

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 Δp , maintenu constant en cours d'essai, selon une valeur optimale : la valeur optimale de Δp 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 : $\phi 95 \text{ mm}$; $L = 50 \text{ mm}$). 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 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 $\phi 38 \text{ mm}$ les débits massiques de trois gaz différents : l'azote (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 : $\phi 95 \text{ mm}$; $L = 50 \text{ mm}$)

		Constantes de Carman		Constantes de Klinkenberg	
		$a \times 10^{15}$ ($\text{g.m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$b \times 10^{10}$ ($\text{g.m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	$k_v \times 10^{18}$ (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 λ (μm)	
				à 1 atm	à 0,1 mm Hg
Hélium	He	4,00	1,96	0,194	1 470
Azote	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 .

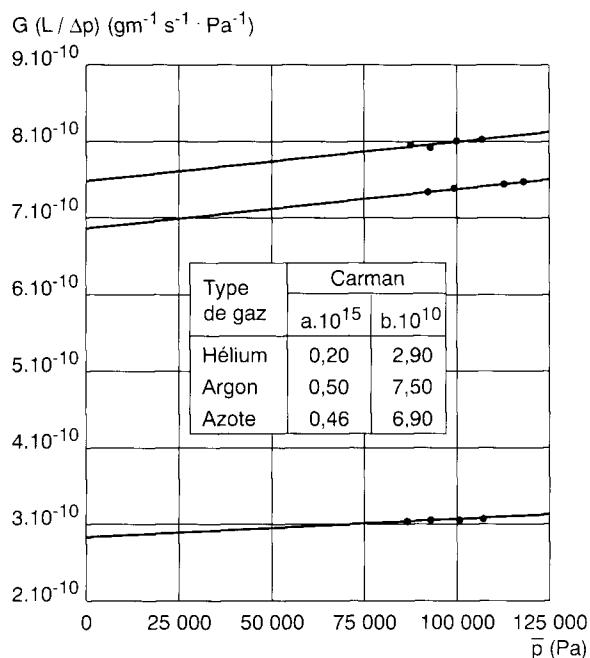


Fig. 5 - Détermination des constantes a et b de Carman pour différents gaz, mesurées sur une même éprouvette de BHP.

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 120 \times), 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 $a\mu$, μ 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 $7 \cdot 10^{-10}$ 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 Δp^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 (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 ($g \cdot mole^{-1}$)
$(p) = p_m$	pression moyenne d'écoulement (p) = $(p_1 + p_2)/2$ (Pa)
p_1	pression d'entrée (Pa)
p_2	pression à la sortie (Pa)
Δp	gradient de pression $\Delta p = p_1 - p_2$ (Pa)
Δp^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 ($8,31434 \text{ N m mole}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
R	constante pour un gaz particulier

Liste des principaux symboles utilisés (suite)

S	surface de l'éprouvette (m^2)
T	température ($^{\circ}C$)
T_o	température de l'essai ($^{\circ}C$)
v	vitesse moléculaire moyenne

Lettres grecques

μ	viscosité absolue ou dynamique du fluide ($N \cdot s \cdot m^{-2}$)
λ	libre parcours moyen des molécules gazeuses (μm)
α	poids volumique du fluide (N/m^3) : $\alpha = \rho g$
α_g	surface spécifique de la particule (mm^{-1})
ρ	masse volumique spécifique du fluide (kg/m^3)

RÉFÉRENCES BILIOGRAPHIQUES

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

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.-CI. 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.