

# Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons : perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque

## Partie I - Validation des concepts de Carman et de Klinkenberg dans le cas d'un BHP

**Daniel PERRATON**

Docteur en Sciences appliquées, professeur  
Département de Génie de la construction  
École de Technologie supérieure  
Université du Québec, Montréal (Québec)  
Canada H3C 1K3

**Pierre-Claude AÏTCIN**

Professeur, Département de Génie civil  
Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec)  
Canada J1K 2R1

**André CARLES-GIBERGUES**

Professeur  
Institut national des Sciences appliquées, Toulouse, France

### RÉSUMÉ

Plusieurs chercheurs pensent qu'il existe une corrélation entre la perméabilité du béton et sa durabilité. Néanmoins, cette relation n'est pas toujours évidente lorsqu'on exploite la mesure de la perméabilité à l'eau pour caractériser la microstructure d'un béton soumis à des cycles de séchage. La mesure de la perméabilité aux gaz permet de quantifier de façon plus réaliste la mobilité d'un fluide à travers un béton après sa dessiccation. Cependant, la seule mesure de la perméabilité apparente à partir de la percolation d'un gaz ne permet pas de bien départager les écarts de la mobilité de l'eau interstitielle dans la microstructure, propre à chacune de différentes familles de béton. Les différentes approches que l'on utilise pour déterminer la perméabilité intrinsèque à partir de la perméabilité aux gaz sont exposées et ont été validées dans le cas d'un béton à haute performance (BHP). De même, la sélection des valeurs expérimentales obtenues pour divers paliers de pression doit être faite en se basant sur les hypothèses à la base de la loi de Darcy, de façon à pouvoir obtenir un résultat reproductible, indépendamment de l'approche expérimentale choisie. Quelques résultats obtenus sur des échantillons de BHP, pour différents gaz, sont présentés et discutés en fonction des paramètres qui décrivent la perméabilité et l'écoulement à travers un milieu poreux.

**MOTS CLÉS :** 32 - Béton hautes performances - Porosité - Séchage - Eau - Gaz - Capillarité - Éprouvette - Micro - Structure (physico-chim.) - Écoulement (fluide).

### Introduction

Plusieurs chercheurs pensent qu'il existe une corrélation entre la perméabilité du béton et sa durabilité [1] et [3]. Néanmoins, bien que certains bétons soient très peu perméables à l'eau, notamment dans le cas des bétons contenant de la fumée de silice, des chercheurs ont observé des différences de comportement en ce qui concerne leur durabilité au gel [4] et [5], notamment leur résistance à l'écaillage, laquelle nécessite une dessiccation partielle des éprouvettes. On peut donc se demander pourquoi la caractérisation de la perméabilité de certains bétons avec de l'eau par l'application du concept de Darcy ne permet pas de départager les différences de durabilité au gel, laquelle est tributaire de la mobilité de l'eau au sein de la pâte de ciment hydraté. Il est clair que la finesse de la porosité capillaire de certains bétons a pour effet d'interagir avec l'eau interstitielle et de modifier substantiellement sa mobilité, ce qui va à l'encontre même des hypothèses de base du concept de perméabilité tel que défini par Darcy. D'autre part, nous savons que le béton est un matériau dont les propriétés évoluent dans le temps et pour lequel la dessiccation a pour effet de modifier le réseau poreux.

La mesure de la perméabilité aux gaz permet de quantifier la mobilité d'un fluide à travers un béton après dessiccation. Cependant, lors de la mesure du débit apparent, on intègre au débit visqueux la contribution d'un débit secondaire, intrinsèque aux écoulements gazeux à travers un milieu poreux, le débit de glissement, lequel est d'autant plus significatif que la porosité est faible. Pour bien interpréter les résultats et espérer établir une relation valable entre la durabilité du béton et sa perméabilité à partir d'une mesure avec un gaz, il faut donc distinguer ces deux contributions au débit apparent.

La perméabilité au gaz d'un milieu poreux est généralement plus grande que celle mesurée avec un liquide. En 1941, Klinkenberg [12] a conclu que cette observation s'explique par le glissement des molécules gazeuses à l'interface gaz-solide. La perméabilité aux gaz d'un milieu dépend de la nature du gaz, du niveau de pression moyen d'écoulement et des caractéristiques chimiques et physiques du milieu, notamment de sa microstructure. Elle dépend fortement de la microstructure du milieu. Or, les différentes familles de béton que l'on retrouve aujourd'hui dans l'industrie du béton prêt à l'emploi ont des microstructures dont la porosité varie dans une large gamme.

Pour être en mesure de bien départager les écarts de la mobilité de l'eau interstitielle dans la microstructure, propre à chacune des différentes familles de béton, à partir de la percolation d'un gaz, il convient de chercher à déterminer la perméabilité intrinsèque  $k_v$  du milieu poreux plutôt que de se limiter à la seule mesure de la perméabilité apparente  $k_a$ . Trois approches peuvent donc être appliquées pour déterminer la valeur de  $k_v$  à partir de la mesure de la perméabilité aux gaz : l'approche de Klinkenberg, l'approche de Carman et la mesure à de forts débits d'écoulement.

Dans le cadre de cette publication, nous exposons dans un premier temps les caractéristiques spécifiques de l'écoulement d'un gaz à travers un milieu poreux tel que le béton. Dans un deuxième temps, nous traiterons des différentes approches qui peuvent servir à déterminer la perméabilité intrinsèque  $k_v$  à partir de la percolation d'un gaz. Finalement nous discuterons des résultats obtenus avec différents gaz et nous examinerons l'importance de la nature du gaz sur les résultats des mesures de perméabilité.

## Aspects théoriques

Le calcul de la perméabilité d'un milieu est basé sur la loi de Darcy : la vitesse d'écoulement d'un fluide est directement proportionnelle au gradient de pression. Darcy [6] a appliqué la loi de Hagen-Poiseuille au cas des milieux poreux de

nature granulaire et il a ainsi défini le concept de perméabilité d'un milieu. De l'avis de Darcy, ce coefficient est une propriété intrinsèque du milieu, quelle que soit la nature du liquide. Deux hypothèses ont servi de base aux énoncés de Darcy : l'écoulement est laminaire et le fluide d'infiltration est inerte face au milieu poreux. Eu égard à cette deuxième hypothèse et compte tenu de la finesse qui caractérise le réseau poreux d'un béton, particulièrement un BHP, on peut d'ores et déjà admettre que l'application de la loi de Darcy pour calculer le coefficient de perméabilité intrinsèque du béton par une mesure de perméabilité à l'eau est inappropriée.

Lorsque le fluide est compressible comme dans le cas de l'air, la formulation de la loi de Darcy, développée, *a priori*, dans le cas des fluides incompressibles, devient :

$$k_a = \frac{Q_1}{S} \frac{2 \mu L p_1}{(p_1^2 - p_2^2)} \quad (1)$$

La perméabilité apparente du milieu poreux  $k_a$  évaluée sur une éprouvette cylindrique de section  $S$  et d'épaisseur  $L$ , est donc définie à partir de la mesure du débit volumique  $Q_1$  d'un fluide de viscosité  $\mu$ , effectuée directement à l'entrée du perméamètre. Les conditions d'écoulement sont définies par les pressions à l'entrée et à la sortie, désignées par  $p_1$  et  $p_2$  respectivement et donnant lieu à une pression moyenne d'écoulement  $\bar{p}$ .

### Perméabilité intrinsèque, $k_v$ :

#### Carman, Klinkenberg et mesures effectuées à de forts débits d'écoulement

La perméabilité telle que définie par Darcy est uniquement valable pour des écoulements visqueux. Dans le cas d'un écoulement gazeux sous l'effet d'un gradient de pression, on peut voir le débit gazeux apparent se développer selon trois types d'écoulements primaires de nature très différente :

- ① un écoulement visqueux, ou de masse, dont le mouvement est régi par l'interaction mutuelle entre les molécules et qui peut être caractérisé par la viscosité (ou friction interne) du fluide (ce type d'écoulement se produit aussi bien dans le cas des liquides que dans le cas des gaz : il permet de définir la notion de perméabilité intrinsèque  $k_v$ ) ;
- ② un écoulement de glissement (slip flow) résultant des réflexions successives des molécules gazeuses contre les parois des pores et l'écoulement de masse du fluide ;
- ③ un écoulement de diffusion de surface lié à la différence de concentration de gaz adsorbé sur la paroi des pores, induit par la différence de pression partielle entre l'entrée et la sortie du système.

Si l'on définit  $k_a$  comme étant le coefficient de perméabilité apparente d'un milieu poreux,  $k_{ad}$  le coefficient de perméabilité lié à l'écoulement de diffusion de surface et  $k_g$  la somme des écoulements de masse et de glissement du gaz [7], on a :

$$k_a = k_{ad} + k_g \quad (2)$$

où :

$$k_g = \frac{k_v}{\mu} \bar{p} + \frac{4}{3} k_o \bar{v} \quad (3)$$

$k_o$  correspond au coefficient de perméabilité de l'écoulement de glissement et :

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8 R T}{\pi M}} \quad (4)$$

La valeur de  $k_a$ , déduite expérimentalement, est définie par les conditions limites d'écoulement, soit, dans le cas d'un écoulement isotherme, par la relation suivante :

$$k_a = \frac{v_1 p_1 L}{\Delta p} \quad (5)$$

Dans la plupart des essais en laboratoire, on utilise des gaz non adsorbants (hydrogène, hélium, air sec) de sorte que l'écoulement par diffusion de surface n'intervient pas lors de la mesure de la perméabilité. Dans le cas d'un fluide non adsorbant, la valeur de  $k_{ad}$  est donc nulle et le coefficient de perméabilité apparente  $k_a$  est alors égal au coefficient de perméabilité  $k_g$ . On a donc :

$$\frac{v_1 p_1 L}{\Delta p} = \frac{k_v}{\mu} \bar{p} + \frac{4}{3} k_o \bar{v} \quad (6)$$

L'équation (6) permet de réintroduire la notion de perméabilité intrinsèque liée aux écoulements visqueux  $k_v$  à partir de la mesure de la totalité du débit volumique apparent d'un gaz ( $Q_1 = S \times v_1$ ) dès lors que l'apport au débit total de la fraction liée au débit de glissement est connu.

Cette équation générale (6), proposée par Adzumi (Carman [8]), s'applique à tous les types de milieu poreux, non consolidés ou consolidés et à tous les types de fluides.

### Concept de Carman

En introduisant la notion de débit massique d'un fluide G, exprimé par unité de surface du solide poreux, on a :

$$G = \rho_1 v_1 = \frac{p_1 M}{R T} v_1 \quad (7)$$

L'équation (6) devient alors :

$$G \left\{ \frac{L}{\Delta p} \right\} = a \bar{p} + b \quad (8)$$

$$a = \frac{k_v M}{R T \mu} \quad (9)$$

$$b = \frac{4 M \bar{v}}{3 R T} k_o \quad (10)$$

Les paramètres a et b sont les constantes de Carman et les unités correspondantes sont :

$$\begin{aligned} &g \text{ m}^{-1} \text{ Pa}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ pour } a, \\ &g \text{ m}^{-1} \text{ Pa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ pour } b. \end{aligned}$$

En reportant sur un graphique la relation entre le débit massique gazeux (GA) et la pression moyenne d'écoulement, Knudsen (cité par Carman [8]) a observé une zone de transition entre l'écoulement par glissement et celui des molécules libres, pour laquelle le débit atteint une valeur minimale.

Lorsque la pression d'écoulement est supérieure à celle correspondant à l'égalité entre la taille d'un capillaire et le libre parcours moyen du gaz, la relation entre G et  $\bar{p}$  est linéaire si le gradient de pression est constant.

Carman [8] a montré que, dans le cas d'un milieu poreux non consolidé, on peut, à partir de la pente a de la relation entre G et  $\bar{p}$  et de son ordonnée à l'origine b, calculer le coefficient de perméabilité intrinsèque  $k_v$  et le coefficient  $k_o$  à l'aide des relations (9) et (10).

### Concept de Klinkenberg

Klinkenberg [12] a observé que les écarts notables de perméabilité que l'on mesure entre un liquide et un gaz sont de plus en plus faibles lorsque la perméabilité du milieu augmente. Compte tenu du fait que la perméabilité aux gaz d'un milieu est en relation directe avec le libre parcours moyen des molécules du gaz, Klinkenberg déduit que la valeur du coefficient de perméabilité est indépendante de la nature du fluide (liquide ou gaz) pour des niveaux de pression très élevés. Klinkenberg propose alors la relation générale suivante pour décrire l'écoulement des gaz à travers un milieu poreux :

$$k_a = k_v \left\{ 1 + \frac{b^*}{\bar{p}} \right\} \quad (11)$$

La valeur de  $b^*$  étant fonction de la porosité du milieu, elle augmente avec la valeur de la perméabilité et varie aussi d'un gaz à l'autre. On établit expérimentalement la relation qui existe entre  $k_a$  et  $1/\bar{p}$  pour en déduire les valeurs de  $k_v$  et de  $b^*$ . La valeur de  $k_v$  est déduite par extrapolation pour une pression d'écoulement infinie, soit lorsque  $1/\bar{p}$  tend vers zéro, alors que la valeur du paramètre  $b^*$  est obtenue directement à l'aide de l'équation (11).

**Calcul de  $k_v$  à partir de mesures effectuées à de forts débits gazeux : écoulement visco-inertiel**

On peut aussi déduire expérimentalement la valeur du coefficient de perméabilité  $k_v$  à partir de mesures à débits massiques élevés : écoulement visco-inertiel intermédiaire entre les états laminaire, visqueux et turbulent. Dans le cas d'un écoulement visco-inertiel, Reynolds (Carman [8]) a proposé, en 1900, de superposer le concept de la résistance à l'écoulement due à l'inertie du fluide à celui de la viscosité. On additionne alors la résistance à l'écoulement due à l'inertie, liée à son degré d'énergie cinétique ( $\rho v^2$ ), et celle due à la viscosité, selon la formule suivante :

$$\Delta p/L = \alpha v + \beta \rho v^2 \quad (12)$$

La variable  $\alpha$  correspond à  $\mu/k_v$  [8]. La variable  $\beta$  n'est pas une constante spécifique puisqu'elle est, en général, fonction de la vitesse de l'écoulement. Néanmoins, on a montré que  $k_v$  et  $\beta$  sont des fonctions du réseau, indépendantes de la nature du fluide.

On peut donc utiliser l'équation (12) pour décrire le comportement des écoulements, tant laminaire que transitoire. En reportant sur un graphique la relation (12), en fonction de  $G/\mu$ , on peut déduire la valeur de  $k_v$  en calculant l'inverse de la valeur de l'ordonnée à l'origine.

**Partie expérimentale**

Dans le but de déterminer la perméabilité intrinsèque d'un milieu consolidé tel que le béton à partir de la percolation d'un gaz, les concepts de Carman et de Klinkenberg, présentés à la section précédente, revêtent un intérêt particulier. Bien que l'étendue de la taille des pores capillaires d'une pâte de ciment hydraté soit constituée d'une fraction importante de pores relativement fins, dont la taille peut se révéler *a priori* de l'ordre de grandeur et même inférieure à la dimension du libre parcours moyen d'un gaz, il y a tout lieu de croire que l'écoulement du gaz à travers un béton desséché est régi par une fraction des pores les plus grossiers du réseau poreux. En effet, dans le cas d'autres milieux poreux, il a clairement été montré [13] qu'il existe des canaux d'écoulement continus constitués de capillaires ou de fissures. En dépit de la multitude de canaux que l'on peut parcourir à partir de l'ensemble des pores d'un réseau, la perméabilité est souvent définie par le plus grand diamètre d'entrée de pores dont la canalisation assure une continuité. Même dénué de fissures,

un réseau capillaire homogène mais non uniforme comporte inévitablement un certain nombre de canaux de pores grossiers qui conditionnent la mobilité de l'infiltrat [13].

La validation du concept de Carman dans le cas des BHP desséchés mettrait en relief le fait que la percolation d'un gaz soit gouvernée par une porosité grossière constituée de gros pores capillaires inter-reliés par la présence de microfissures au sein de la matrice cimentaire. Un programme d'essai en laboratoire a donc été élaboré de façon à vérifier l'applicabilité de la relation de Carman et de Klinkenberg au cas d'un BHP.

Nous avons mesuré expérimentalement le débit massique gazeux à travers des éprouvettes de BHP desséchés, à des pressions d'écoulement faibles, voisines de la pression atmosphérique. Pour de tels niveaux de pression d'écoulement, il est à toutes fins utiles improbable que la structure du réseau poreux en soit altérée sous l'effet de la pression et les valeurs du libre parcours moyen de l'air correspondantes se situent autour de 0,06  $\mu\text{m}$ .

**Composition, vieillissement des bétons et conditionnement des éprouvettes**

Les essais de perméabilité ont été effectués sur un béton à haute performance (rapport E/C de 0,30). La composition et les propriétés du béton frais sont données dans le tableau I. Le béton a été mûri dans un bac d'eau saturée en chaux pendant 14 jours. Après 14 j de mûrissement, nous avons carotté et surfacé des éprouvettes ( $\phi$  95 mm  $\times$  50 mm et  $\phi$  38 mm  $\times$  50 mm) à partir de plaques de béton, pour mesurer la perméabilité aux gaz. Toutes les éprouvettes mises à l'essai sont représentatives de la masse du béton puisqu'elles ont été taillées suffisamment loin des parois.

TABLEAU I  
Composition et propriétés du béton frais

Identification		I
kg/m <sup>3</sup>	Eau (avec SP)	150
	Ciment	500
	Gros granulats	1 050
	Granulats fins	775
l/m <sup>3</sup>	Superplastifiant (SP)	14,9
$\rho_{\text{béton frais}}$ (kg/m <sup>3</sup> )		2 480
Affaissement (mm)		190
Teneur en air (%)		2,4
$f_{c28}$ (MPa)		76

### Conditionnement des éprouvettes

Le mûrissement au jeune âge est déterminant du point de vue de la perméabilité aux gaz. Le conditionnement des éprouvettes de béton est l'un des aspects les plus délicats lorsqu'il s'agit d'évaluer sa perméabilité aux gaz. Le béton est un matériau fragile et le processus de conditionnement des éprouvettes peut modifier substantiellement le réseau poreux et donner lieu à la formation de microfissures. La présence de microfissures n'est pas en soi un indice d'altération ; elles font partie intégrante du béton. Néanmoins, en termes de durabilité, la microfissuration peut être néfaste bien que, dans certains cas, on lui octroie un rôle utilitaire. Notamment, dans la résistance à l'écaillage du béton, on préconise le séchage de la surface du béton exposée aux sels fondants avant le premier gel pour favoriser la formation de microfissures et faciliter ainsi la mobilité de l'eau interstitielle au sein du matériau. Quoiqu'il en soit, il est indéniable que la microfissuration joue un rôle de premier ordre lorsque l'on cherche à déterminer la mobilité d'un fluide à travers le béton. Dans bien des cas, on ne peut y échapper.

Le choix du mode de conditionnement retenu pour cette étude est issu d'une synthèse des principaux travaux sur le sujet. Toutefois, l'étude de l'influence du processus de conditionnement dépasse le cadre de la présente publication et fera l'objet d'une publication particulière par les auteurs. De façon à diminuer les dommages à la microtexture induits par le processus de dessiccation à l'étuve des éprouvettes, il a été convenu de les dessécher de façon graduelle. À la suite du carottage, les éprouvettes ont été entreposées en laboratoire (humidité relative de 50 % ;  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) pendant une période de 28 j avant d'être séchées à l'étuve, 21 j à  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  et jusqu'à masse constante à  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## Résultats

### Vérification de la nature de l'écoulement qui prévaut en cours d'essai : validation des valeurs expérimentales

Pour déterminer la valeur de la perméabilité intrinsèque d'un milieu poreux, il faut mesurer le débit apparent à plusieurs niveaux de pression d'écoulement comme proposé par Klinkenberg et Carman. L'application des concepts proposés par ces chercheurs est basée sur l'exploitation de la loi de Darcy. Puisque l'application de la loi de Darcy sous-entend implicitement que l'écoulement à travers le milieu poreux est laminaire, c'est-à-dire que la résistance de la masse de fluide à l'écoulement est uniquement due à sa

viscosité, il faut s'assurer que les conditions d'essai donnent bien lieu à un écoulement de nature visqueux.

Dranchuk et Kolada [10] ont largement étudié cette question lors de la mesure de la perméabilité aux gaz de carottes de roches. Ces auteurs ont montré que l'on peut différencier les valeurs expérimentales qui sont reliées à un écoulement de nature visqueuse et celles d'un écoulement de nature transitoire à partir de la relation entre  $\Delta p^2$  et  $Q_1$ . En effet, selon les équations (1) et (11), on doit avoir une relation bilogarithmique linéaire entre  $\Delta p^2$  et  $Q_1$ , ce qui permet de valider la conformité des mesures expérimentales à la nature de l'écoulement.

La figure 1 présente les résultats d'un essai de perméabilité effectué à plusieurs niveaux de pression d'écoulement sur une éprouvette de BHP. On constate qu'une partie des points s'aligne sur une droite mais que, pour les forts débits d'écoulement, il n'y a plus de linéarité. Cet écart des points par rapport à une droite est attribuable entre autres au changement de régime de l'écoulement en cours d'essai : de l'état visqueux à l'état transitoire [9] et [10]. Par conséquent, dans l'application de la relation de Klinkenberg, aussi bien que pour celle de Carman, on ne doit pas intégrer ces valeurs expérimentales si l'on souhaite obtenir un résultat reproductible, indépendant de l'approche expérimentale choisie.

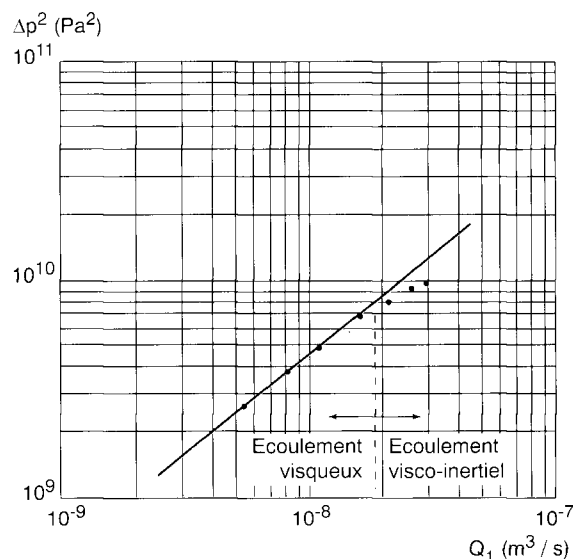


Fig. 1 - Relation entre le débit apparent  $Q_1$  et le gradient de pression  $\Delta p^2$  obtenue expérimentalement sur BHP.

Dranchuk et Kolada [10] ont noté que la tendance que semblent prendre les valeurs pour de forts débits d'écoulement va à l'encontre de ce que l'on devrait observer. Ces chercheurs attribuent ce comportement à l'importance du débit

de glissement lors de la mesure de la perméabilité aux gaz, due au fait qu'en cours d'essai la valeur de la pression moyenne d'écoulement change et, par conséquent, la contribution relative du débit de glissement aussi. Cependant, la sélection des valeurs expérimentales significatives à partir de la relation entre  $\Delta p^2$  et  $Q_1$  (fig. 1) est assujettie à un certain degré d'incertitude. Pour remédier à cette situation, Dranchuk et Kolada [10] proposent d'utiliser la relation de Klinkenberg, permettant ainsi d'intégrer l'importance relative du débit de glissement. Somme toute, il s'agit, dans un premier temps, de déduire graphiquement des valeurs expérimentales les paramètres  $k_v$  et  $b^*$  en utilisant des valeurs conservatrices, c'est-à-dire celles qui présentent une linéarité dans la relation entre  $\Delta p^2$  et  $Q_1$  (fig. 1). Ensuite, à partir de ces valeurs  $k_v$  et  $b^*$ , on trace à nouveau la relation entre  $\{\Delta p^2 (1 + b^*/\bar{p})\}$  et  $Q_1$  (fig. 2), de façon à finalement extrapoler la vraie valeur de la perméabilité intrinsèque du béton,  $k_v$ .

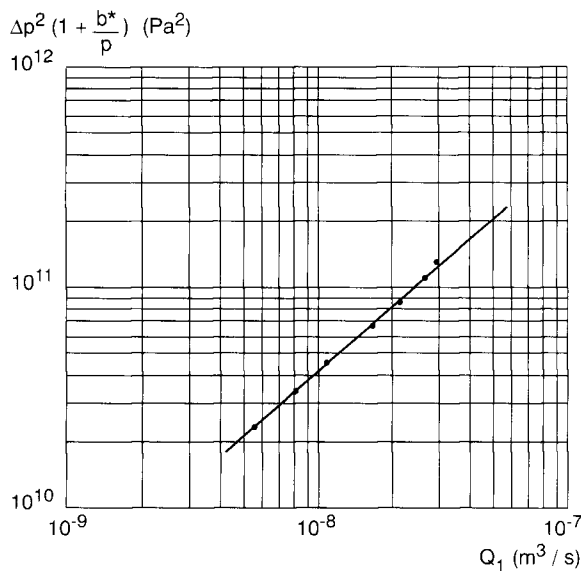


Fig. 2 - Relation entre  $Q_1$  et  $(1 + b^*/\bar{p}) \Delta p^2$  pour tenir compte de la variation de la pression moyenne d'écoulement en cours d'essai en utilisant les résultats de la figure 1.

Dans le calcul de  $k_v$  il faut donc utiliser des valeurs expérimentales significatives : les valeurs expérimentales doivent être représentatives d'un écoulement de nature visqueuse. Si l'on prend en considération un ensemble de résultats expérimentaux sans tenir compte de leur validité, on peut être conduit à estimer une valeur erronée des paramètres  $k_v$  et  $b^*$ . Par exemple, à partir de l'ensemble de résultats de la figure 1 (7 points), on évalue à  $13 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  la valeur de  $k_v$  alors qu'en réalité la valeur de  $k_v$  est de  $5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  lorsque l'on retient uniquement les

points pour lesquels on demeure dans le domaine d'un écoulement de nature visqueuse (les 4 premières valeurs). Cet exemple montre la sensibilité de ces approches et la nécessité de bien sélectionner les valeurs expérimentales significatives pour le calcul des paramètres  $k_v$  et  $b^*$ .

### Validation de l'approche expérimentale de Carman aux BHP

Des essais effectués sur des échantillons de BHP ont montré que la relation entre  $G[L/\Delta p]$  et  $\bar{p}$  est linéaire et répond bien à l'énoncé de Carman établi pour des milieux poreux non consolidés. La figure 3 montre une relation type obtenue à partir de nos essais en laboratoire sur le BHP.

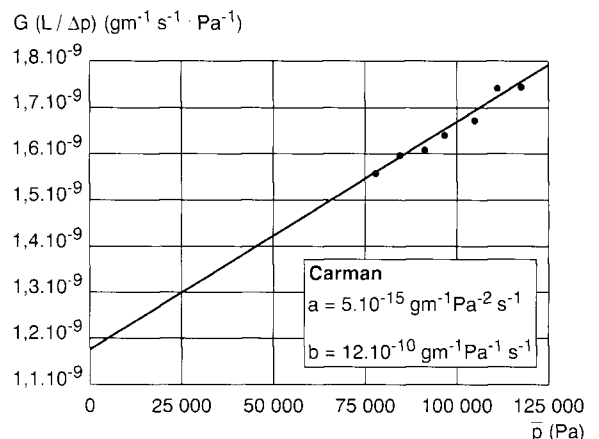


Fig. 3 - Relation entre  $G[L/\Delta p]$  et  $\bar{p}$  obtenue expérimentalement sur BHP.

À partir de la valeur de la pente de la droite présentée sur la figure 3, on peut calculer, en se basant sur l'équation (9), la valeur de  $k_v$ , soit :  $k_v = 8,3 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ . Nous avons également calculé la valeur de  $k_v$  à partir de l'approche de Klinkenberg soit :  $k_v = 8,1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  (fig. 4). Cette dernière valeur est pratiquement identique à celle obtenue par l'application du concept de Carman.

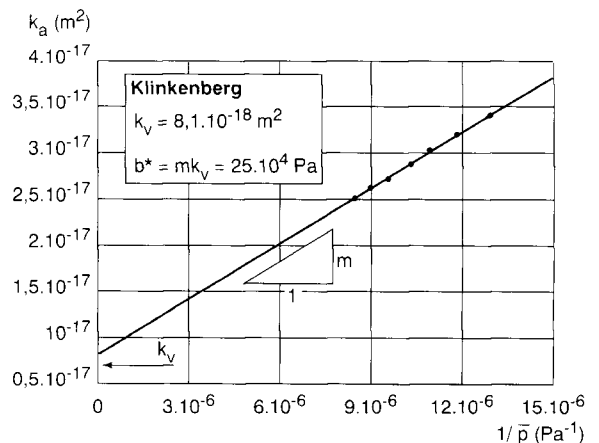


Fig. 4 - Relation entre  $k_a$  et  $1/\bar{p}$  obtenue expérimentalement sur BHP.

Il est important de souligner que les essais ont été conduits en contrôlant non seulement le niveau de pression moyenne d'écoulement, mais aussi le gradient de pression  $\Delta p$ , maintenu constant en cours d'essai, selon une valeur optimale : la valeur optimale de  $\Delta p$  correspond en fait à la valeur maximale pour laquelle la nature de l'écoulement demeure toujours dans le domaine visqueux. Cette valeur a été préalablement établie, pour le BHP étudié, par la mise en application du concept développé par Dranchuk et Kolada [10] (section précédente).

À la lumière des résultats obtenus en laboratoire, on peut convenir que les observations de Carman pour un milieu non consolidé se transposent bien au cas du béton, un milieu consolidé.

### Importance du débit de glissement dans la mesure de la perméabilité au gaz sur BHP

Pour le BHP étudié, nous avons mesuré une variation du débit gazeux comprise entre 5,3 et 8,0  $\mu\text{l/s}$  (éprouvette :  $\phi$  95 mm ; L = 50 mm). En tenant compte des résultats moyens présentés dans le tableau II, on peut calculer l'importance relative du débit gazeux attribuable au glissement des molécules gazeuses [équation (8)]. À la température de 20 °C et à une pression de

120 kPa, la masse volumique de l'air est d'environ 1 315  $\text{g/m}^3$ . Pour une surface d'écoulement de 1  $\text{m}^2$ , on calcule que le débit d'air à l'entrée serait de 930  $\mu\text{l/s}$ , dont la fraction du débit par glissement serait de 70 % (650  $\mu\text{l/s}$ ). Dans le cas où la pression moyenne serait plutôt de 500 kPa, on calcule que la fraction du débit par glissement est réduite à 30 % (125  $\mu\text{l/s}$  pour un débit apparent de 395  $\mu\text{l/s}$ ). Pour des essais menés à une pression moyenne d'écoulement se situant autour de la pression atmosphérique, on constate que la fraction de l'écoulement par glissement des molécules est prépondérante pour ce type de béton. Cette constatation se révèle un élément majeur compte tenu du fait que la plupart des essais de perméabilité aux gaz en laboratoire sont effectués dans cette plage de pression.

### Perméabilité du béton pour différents gaz

Pour le BHP étudié, nous avons mesuré sur des éprouvettes de  $\phi$  38 mm les débits massiques de trois gaz différents : l'azote ( $\text{N}_2$ ), l'argon (Ar) et l'hélium (He). Nous avons choisi des gaz dont les masses molaires sont relativement différentes, mais dont le comportement se rapproche de celui des gaz parfaits. Le tableau III présente les principales caractéristiques des gaz utilisés lors de ces essais. Les résultats des essais sont présentés sur la figure 5.

TABLEAU II  
Compilation des résultats expérimentaux pour les constantes de Carman et Klinkenberg du BHP étudié (Éprouvette :  $\phi$  95 mm ; L = 50 mm)

		Constantes de Carman		Constantes de Klinkenberg	
		$a \times 10^{15}$ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$b \times 10^{10}$ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$k_v \times 10^{18}$ ( $\text{m}^2$ )	$b \times 10^{-4}$ (Pa)
I	A	4,8	9,7	9,7	15,6
	B	4,2	10,8	6,8	27,2
	C	4,9	11,7	8,1	24,5
Moyenne		4,6	10,7	8,2	22,4
Écart type		0,4	1,0	1,5	6,1

TABLEAU III  
Principales caractéristiques des gaz utilisés dans les essais de perméabilité

Gaz	Symbole	Masse molaire M (g/mole)	Viscosité $\mu \times 10^{15}$ (1) ( $\text{Pa} \times \text{s}$ )	Libre parcours moyen $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	
				à 1 atm	à 0,1 mm Hg
Hélium	He	4,00	1,96	0,194	1 470
Azote	$\text{N}_2$	28,01	1,76	0,066	500
Argon	Ar	39,95	2,22	0,070	530
Air sec	---	28,97	1,82	0,067	510

(1) : valeurs à 20 °C.

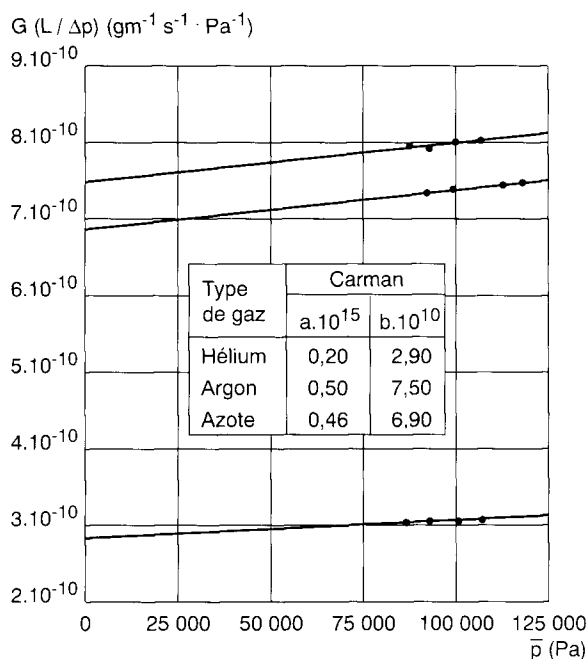


Fig. 5 - Détermination des constantes a et b de Carman pour différents gaz, mesurées sur une même éprouvette de BHP.

Dans le cadre de cette série d'essais, les éprouvettes ont subi un autre type de conditionnement afin de prévenir les risques d'une fissuration secondaire, « parasite », induite en peau du béton par le processus de dessiccation. En effet, dans le cas des éprouvettes desséchées à l'étuve, nous avons observé, à l'aide d'un microscope optique (grossissement de 120x), la présence d'une microfissuration superficielle en peau du béton, orientée préférentiellement selon la direction de l'écoulement. Afin de ralentir le processus d'évaporation en peau, de façon à minimiser l'intensité des gradients hydriques responsables en grande partie de cette fissuration secondaire, les éprouvettes ont été enrubannées de plusieurs couches d'une pellicule de cellophane, laquelle présente une très faible perméabilité, avant d'être desséchées à l'étuve. Il est important de signaler qu'en scellant ainsi les éprouvettes, on cherche à contrôler l'évolution de leur perte d'eau en cours de dessiccation pour limiter le risque d'une fissuration secondaire. Les éprouvettes, encore à l'état saturé avec surface sèche (SSS), ont donc été minutieusement scellées

dans des feuilles de cellophane, puis entreposées dans une enceinte maintenue sous vide (pression absolue moyenne de 1,5 kPa) à la température de 50 °C jusqu'à masse constante (différence de masse inférieure à 0,1 % entre deux pesées successives).

Les résultats obtenus pour les différents gaz peuvent être comparés à l'aide du modèle de Carman [8]. Dans le cas de milieux poreux non consolidés, Carman a observé que les produits  $a\mu$ ,  $\mu$  étant la viscosité du gaz, et  $b/\sqrt{M}$ , M étant la masse molaire du gaz, restent constants pour différents types de gaz. Dans la mesure où l'on montre que cet énoncé reste valable pour un matériau tel que le béton, cette observation permettra d'élargir le champ d'application de la relation de Carman [8] exprimée par l'équation (8).

À partir des résultats présentés sur la figure 5, nous avons calculé et comparé les produits obtenus entre les constantes de Carman et les caractéristiques respectives de chacun de ces gaz (tableau IV). Les résultats sont tout à fait satisfaisants dans le cas du paramètre  $b/\sqrt{M}$ ; ils le sont moins dans le cas du produit  $a\mu$ . Néanmoins, l'écart relatif obtenu entre les valeurs maximale et minimale pour l'ensemble des essais effectués dans le cadre de nos recherches [11] est nettement plus important dans le cas du produit  $a\mu$ , qui varie entre  $0,4 \cdot 10^{-20}$  et  $75 \cdot 10^{-20}$  que, dans le cas du rapport  $b/\sqrt{M}$ , qui varie entre  $10^{-10}$  et  $18 \cdot 10^{-10}$ .

De surcroît, compte tenu de la porosité très fine d'un béton à haute performance associée aux conditions d'essai, le débit apparent est gouverné en grande partie par l'écoulement de glissement des molécules du gaz : la contribution du débit de type visqueux (écoulement de masse) est très faible. En effet, on constate sur la figure 5 que la pente de ces droites, associée au paramètre a de Carman, est pratiquement nulle.

Dans ce contexte, on peut admettre que les résultats concernant les produits  $a\mu$  et  $b/\sqrt{M}$  sont tout à fait satisfaisants. À la lumière de ces résultats, on peut convenir, *a priori*, que les observations de Carman pour un milieu non consolidé se transposent au cas du béton, un milieu consolidé.

TABLEAU IV  
Compilation des résultats pour les différents gaz

Type de gaz	Constantes de Carman				Estimation des constantes pour l'air	
	$a \times 10^{15}$	$a\mu \times 10^{20}$	$b \times 10^{10}$	$b/\sqrt{M} \times 10^{10}$	$a' \times 10^{15}$	$b' \times 10^{10}$
Hélium	0,20	0,4	2,9	1,4	0,2	7,5
Azote	0,50	0,8	6,9	1,3	0,4	7,0
Argon	0,46	1,1	7,5	1,2	0,6	6,5



Par le biais des résultats obtenus pour chacun de ces gaz (tableau IV), nous avons calculé les constantes  $a'$  et  $b'$  de Carman, constantes que l'on devrait obtenir expérimentalement si l'on utilisait de l'air comme fluide. Cet exercice donne une indication sur les écarts potentiels entre les valeurs de perméabilité du béton pour des laboratoires travaillant avec des gaz différents. Le coefficient de variation calculé est de 7 % pour une valeur moyenne de  $7.10^{-10}$  dans le cas de la variable  $b'$ . Pour les raisons évoquées précédemment, il n'est pas approprié de porter un jugement sur le coefficient de variation dans le cas de la variable  $a'$ .

## Conclusion

- ① Dans le calcul du coefficient de perméabilité intrinsèque à partir de l'application de l'approche de Carman ou de celle de Klinkenberg, on doit s'assurer d'utiliser les valeurs expérimentales pour lesquelles l'écoulement est de nature visqueuse.
- ② À partir de la relation entre  $\Delta p^2$  et  $Q_1$ , on peut départager les valeurs expérimentales pour lesquelles l'écoulement est de nature visqueuse de celles pour lesquelles il ne l'est pas. Évidemment, cette étape est nécessaire pour tous les types de milieux poreux, incluant les bétons usuels.
- ③ Les résultats obtenus indiquent que la valeur du coefficient de perméabilité intrinsèque du béton demeure la même pour les deux approches

étudiées, Carman et Klinkenberg, pour autant que les conditions d'essai donnent lieu à un écoulement de nature visqueuse.

- ④ La détermination des constantes  $a$  et  $b$  de Carman permet de connaître le coefficient de perméabilité intrinsèque d'un BHP.
- ⑤ La relation entre  $G[L/\Delta p]$  et  $(\bar{p})$  obtenue pour le BHP étudié est linéaire et confirme les observations de Carman établies dans le cas des milieux poreux non consolidés.
- ⑥ Pour des essais menés à une pression moyenne d'écoulement voisine de la pression atmosphérique, la fraction de l'écoulement par glissement des molécules gazeuses est prépondérante pour le cas des BHP, d'où la nécessité d'évaluer les propriétés intrinsèques plutôt que de se limiter à la seule mesure de la perméabilité apparente.
- ⑦ Les produits  $a\mu$  et  $b/\sqrt{M}$  restent constants pour différents types de gaz dans le cas du BHP étudié.
- ⑧ Lors de la mesure du débit massique gazeux à divers paliers de pression, nous n'avons pas observé une zone de transition telle que définie par Knudsen, pour laquelle le débit atteint une valeur minimale. Cette observation nous porte à conclure que le réseau d'écoulement qui conditionne le passage d'un gaz à travers le béton est nettement plus grossier que celui représenté par la porosité capillaire de sa pâte de ciment hydraté : la présence de microfissures facilite le parcours d'un gaz à travers les réseaux des pores capillaires les plus grossiers de la pâte de ciment hydraté.

### Liste des principaux symboles utilisés

A	surface du solide poreux ( $m^2$ )
a	constante de Carman ( $gm^{-1} Pa^{-2} s^{-1}$ )
b	constante de Carman ( $gm^{-1} Pa^{-1} s^{-1}$ )
$b^*$	constante de Klinkenberg (Pa)
GA	débit massique du gaz (g/s)
$k_v$	coefficient de perméabilité intrinsèque pour les écoulements visqueux ( $m^2$ )
$k_a$	coefficient de perméabilité apparente ( $m^2$ )
$k_o$	coefficient de perméabilité de l'écoulement de glissement ( $m^2$ )
L	longueur de l'éprouvette (m)
M	masse molaire du gaz ( $g\ mole^{-1}$ )
$(\bar{p}) = p_m$	pression moyenne d'écoulement ( $p = (p_1 + p_2)/2$ ) (Pa)
$p_1$	pression d'entrée (Pa)
$p_2$	pression à la sortie (Pa)
$\Delta p$	gradient de pression $\Delta p = p_1 - p_2$ (Pa)
$\Delta p^2$	$\Delta p^2 = p_1^2 - p_2^2$ ( $pa^2$ )
p	pression
$p_{atm}$	pression atmosphérique
$Q_a$	débit apparent
$Q_1$	débit du fluide à la pression $p_1$ ( $m^3/s$ )
$\bar{R}$	constante des gaz parfaits ( $8,31434\ N\ m\ mole^{-1}\ K^{-1}$ )
R	constante pour un gaz particulier

### Liste des principaux symboles utilisés (suite)

S	surface de l'éprouvette (m <sup>2</sup> )
T	température (°C)
T <sub>o</sub>	température de l'essai (°C)
$\bar{v}$	vitesse moléculaire moyenne

### Lettres grecques

$\mu$	viscosité absolue ou dynamique du fluide (N . s . m <sup>-2</sup> )
$\lambda$	libre parcours moyen des molécules gazeuses ( $\mu\text{m}$ )
$\alpha$	poids volumique du fluide (N/m <sup>3</sup> ) : $\alpha = \rho g$
$\alpha_g$	surface spécifique de la particule (mm <sup>-1</sup> )
$\rho$	masse volumique spécifique du fluide (kg/m <sup>3</sup> )

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- |  |   |
|--|---|
| <p>[1] BIER T.A., LUDIRDJA D., YOUNG J.F., BERGER R.L. (1989), <i>The effect of pore structure and cracking on the permeability of concrete</i>, MRS Boston, vol. <b>137</b>, pp. 235-241.</p> <p>[2] WHITING D. (1988), <i>Permeability of selected concretes</i>, ACI, SP-108, pp. 195-211.</p> <p>[3] MEHTA P.K. (1991). Durability of concrete – Fifty years of progress?, ACI, SP-126, pp. 1-31.</p> <p>[4] GAGNÉ R., MARCHAND J. (1993), <i>La résistance à l'écaillage des bétons à haute performance : État de la question</i>, Atelier international sur la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants, 30-31 août, Université Laval, Québec, CRIB et Rilem éd.</p> <p>[5] PIGEON M., PERRATON D., PLEAU R. (1987), <i>Scaling tests of silica fume concrete and the critical spacing factor concept</i>, ACI, SP-100, pp. 1155-1182.</p> <p>[6] DARCY H. (1856), <i>Les fontaines publiques de la ville de Dijon</i>, Édition V. DALMONT, Paris.</p> <p>[7] CARMAN P.C., MALHERBE P. le R. (1950), <i>Diffusion and flow of gases and vapours through micropores, II. Surface flow</i>, Proceedings of Royal Society of London, Serie A, Mathematical and physical sciences, vol. <b>203</b>, pp. 165-178.</p> | <p>[8] CARMAN P.C. (1956), <i>Flow of gases through porous media</i>, Academic Press, New York, 182 pages.</p> <p>[9] DRANCHUK P.M., SADIO S. (1965), The interpretation of permeability measurements, <i>The Journal of Canadian Petroleum Technology</i>, juillet-septembre, Montréal, pp. 130-133.</p> <p>[10] DRANCHUK P.M., KOLADA L.J. (1968), Interpretation of steady linear visco-inertial gaz flow data, <i>The Journal of Canadian Petroleum Technology</i>, janvier-mars, Montréal, pp. 36-40.</p> <p>[11] PERRATON D. (1992), <i>La perméabilité aux gaz des bétons hydrauliques</i>, Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, Toulouse, France, 225 pages.</p> <p>[12] KLINKENBERG L.J. (1941), <i>The permeability of porous media to liquids and gases</i>, API Drilling and Production Practices, pp. 200-213.</p> <p>[13] DULLIEN F.A.L. (1979), <i>Porous media, fluid transport and pore structure</i>, Academic Press Inc., London, 396 pages.</p> <p>[14] LECHUGA J.A., ALEGRE S. (1986), <i>Concrete permeability with fly ash from CERCOS. Results obtained with a new method</i>, Document supplémentaire, Madrid, Malhotra, 62 pages.</p> |
|--|---|

### ABSTRACT

#### Measurement of the gaseous permeability of concrete:

#### Part I - Validation of the Carman and Klinkenberg concepts in the case of a high performance concrete (BHP)

D. PERRATON, P.-Cl. AÏTCIN, A. CARLES-GIBERGUES

Some researcher engineers consider that there is a correlation between the permeability of concrete and its durability. However, this link is not always apparent when measurements of permeability to water are used to characterize the microstructure of concrete subjected to drying cycles. Measurement of gaseous permeability provides a more accurate means of quantifying the mobility of a fluid through dry concrete. However, just measuring apparent permeability on the basis of the percolation of a gas does not provide a means of identifying differences in the mobility of pore water in the microstructure, which are specific to each type of concrete. The different methods used to determine the intrinsic permeability from the gaseous permeability are described and have been validated for high performance concrete. The experimental values obtained for different levels of pressure should also be selected on the basis of the hypotheses that underlie Darcy's law in order to provide a result that is reproducible irrespective of the experimental approach. Some results obtained with samples of high performance concrete, for different gases, are presented and discussed in relation to the parameters that describe permeability and flow through a porous medium.