expression du débit massique devient :

$$Q_m = \rho_2 \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (20)$$

Le volume varie de  $\Delta V$  dans le système (Fig. 3) pendant le temps  $\Delta t$ .

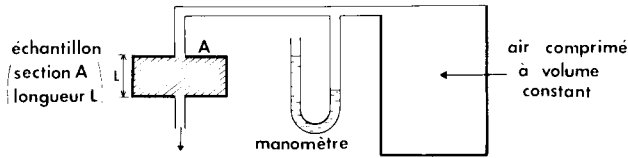


Fig. 3. Mesure de la perméabilité à l'air. Méthode à pression constante.

**Expression de la perméabilité à l'air mesurée**

L'équation (12) devient alors, d'après (20) :

$$k_{air} = \frac{2\mu.L.P_2}{(P_1^2 - P_2^2). A} \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (21)$$

Il est encore possible de simplifier cette expression, en faisant les mêmes approximations que précédemment :

$$P_1 = P_{atm} + P_{m1} \text{ et } P_2 = P_{atm}$$

$$P_1 + P_2 \cong P_{atm}$$

2

puisque  $P_{m1}$  est négligeable devant  $2P_{atm}$  (écoulement laminaire).

L'équation (21) devient alors :

$$k_{air} \cong \frac{\mu}{P_{m1}} \frac{L}{A} \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (22)$$

**Mise en œuvre des mesures limites**

Le premier appareil fondé sur l'écoulement à pression constante a été mis au point par Grover (1955), puis ont suivi des appareils du même type avec les travaux de Tanner et Wengel (1957). L'air est ici comprimé dans un réservoir à flotteur (Fig. 4) dans lequel la pression de l'air est déterminée par le poids du flotteur. Le débit est mesuré en déterminant le temps nécessaire au flotteur (de volume connu) pour s'enfoncer complètement. Ce type d'appareil, bien adapté à des mesures au laboratoire (Hartge, 1967) présente des limites d'utilisation sur le terrain qui sont liées à sa manipulation : transport difficile, verticalité parfaite du dispositif. De plus, il pose également problème quant à sa mauvaise adaptation à des mesures couvrant une large gamme de perméabilités : dans les sols très perméables, en particulier, le flotteur chute trop rapidement, rendant imprécise la mesure du débit.

Conséquence de ces limites : l'évolution de l'appareillage a, ici encore, conduit à remplacer le réservoir à flotteur par une bouteille d'air comprimé (délivrante une pression d'air constante) associée à une batterie de débit-mètres permettant de couvrir une large gamme de perméabilités. Cette deuxième génération d'appareils, fonctionnant à pression constante, a été mise au point

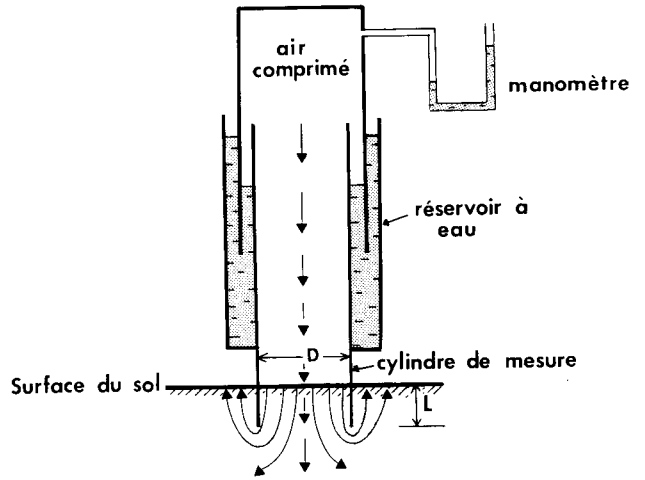


Fig. 4. Perméamètre à air de Grover.

par Van Groenewoud (1968) (Fig. 5) puis reprise par Green et Fordham (1975). Cet appareillage, à condition que les problèmes techniques d'étanchéité (nombreux raccords et robinets) soient bien maîtrisés, apparaît très fiable (Fordham, communication personnelle). Il permet de choisir des pressions de travail (quelques cm de hauteur d'eau) telles que les débits enregistrés restent compatibles avec l'hypothèse d'écoulement laminaire (cf. le paragraphe «Limitations théoriques à l'utilisation de la loi de Darcy»).

**Problèmes liés à la mise en œuvre de mesures in situ**

Dans les deux cas de figures précédents, la formulation de la perméabilité à l'air est fondée sur la condition suivante : la mesure est effectuée sur un échantillon extrait du sol pour lequel il est possible d'affirmer que la pression de l'air à la sortie de l'échantillon est égale à la pression atmosphérique (Figs. 1 et 3).

Il n'en est plus de même lorsque la mesure est effectuée *in situ*. Dans ce cas, il est impossible de connaître la valeur de la pression de l'air à la sortie du cylindre de

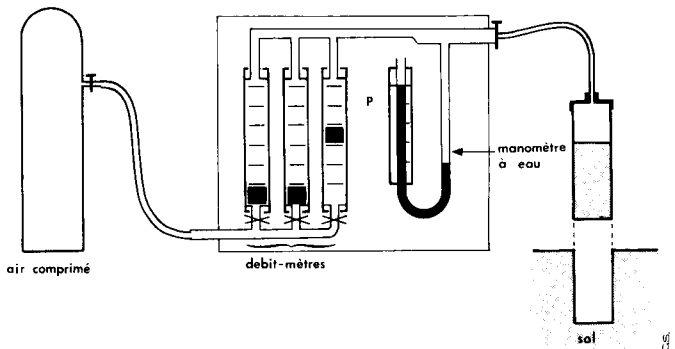


Fig. 5. Perméamètre à air de Van Groenewoud.

mesure. Pour remédier à ce problème, Kirkham (1945, 1947), puis Evans et Kirkham (1950) ont pris en considération la géométrie de l'écoulement au-delà de l'extrémité du cylindre jusqu'à l'atmosphère externe du sol. Ils réussirent ainsi, par une analogie électrique entre les phénomènes d'écoulement de l'air dans le sol et d'écoulement de charges dans un électrolyte (entre deux électrodes représentant la sortie du cylindre et l'atmosphère externe), à calculer une constante-fonction des dimensions du cylindre de mesure  $f(A, L)$  venant remplacer le rapport  $L/A$  dans l'équation (19).

Grover (1955) proposa également un abaque permettant de déterminer une constante  $C(A, L)$  —fonction des dimensions du cylindre, remplaçant le rapport  $L/A$  dans l'équation (22). Il ne précisa pas, cependant, le mode d'obtention de cette constante. Celle-ci fut, d'ailleurs, corrigée ultérieurement par Kirkham *et al.* (1959) et reprise par Evans (1965).

Toutefois, il convient de signaler que ces calculs, fondés sur une analogie électrique, supposent, implicitement, le milieu poreux comme parfaitement homogène et isotrope (Wyllie et Spangler, 1952). Cette hypothèse est difficilement transposable aux sols structurés (cultivés, en particulier) qui se caractérisent par une forte anisotropie (Maasland et Kirkham, 1955; Rice *et al.*, 1970).

En comparant les perméabilités à l'air mesurées sur de mêmes échantillons, *in situ* puis extraits, Van Groenewoud (1968) a obtenu de fortes corrélations entre ces deux types de résultats dans le cas de sols isotropes. Les corrélations étaient nettement plus faibles dans le cas d'un ensemble de sols anisotropes. Compte tenu de ces résultats, cet auteur a proposé d'effectuer toutes les mesures sur des échantillons extraits plutôt qu'*in situ*, afin de s'affranchir d'erreurs systématiques importantes en sols anisotropes.

Ultérieurement, Green et Fordham (1975) ont montré, à partir de résultats obtenus avant et après extraction des cylindres-échantillons que les valeurs de perméabilité pouvaient ainsi varier du simple au double dans nombre des cas observés. Compte tenu de telles observations, il convient donc de relativiser fortement la valeur des mesures de perméabilités à l'air effectuées sur le terrain. Toutefois, si la valeur absolue de telles mesures est contestable, la comparaison en valeur relative des perméabilités à l'air d'un ensemble d'échantillons *in situ* montre un classement sensiblement cohérent avec celui obtenu par comparaison des résultats de mesure sur les mêmes échantillons extraits. Les corrélations sont encore meilleures si l'on considère les moyennes obtenues sur plusieurs échantillons d'une même parcelle, qui intègrent la variabilité spatiale de la perméabilité. Dans tous les cas, les valeurs de perméabilité à l'air mesurée *in situ* dépendent, outre de la perméabilité du sol dans le cylindre (déterminant la mesure sur échantillon extrait), de la perméabilité du sol à l'extérieur de ce cylindre, en particulier immédiatement en-dessous (d'où les investigations déjà évoquées, quant à la géométrie de l'écoulement d'air, *in situ*). La comparaison systématique des mesures de perméabilité à l'air *in situ* puis sur échantillon extrait peut donc aussi renseigner sur la perméabilité du sol sous-jacent (Green et Fordham, 1975).

Par ailleurs, il paraît actuellement envisageable de coupler les appareillages classiques de mesure de la

perméabilité à des appareils permettant le contrôle de la pression de l'air (à la sortie du cylindre), voire de la tension de l'eau (Vauclin, communication personnelle). Ainsi, si la transposition au champ de l'utilisation des tensiomètres à air mis au point par Touma (1984) s'avère possible, la valeur des mesures *in situ* de la perméabilité à l'air deviendra incontestable. Dans tous les cas, le couplage à des mesures parallèles de teneur en eau, et surtout de tension de l'eau, s'impose pour valider la comparaison des mesures entre elles (cf. le paragraphe «Limitations théoriques à l'utilisation de la loi de Darcy»).

## Conclusions

La perméabilité rend compte de l'aptitude d'un matériau poreux à être traversé par les fluides newtoniens. Sa définition repose sur la loi phénoménologique de Darcy initialement proposée pour décrire, empiriquement, les phénomènes d'écoulement en masse de l'eau en milieu poreux. Cette loi peut être généralisée au cas des gaz et de l'air, moyennant certaines hypothèses quant aux caractéristiques de l'écoulement. Celles-ci déterminent un certain nombre de limites conceptuelles à la validité de la loi de Darcy et la notion de perméabilité à l'air qui en découle. Il s'agit, principalement, des conditions d'écoulement laminaire (valable pour des vitesses d'écoulement faibles), isotherme (très généralement valable) et de continuité de la phase gazeuse (valable dans certaines limites d'humidité du milieu). Ces conditions sont peu limitatives, mais nécessitent d'être prises en compte lors des mesures (contrôle de la teneur en eau du matériau et de la température ambiante, travail à des débits faibles).

Au plan méthodologique, la technique de Van Groenewoud (1968) apparaît nettement plus fiable que les autres ici passées en revue. Elle seule permet de se placer dans les conditions évoquées ci-dessus, dans une large gamme de perméabilités à l'air possibles. Cette technique est fondée sur l'emploi d'une bouteille d'air comprimé, délivrant une pression constante (fixée par l'utilisateur, de manière à se maintenir dans des conditions d'un écoulement laminaire). La lecture du débit sur une batterie de débit-mètres permet un calcul rapide de la perméabilité à l'air. Toutefois, cet auteur recommande d'effectuer les mesures sur des échantillons de sol extraits, afin de s'affranchir des erreurs causées par le caractère anisotrope de l'écoulement à la sortie du cylindre échantillon *in situ*. Cette anisotropie invalide en effet les corrections apportées par divers auteurs pour la réalisation des mesures *in situ* (fondées sur une analogie électrique).



Avec le développement des techniques de tensiométrie couplées à cet appareillage, son utilisation *in situ* devrait être rendue possible dans un proche avenir. Ces techniques devront permettre la détermination de la pression de l'air à la sortie du cylindre échantillon maintenu *in situ* et le contrôle de la tension d'eau du sol dont dépend étroitement la perméabilité à l'air.

En permettant des mesures rapides et non destructives, les techniques fondées sur l'appréciation de la perméabilité à l'air devraient connaître un essor justifié en agronomie. Cette justification fera l'objet d'un second article (Mettauer et Hinsinger, 1989).

## Références

- Aljibury F.K. & Evans D.D. (1964) Water permeability of saturated soils as related to air permeability. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28, 366-369
- Bohm W. (1979) *Methods of Studying Root Systems*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York
- Brooks R.H. & Corey A.T. (1966) Properties of porous media affecting fluid flow. *Journal of the irrigation and drainage division. Proc. Am. Soc. Civil Engineers* 92, 61-88
- Carman P.C. (1961) *L'Écoulement des Gaz à Travers les Milieux Poreux*. PUF, Paris
- Childs E.C. & Collis-George N. (1950) The permeability of porous materials. *R. Proc. Soc. Cond.* 201, 392-405
- Collis-George N. (1953) Relationship between air and water permeabilities in porous media. *Soil Sci.* 76, 4, 239-250
- Constantz J., Herkelrath W.N. & Murphy F. (1988) Air encapsulation during infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 10-16
- Darcy H.P.G. (1856) *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, Victor Dalmon, Paris
- Dullien F.A.L. (1979) *Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure*. Academic Press, New York
- Evans D.D. (1965) Gas movement. *In : Methods of Soil Analysis. Agronomy* 9, 1, 319-330
- Evans D.D. & Kirkham D. (1950) Measurement of the air permeability of soil *in situ*. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 14, 65-73
- Green R.D. & Fordham S.J. (1975) A field method for determining air permeability in soil. *In : Soil Physical Conditions and Crop Production. Techn. Bull.* 29 HMSO, 273-288
- Grover B.L. (1955) Simplified air permeameters for soil in place. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 19, 414-418
- Harrach T., Keil B. & Vorderbrugge T. (1987) The influence of soil structure on rooting, nutrient uptake and yield formation. *Proceedings of the 20th Colloquium of the International Potash Institute*, pp. 283-300
- Hartge K.H. (1967) Der Zusammenhang zwischen Luft- und Wasserpermeabilität in Bodenproben. *Z. Pflanzenernaehr. Dueng. Bodenkd* 95, 195-215
- Hillel D. (1980) *Fundamentals of Soil Physics*. Academic Press, New York
- Hubert A. (1978) Relations entre la conductivité hydraulique et la structure des milieux poreux. *Ann. Agron.* 29, 5, 475-498
- Kirkham D. (1945) Proposed method for field measurement of permeability of soil below the water table. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 10, 58-68
- Kirkham D. (1947) Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 11, 93-99
- Kirkham D., De Boodt M. & De Leenheer L. (1959) Air permeability at the field capacity as related to soil structure and yields. *Meded. Landbouwhogeschool. Opzoekingsstn. Staat Gent XXIV*, 1, 377-391
- Kmoch H.O. (1962) *Die Luftdurchlässigkeit des Bodens. Ihre Bestimmung und ihre Bedeutung für einige ackerbauliche Probleme*. Gebrüder Bornträger, Berlin
- Kozeny J. (1933) Über Bodendurchlässigkeit. *Z. Pflanzenernaehr. Dueng. Bodenkd.* A 28, 54-66
- Maasland M. & Kirkham D. (1955) Theory and measurement of anisotropic air permeability in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 19, 4, 395-400
- Mettauer H. & Hinsinger P. (1989) De l'application de la perméabilité à l'air en agronomie. II. Intérêt de la perméabilité à l'air pour la caractérisation de la structure du sol et des modalités d'enracinement. *Agronomie* 9, 24
- Millington R.J. & Quirk J.P. (1961) Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.* 57, 463, 1200-1207
- Muskat M. (1946) The flow of homogeneous fluids through porous media. *Edwards, Ann. Arbor, Michigan. In : Applications of Soil Physics*. Hillel D. (1980) Academic Press, London
- Muskat M. & Botset H.G. (1931) Flow of gas through porous materials. *Physics* 1, 27-47
- Philip J.R. (1970) Flow in porous media. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2, 177-204
- Rice Ph. A., Fontugne D.J., Latini R.G. & Barduhn A.J. (1970) Anisotropic permeability in porous media. *Ind. Eng. Chem.* 62, 6, 23-3
- Rid H. (1960) Über eine Feldmethode zur Messung der Bodendurchlüftung. *Z. Pflanzenernaehr. Dueng. Bodenkd.* 88, 227-231
- Scheidegger A.E. (1974) *The Physics of Flow through Porous Media*. University of Toronto Press
- Steinbrenner E.C. (1959) A portable air-permeameter for forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 23, 478-481
- Tanner C.B. & Wengel R.W. (1957) An air permeameter for field and laboratory use. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 21, 663-664
- Touma J. (1984) Etude cinétique de la caractérisation hydrodynamique des sols non saturés : rôle de l'air; influence de l'écoulement multidimensionnel de l'eau. Thèse Institut Polytechnique de Grenoble
- Vachaud G., Gaudet J.P. & Kuraz V. (1974) Air and water flow during ponded infiltration in a vertical bounded column of soil. *J. Hydrol.* 22, 89-108
- Van Groenewoud H. (1968) Methods and apparatus for measuring air permeability of the soil. *Soil Sci.* 106, 4, 275-279

Whitaker S. (1986 a) Theoretical derivation of Darcy's law. *Transport in Porous Media* 1, 3-25

Whitaker S. (1986 b) The governing equations for immiscible, two phase flow. *Transport in Porous Media* 1, 105-125

Wyllie M.R.J. & Spangler M.B. (1952) Application of electrical resistivity measurements to problem of fluid in porous media. *Bull. Am. Assoc. Petroleum Geologists* 36, 2, 359-403