Sur l'utilisation de l'air pour la mesure "in situ" de la perméabilité d'un terrain alluvial non saturé

The use of air for making "in situ" permeability measurements of an unsaturated alluvial formation

PAR G. SCHNEEBELI

INGÉNIEUR A LA SOCIÉTÉ « LES TRAVAUX SOUTERRAINS »

Communication présentée à la Société Hydrotechnique de France, le 21 novembre 1958.

Bases théoriques de l'utilisation d'un gaz pour la mesure de la perméabilité d'un terrain non saturé d'eau.

Compte rendu des nombreux essais effectués sur le site du barrage de Matemale (Pyrénées Orientales).

Renseignements obtenus sur le terrain étudié. Cas auxquels la méthode ne peut s'appliquer : terrains qui, du fait, de leur teneur en argile, gonflent au moment de leur saturation.

The theory behind the use of gas for measuring the permeability of a formation which is not saturated with water.

An account of a large number of tests carried out on the site of Matemale dam in the Pyrénées Orientales department, France.

Data obtained on the formation that was investigated. Applications for which the method cannot be used : formations which swell when they become saturated because of their clay content.

I. — INTRODUCTION

D'un point de vue théorique, l'écoulement de filtration à travers un milieu poreux suit une loi générale unique, quelle que soit la nature du fluide. On a, qu'il s'agisse d'un gaz ou d'un liquide :

$$V = -g(P/\nu) \text{ grad } \varphi \quad (1)$$

(Loi de Darcy)

V [LT^{-1}] : est la vitesse de filtration;

g , [LT^{-2}] : l'accélération de la pesanteur;

P [L^2] : la perméabilité géométrique du milieu poreux. Elle varie comme le carré de la dimension des grains;

$\nu = \mu/\varphi$ [$L^2 T^{-1}$] : la viscosité cinématique du fluide;

μ [$ML^{-1} T^{-1}$] : la viscosité dynamique;

φ [ML^{-3}] : la masse spécifique;

$\varphi = f_0^p (p/\varpi) + Z$ [L] : la charge exprimée en hauteur de fluide;

p [$ML^{-1} T^{-2}$] : la pression;

$\varpi = \rho g$ [$ML^{-2} T^{-2}$] : le poids spécifique;

Z [L] : l'élévation au-dessus d'un plan de référence.

La loi de Darcy est directement utilisable, sous la forme précédente, dans le cas d'un liquide. Dans le cas d'un gaz, il est plus commode d'exprimer la charge en termes de pression :

$$\text{grad } \varphi = (1/\varpi) \text{ grad } p + \text{grad } Z$$

le dernier terme, qui correspond à la pesanteur du gaz, est par ailleurs négligeable et on peut récrire la loi de Darcy :

$$V = -g(P/\nu) (\text{grad } p/\varpi)$$

$$\bar{V} = -(P/\mu) \text{ grad } p \quad (2)$$

Loi de Darcy pour les gaz.

Dans le cas de l'écoulement d'un liquide, on a l'habitude de considérer le coefficient de perméabilité relative :

$$K = g(P/\nu) \quad (LT^{-1}) \quad (3)$$

la loi de Darcy prenant alors la forme :

$$V = -K \overline{\text{grad}} \varphi \quad (4)$$

Pour un écoulement gazeux, on définit de même un coefficient de perméabilité relative au gaz :

$$K_g = P/\mu [M^{-1} L^3 T^{-1}] \quad (5)$$

de façon à écrire la loi de Darcy :

$$\bar{V} = -K_g \overline{\text{grad}} p \quad (6)$$

Pour un même terrain, la perméabilité géométrique est *a priori* une constante indépendante du fluide (nous verrons par la suite qu'il peut y avoir des exceptions). Il en résulte que la perméabilité K relative à un liquide de viscosité cinématique ν_l et la perméabilité relative à un gaz de viscosité dynamique μ_g seront liées par la relation :

$$K/K_g = g(\mu_g/\nu_l) \quad (7)$$

L'équation précédente permet de déduire la perméabilité K d'une mesure de K_g .

Rappelons maintenant rapidement le principe d'une mesure de perméabilité *in situ*. Une telle mesure se fait généralement dans un sondage à l'extrémité duquel on a aménagé une poche filtrante cylindrique. On crée dans le terrain un écoulement autour de cette poche, soit par pompage, soit par injection. La perméabilité se déduit alors de mesures simultanées du débit et de la perte de charge totale.

Dans le cas d'un liquide, l'écoulement sera régi par la loi de Darcy telle que la donne l'équation (4). A cette loi, il y aura lieu d'ajouter l'équation de continuité qui, étant donné l'incompressibilité du fluide, s'écrira :

$$\text{div } \bar{V} = 0 \quad (8)$$

Des équations (4) et (8) résulte l'équation générale de l'écoulement :

$$\Delta \varphi = 0 \quad (9)$$

C'est une équation de Laplace, de sorte que la charge φ est un potentiel harmonique qui ne dépend que des conditions aux limites (valeur de φ sur la surface de la crépine et valeur de φ à l'infini). On montre facilement que si Q est le débit et H la perte de charge totale (rabattement

dans le sondage), la perméabilité sera donnée par la formule :

$$K = f [Q/(H.D)] \quad (10)$$

— f est un coefficient de forme sans dimensions (1);

— D est le diamètre de la poche filtrante.

Dans le cas d'un écoulement gazeux, l'équation de continuité s'écrira :

$$\text{div}(\rho \bar{v}) = 0 \quad (11)$$

car le gaz est compressible et il faut considérer non les débits-volume, mais les débits-masse. A cette équation il convient d'ajouter l'équation d'état du gaz qui, dans le cas de l'écoulement isotherme d'un gaz supposé parfait, est :

$$p/\rho = RT = C^{\text{te}} \quad (12)$$

En réécrivant la loi de Darcy (6), compte tenu de (12), et en faisant apparaître le débit-masse spécifique $\rho \bar{V}$, on a :

$$\rho \bar{V} = -(K_g/RT) p \overline{\text{grad}} p = -(K_g/RT) \overline{\text{grad}} (p^2/2) \quad (13)$$

Les équations (11) et (13) aboutissent à l'équation générale :

$$\Delta(p^2) = 0 \quad (14)$$

Ici, ce n'est pas la pression, mais son carré qui est un potentiel harmonique.

Comme précédemment, on montre très aisément que, dans le cas d'un essai de perméabilité effectué en créant à travers le sol un écoulement gazeux, la perméabilité du gaz est donnée par :

$$K_g = f [Q_m/(\delta p.D)] \quad (15)$$

où Q_m est le débit-volume ramené à la pression moyenne p_m .

$$p_m = (p_1 + p_0)/2;$$

$$p_1 = \text{pression imposée dans le sondage};$$

$$p_0 = \text{pression atmosphérique};$$

$$\delta p = p_1 - p_0.$$

Le coefficient de forme f est le même que précédemment.

(1) Nous avons étudié par ailleurs ce coefficient de forme. Voir G. SCHNEEBELI : La mesure *in situ* de la perméabilité d'un terrain.

III^{es} Journées de l'Hydraulique, Alger 1954 (la Houille Blanche).

II. — L'INTÉRÊT PRATIQUE DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ A L'AIR

Il résulte des considérations théoriques ci-dessus qu'il est possible d'effectuer dans un terrain non saturé un essai à l'air qui donnera une perméabilité à l'air K_a et de déduire ensuite, grâce à l'équation (7), la perméabilité K relative à l'eau que présentera ce même terrain après saturation.

Ceci n'est pas un simple jeu de l'esprit scientifique mais présente un intérêt pratique considérable. Il arrive souvent, en effet, dans le cas de la construction d'un barrage, notamment, que l'on ait besoin de connaître la perméabilité relative à l'eau d'une couche de terrain située au-dessus de la nappe phréatique initiale et par conséquent non saturée.

L'essai à l'air présente alors des avantages certains pour plusieurs raisons :

En premier lieu, l'interprétation théorique d'un essai à l'eau présente des difficultés. Il est difficile, en effet, de tenir compte de la pesan-

teur et des effets capillaires. Par ailleurs, un essai à l'eau dans un terrain non saturé se fait forcément par injection de l'eau dans le sondage. Il y a alors un risque de colmatage par entraînement de fines particules (débris de forage). Ce colmatage, qui peut fausser considérablement l'essai, est beaucoup moins à craindre dans le cas d'une injection d'air. Enfin, il n'est pas toujours possible de disposer facilement d'une source ou d'une réserve d'eau, et l'essai à l'air est alors beaucoup plus simple à réaliser.

Il semble que la première utilisation de l'air pour des essais de perméabilité soit due à M. Raud, ingénieur de l'Electricité et Gaz d'Algérie, qui a ainsi étudié des calcaires fissurés (2). Pour notre part, nous avons utilisé l'air pour un grand nombre de mesures effectuées dans les terrains alluvionnaires sur lesquels est fondée la partie rive gauche du barrage de Matemale dans les Pyrénées-Orientales.

III. — LES ESSAIS A L'AIR EFFECTUÉS A MATEMALE

Le barrage de Matemale, situé sur le haut cours de l'Aude, est une digue en terre homogène d'une trentaine de mètres de haut. La partie principale de l'ouvrage est fondée sur du gore (granit décomposé) et par endroits sur du granit plus ou moins fissuré et altéré. Sur la rive gauche, le barrage est prolongé par une longue digue de faible hauteur érigée sur un plateau alluvial (voir fig. 1).

FIG. 1

Barrage de Matemale. — Croquis schématique

Les essais de perméabilité effectués sur ce plateau devaient permettre de décider s'il était nécessaire de prolonger sur la rive gauche le rideau

d'injections réalisé à l'aplomb de l'ancrage central du barrage.

Nous nous sommes résolus à effectuer ces essais à l'air parce que, d'une part, les alluvions à étudier étaient situées au-dessus de la nappe souterraine et que, d'autre part, des essais anciens effectués à l'eau avaient donné des valeurs de perméabilité qui nous paraissaient trop faibles, compte tenu de la nature des alluvions mise en évidence par les fouilles du barrage et l'ouverture de la ballastière.

Dans l'ensemble, une vingtaine d'essais à l'air ont été effectués dans six forages de petit diamètre répartis sur le plateau. Ces essais ont par la suite été complétés par un dispositif comprenant un puits de 500 mm entouré de piézomètres.

Pour les essais en petit diamètre, le forage des trous était effectué au wagon-drill (gros marteau perforateur sur glissière) et à l'air. Il s'agissait, en effet, d'éviter avant tout l'introduction d'eau dans le terrain, car cette eau, en obturant partiellement les pores, aurait faussé les essais. Les trous étaient tubés en tubes de 50×60 scellés au terrain à leur base.

Du point de vue de la réalisation pratique des essais, ce scellement constitue une nouveauté particulièrement intéressante. Il est réalisé par

(2) J. RAUD : « Emploi de l'air pour la détermination *in situ* des perméabilités de terrains. » *Congrès International des Grands Barrages*. Paris, 1955.

FIG. 2

l'injection, à la base du tube, successivement d'une suspension de bentonite dans du fuel-oil puis d'une faible quantité d'eau (fig. 2). Au contact de cette dernière, la bentonite subit un gonflement brutal qui transforme la suspension en un gel savonneux très consistant. En dessous du tube ainsi scellé, est aménagée une poche filtrante que l'on munit, pour éviter les éboulements, d'une crépine spéciale en grains de silice agglomérés.

L'air utilisé pour les essais était prélevé sur le réseau d'air comprimé du chantier et détendu à la pression de l'essai. Les débits étaient mesurés au moyen d'un débit-mètre dynamique et les pressions au moyen de manomètres de précision. La figure 3 montre un tel essai. On remarquera la simplicité de l'appareillage. Le détendeur et le débit-mètre sont réunis en un seul appareil. Le réglage du débit est obtenu aisément en agissant sur la membrane du détendeur. Il est à noter que les pressions utilisées sont en général très faibles, soit de l'ordre de quelques grammes à une dizaine de grammes par centimètre carré.

Le dispositif en grand diamètre comprenait un forage en 500 mm exécuté à sec à l'aide d'un « hammer-grab Benoto » ainsi que 7 piézomètres de 50 mm disposés ainsi que le montre la figure 4. Ce dispositif nous a permis de déterminer le degré d'anisotropie du terrain.

En effet, l'écoulement issu de la crépine cylindrique du puits de 500 est assimilable à l'écoulement théorique issu d'une source linéaire, du moins à une certaine distance de la crépine. La

FIG. 3

FIG. 4

répartition dans l'espace de la fonction potentielle p^2 est alors donnée, dans l'hypothèse d'un terrain isotrope, par :

$$p^2 = \Gamma \ln \frac{Z + C + \sqrt{r^2 + (Z + C)^2}}{Z - C + \sqrt{r^2 + (Z + C)^2}}$$

avec Γ une constante, p la pression d'air,

C la demi-longueur de la source linéaire,

r la distance horizontale du point considéré à la source;

Z l'ordonnée de ce point mesurée à partir du plan bissecteur de la source.

Pour $Z=0$, c'est-à-dire dans le plan bissecteur, cette formule devient :

$$p^2 = 2 \Gamma \ln \left[\left(\frac{C}{r} \right) + \sqrt{\left(\frac{C}{r} \right)^2 + 1} \right]$$

Si le terrain est anisotrope, on montre facilement que l'équation précédente devient :

$$p^2 = 2 \Gamma \ln \left[\left(\frac{C}{r} \right) \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} + \sqrt{\left(\frac{C}{r} \right)^2 \left(\frac{K_h}{K_v} \right) + 1} \right] \quad (16)$$

où K_v est la perméabilité verticale et K_h la perméabilité horizontale.

L'équation (16) montre que, pour une source de longueur $2C$ donnée, la chute de pression, lorsqu'on s'éloigne de cette source, dépendra du rapport K_h/K_v . Cette chute est d'autant plus rapide que K_h/K_v est plus proche de l'unité. Il est donc possible de déterminer K_h/K_v d'après l'allure de la décroissance de p^2 mesurée au moyen des piézomètres. Cette détermination se fait graphiquement par superposition des points expé-

mentaux sur les courbes théoriques (fig. 5). Pour ces essais, les pressions appliquées dans le puits étaient de l'ordre de 25 à 100 g/cm².

Cette méthode pour la détermination de l'anisotropie d'un terrain, a donné d'excellents résultats à Matemale où elle a permis de déceler, outre une anisotropie moyenne K_h/K_v de l'ordre de 12, une anisotropie dans le plan horizontal $K_{h1}/K_{h2}=3$. La plus grande des perméabilités horizontales, dirigée sensiblement dans le sens de l'axe du barrage était environ 20 fois plus élevée que la perméabilité verticale et 3 fois plus élevée que la perméabilité horizontale dirigée perpendiculairement à l'axe du barrage. L'anisotropie dans le plan horizontal provient très probablement d'une orientation générale des dépôts. Nous avons déjà constaté un phénomène analogue dans des alluvions du Rhône qui accusaient une perméabilité plus forte dans la direction parallèle au fleuve.

À la demande d'Electricité de France, un second essai en grand diamètre a été réalisé dans le compactage de l'ancrage de la digue. L'interprétation de cet essai a été plus délicate en raison de la faible largeur du massif soumis à l'essai. Pour tenir compte de l'effet des parois, nous avons dû recourir pour l'interprétation à

FIG. 5

Essai à l'air. Diamètre 500 mm
Détermination du degré d'anisotropie

l'analogie électrique. Le degré d'anisotropie trouvé est de l'ordre de 10.

Nous avons de même effectué dans le compactage des essais à l'air en petit diamètre. Cependant, les résultats obtenus étaient nettement pessimistes comparés aux nombreux résultats de laboratoire. Un des essais a donc été refait à l'eau, ce qui nous a permis de faire une constatation extrêmement intéressante :

Il s'est avéré, en effet, que la perméabilité mesurée décroissait avec le temps de saturation du terrain autour du forage. Cette diminution dans le temps, dont la figure 6 donne une idée, doit correspondre à un gonflement des constituants argileux.

Nous avons refait la même expérience dans les alluvions injectées à l'argile. Le phénomène s'est reproduit d'une façon beaucoup plus accentuée, car l'argile injectée était bentonitique et avait donc un pouvoir gonflant nettement supérieur à l'argile kaolinique du terrain compacté. Par contre, aucune différence substantielle n'a été relevée entre la perméabilité mesurée respecti-

FIG. 6

vement à l'eau et à l'air dans le terrain naturel. Ceci est dû probablement au fait que cette perméabilité provient essentiellement des couches sableuses et graveleuses ne contenant pratiquement pas d'argile.

IV. — CONCLUSIONS

Les essais de perméabilité à l'air, tels qu'ils ont été mis au point sur le chantier de Mame, ont donné entière satisfaction. Ils sont dans l'ensemble plus faciles à réaliser et donc plus sûrs que des essais à l'eau, qui demandent des précautions spéciales (détermination au cours de chaque essai d'un niveau piézométrique origine fictif). Les résultats obtenus à l'air recoupent, d'une façon raisonnable, ceux des essais à l'eau tant que le terrain ne contient pas de particules susceptibles de gonfler en présence d'eau. Ceci n'est cependant plus le cas pour les terrains argileux que le gonflement de l'argile rend moins perméables après saturation. Il y a donc une limitation à l'utilisation systé-

matique d'essais à l'air. Ceux-ci permettent de mesurer une perméabilité géométrique dont on ne peut tirer la perméabilité à l'eau que dans la mesure où elle n'est pas elle-même modifiée par la saturation.

Nous ne voudrions pas terminer cet exposé sans adresser nos remerciements les plus chaleureux à M. Girardot, ingénieur en chef, et à M. Botton, chef d'Aménagement de l'Electricité de France.

C'est grâce à l'intérêt constant qu'ils ont porté à des questions techniques d'un abord parfois difficile et à leurs encouragements bienveillants que nous avons pu réaliser les essais que nous venons de décrire.

DISCUSSION

Président : M. BARRILLON

M. le Président remercie M. SCHNEEBELI de son exposé dans lequel il a indiqué un certain nombre de « tours de main » nouveaux.

M. SCHOELLER précise les raisons des différences généralement constatées entre la perméabilité à l'air et la perméabilité à l'eau : des essais, rapportés à l'Union

Géophysique et Géodésique Internationale, ont montré que les interactions de surface entre la roche et le fluide interviennent dans ces écarts. D'autre part, au cours d'essais faits à Bordeaux sur des sables desséchés et saturés parfaitement, M. SCHOELLER et ses élèves n'ont trouvé une concordance entre les deux perméabilités que dans les mesures faites sur des sables sili-

cieux très purs et à grains parfaitement ronds, comme, par exemple, les sables dunaires; mais pour les molasses du Fronsadais, la différence peut être de 5 ou 10 %.

M. SCHNEEBELI indique que ces précisions sont certainement très intéressantes en théorie, mais que la précision recherchée dans la pratique, est de l'ordre de puissances de 10.

M. FERRANDON remarque que l'extension de la loi de Darcy aux écoulements gazeux pose certaines questions délicates :

« La loi de Darcy $\bar{V} = \bar{K} \text{ grad } \varphi$, relative à l'écoulement de filtration d'un *liquide*, trouve sa justification théorique dans une extension statistique des équations de l'écoulement permanent d'un *liquide* visqueux dans un tube fin, soit :

$\text{div } \bar{V} = 0$; $-\text{grad } p + \eta \Delta_2 \bar{V} = 0$, et les conditions aux limites concernant la pression aux extrémités du tube et la vitesse sur son contour.

« L'auteur de la communication nous propose de l'étendre à l'écoulement de filtration d'un *fluide compressible*. J'estime que ce processus appelle quelques réserves et devrait faire l'objet d'une justification adéquate.

« En effet, les équations des fluides visqueux *compressibles* :

$$\text{div } (\rho \bar{V}) = 0, \quad p = RT\rho \quad (\text{fluide idéal}),$$

$$-\text{grad } p + \eta/3 \text{ grad div } \bar{V} + \eta \Delta_2 \bar{V} = 0,$$

même pour une transformation *isotherme* ($T = T_0$) sont radicalement différentes des précédentes, par la masse spécifique que comporte l'équation de continuité et l'équation d'état, et le terme $\text{grad div } \bar{V}$, non nul, que comporte l'équation indéfinie.

« L'extension de la loi de Darcy aux gaz ne peut donc en toute rigueur, que constituer une approximation dont il conviendrait de justifier la valeur *pratique*. »

M. SCHNEEBELI reconnaît que l'extension des équations de Navier aux gaz pose des problèmes théoriques. Ces problèmes présentent une grande difficulté car il n'est pratiquement pas possible d'intégrer rigoureusement ces équations.

Toutefois, M. SCHNEEBELI exprime l'opinion que le terme de viscosité $\eta/3 \text{ grad } (\text{div } \bar{V})$ est faible par rapport au terme $\eta \Delta_2 \bar{V}$. L'erreur que l'on commet en le négligeant est du même ordre que celle qui correspond à la suppression du terme $\rho D\bar{V}/DT$, du moins dans le domaine usuel des pressions et des gradients de pressions. Il paraît donc licite d'étendre aux gaz la loi de Darcy sous la forme qu'elle revêt pour les liquides. De nombreux essais de laboratoire confirment ce point de vue. Néanmoins, conclut M. SCHNEEBELI, les questions soulevées par M. FERRANDON sont d'un intérêt théorique considérable et mériteraient une étude approfondie.

M. HABIB intervient, en faveur des essais à l'air, tout en faisant quelques réserves pour certains cas :

« M. FERRANDON vient de nous montrer que, dans l'écoulement d'un gaz à travers un milieu poreux, on ne peut parler rigoureusement d'une loi de Darcy à cause de la compressibilité du fluide. Cependant, si la compressibilité intervient peu, c'est-à-dire si les vitesses d'écoulement sont faibles ou, ce qui revient au même, si les pressions d'injection de l'air sont petites, on constate expérimentalement que le débit est proportionnel à la pression. M. J. RAUD, ingénieur à E.G.A., a présenté à Alger en 1954, des mesures de perméabilité en place, avec injection d'air au-dessus de la nappe dans des calcaires fissurés; la gamme de pression s'étendait entre 0,1 g/cm² et 1.000 g/cm², et la relation entre débit et pression était parfaitement linéaire. D'autre part, au laboratoire, les essais de perméabilité avec des fluides ou avec des gaz donnent des coefficients de perméabi-

lité identiques lorsque le squelette solide est inerte par rapport à la phase fluide. Ces essais, par exemple, sont délicats à réaliser avec du sable, car il ne faut pas modifier l'architecture des grains d'un essai à l'autre, mais la correspondance est excellente si l'on prend soin d'évacuer tout l'air dans les essais à l'eau et toute l'eau dans les essais à l'air : ces particules étrangères au fluide refusent de se mettre en mouvement et diminuent la porosité utile.

« C'est une des difficultés des essais en place à l'air : les pressions d'injection d'air sont, en général, très faibles, quelques dizaines de millimètres d'eau : elles sont insuffisantes pour déplacer l'eau capillaire du sol. Si la profondeur de la zone d'essai n'est pas très grande, il est difficile de chasser l'eau en place en injectant de l'air comprimé dans le forage avant l'essai : lorsque le recouvrement n'est pas très grand, on ne peut utiliser l'air comprimé sans courir le risque de désorganiser le milieu poreux. Ainsi, comme il est impossible de sécher le milieu poreux préalablement à l'essai, la perméabilité apparente du sol est plus petite.

« C'est d'ailleurs ce que les essais sur le terrain semblent montrer : les essais en place, à l'air, donnent de bons résultats bien que le coefficient de perméabilité obtenu soit peut-être un peu plus faible qu'avec les essais à l'eau. »

M. SCHNEEBELI précise qu'avant de procéder à un essai, on souffle dans le trou pendant une heure environ à la pression de 1 à 6 kg, afin de chasser et d'entraîner l'humidité résiduelle signalée justement par M. HABIB comme susceptible de fausser les résultats.

Mais M. VARLET manifeste sa crainte que cette insufflation à 6 kg de pression détruise ou altère la structure de la porosité dont on veut mesurer la perméabilité.

M. SCHNEEBELI s'efforce de rassurer M. VARLET en remarquant que la pression de 6 kg s'amortit très rapidement dans le terrain.

Par ailleurs, l'expérience des injections d'argile à Matemale a montré que l'on peut monter à des pressions nettement supérieures à 6 kg sans provoquer des claquages.

Naturellement la pression admissible sera d'autant plus faible que la profondeur de l'injection d'air sera plus faible.

M. VARLET pose une dernière question : quelles sont les vitesses respectives de l'eau et de l'air au cours des essais ? En effet, dans l'équation de conservation de la charge :

$$H = (p/\bar{\omega}) + (V^2/2g) = z$$

on néglige généralement $V^2/2g$ dans le cas des infiltrations parce que V est petit et V^2 *a fortiori*, mais si la vitesse de l'air est considérablement augmentée vis-à-vis de celle de l'eau, les perméabilités ne peuvent plus être comparées.

M. SCHNEEBELI répond qu'il a vérifié la validité des essais en s'assurant, pour différentes valeurs que les pressions restaient proportionnelles aux débits, comme le veut la loi de Darcy; les essais, dont les points représentatifs se trouvent sur la partie incurvée d'un graphique $Q(p)$ passant par l'origine et à concavité tournée vers le bas, correspondent à des valeurs du nombre de Reynolds dépassant la limite de validité de la loi de Darcy et l'on doit alors, pour calculer la perméabilité, prendre la pente de démarrage de la courbe.

M. le Président conclut qu'il n'est pas possible d'épuiser la question à cette séance par manque de temps et d'éléments d'appréciation. La question pourrait être reprise dans une séance qui sera présidée par M. FERRANDON, qui nous garantirait que nous ne nous écartons

pas des conceptions théoriquement correctes et cette séance pourrait avoir lieu quand nous aurons les résultats d'essais à l'air et à l'eau faits sur des terrains variés.

N'ayant pu intervenir lors de la discussion de la Communication de M. SCHNEEBELI, en raison des exigences de l'horaire, M. BARBEDETTE (Entreprise Bachy), nous a fait parvenir après la séance les observations ci-après, faites lors de l'exécution des essais de perméabilité à l'air :

« A la suite des essais de M. J. RAUD, ingénieur à E.G.A., et de la communication qu'il avait présentée à Alger en 1955, nous avons eu l'occasion d'utiliser cette même année en collaboration avec E.D.F. Alpes II, la méthode des mesures de perméabilité en place par injection d'air comparativement à des méthodes plus classiques pour la détermination de la perméabilité du terrain de fondation d'un barrage en projet.

« Les fluctuations très importantes de la nappe phréatique baignant les éboulis de pente constituant ce terrain de fondation (fluctuations dépassant la dizaine de mètres), nous ont permis de comparer les résultats obtenus dans le même terrain, mais saturé par injection d'eau et par pompage soit :

$$3.10^{-6} \text{ m/s} < K_{\text{air}} < 7.10^{-6} \text{ m/s}$$

$$1.10^{-4} \text{ m/s} < K_{\text{eau}} \text{ (Mandel)} < 6.10^{-4} \text{ m/s}$$

$$2.10^{-4} \text{ m/s} < K_{\text{eau}} \text{ (Dupuit)} < 3.10^{-4} \text{ m/s}$$

« Le coefficient de perméabilité à l'air apparaît donc

comme nettement inférieur au coefficient de perméabilité à l'eau, résultat opposé à celui obtenu par M. SCHNEEBELI.

« Ce résultat, à savoir $K_{\text{air}} < K_{\text{eau}}$, peut sans doute s'expliquer par le fait que dans un terrain non baigné par la nappe phréatique, l'eau capillaire du sol tend à diminuer la « porosité à l'air » du terrain étudié, l'air injecté ne pouvant déplacer l'eau absorbée par les éléments constitutifs du terrain. Il paraît difficile sinon impossible de déplacer cette eau absorbée par une injection d'air à forte pression (qui risquerait en outre de désorganiser le terrain). Quant au dessèchement du terrain avant l'essai, il apparaît comme pratiquement irréalisable.

« Je signalerai en outre, la grande difficulté rencontrée dans la mesure du volume de l'air injecté. La température de l'air injecté, en raison d'une part de l'importance du phénomène de détente, et d'autre part de l'influence de la température propre du terrain, est, et par suite son volume, mal déterminée.

« La mesure de perméabilité d'un terrain non saturé par injection d'air, présente un intérêt certain. Son exécution pratique reste cependant très délicate et son interprétation peut donner lieu à certaines difficultés en raison de l'importance prise parfois par les phénomènes de capillarité. C'est pourquoi nous lui préférons en général les méthodes de mesures par injection d'eau basées sur les écoulements « en parapluie » en terrain non saturé. »

NOTRE FRONTISPICE

WILLIAM THOMSON, LORD KELVIN (1824-1907)

Pour le physicien, le nom de KELVIN évoque une échelle de températures absolues, un galvanomètre à miroir, l'effet Thomson, un compas de marine, les prémisses de la Thermodynamique et le premier laboratoire de sciences physiques organisé en Angleterre.

Les Hydrauliciens, eux, le tiennent aussi pour l'un des leurs, en se rappelant qu'au marin passionné que fut lord Kelvin on doit notamment une sonde perfectionnée, un analyseur harmonique des marées et un appareil à prédiction mécanique des pleines et basses mers en un lieu et à une date donnés; que son premier mémoire, écrit en 1841, concernait l'Hydrodynamique vue à la lumière des théorèmes de Fourier, et qu'un long chapitre de ses *Elements of Natural Philosophy* traite de la statique des fluides.

Fils d'un professeur de mathématiques à l'Université de Glasgow, William Thomson était né à Belfast en 1824. Formé aux disciplines scientifiques au St. Peter's College de Cambridge, William Thomson fut, à vingt-deux ans, titulaire à l'Université de Glasgow de la chaire de Natural Philosophy, qu'il occupa pendant cinquante-trois années, au cours desquelles il rédigea plus de trois cents mémoires.

Epris d'ordre et de précision, il s'appliqua toujours à améliorer les méthodes de mesure ou les instruments existants et à en créer quand il n'y en avait pas.

Franchise et droiture, simplicité et modestie, bonhomie et bonté, courtoisie et bienveillance, tels étaient les traits saillants du caractère de ce savant qui, professeur éminent et industriel avisé, peut être tenu pour l'un des plus grands physiciens du temps.

En 1892, la Couronne éleva William Thomson à la dignité de Lord, Pair du Royaume-Uni, et il devint ainsi baron Kelvin of Largs.

Il mourut le 18 décembre 1907, dans son domaine de Netherall près Largs (Ecosse).

WILLIAM THOMSON, LORD KELVIN (1824-1907)

To physicists, the name KELVIN conjures up an absolute scale of temperature, the mirror galvanometer, the Thomson effect, a mariner's compass, the premises of thermodynamics and the first physics laboratory to be founded in Great Britain.

Hydraulic engineers also consider him to be one of their number for they remember that it was Kelvin the sailor who invented an improved sounding apparatus, a tidal harmonic analyser, a tidal predictor which predicted high and low tides at a given spot on a given day, that is first paper, written in 1841, concerned hydrodynamics in the light of Fourier's theorems and that a chapter of Kelvin's "Elements of Natural Philosophy" deals with hydrostatics.

William Thomson, who was born in Belfast in 1824, was the son of a Professor of Mathematics at Glasgow University. He was educated at St. Peter's College, Cambridge and, at the age of twenty two, was given the Chair of Natural Philosophy at Glasgow University, a post which he held for fifty three years during which he wrote more than three hundred papers.

He had a precise and ordered mind and was for ever concerned with improving existing methods of measurement and instruments, and creating new ones if they did not exist already.

Veracity and uprightness, simplicity and modesty, good-heartedness and kindness, courtesy and benevolence were the outstanding features of the character of a scientist who, besides being an eminent teacher and a canny industrialist, can be looked upon as being one of the greatest physicists of his day.

In 1892 William Thomson was raised to the peerage and became Baron Kelvin of Largs. He died on his estate at Netherall near Largs, Scotland, in 1907.