

Perméabilité du béton de peau

Le choix du granulats peut-il s'avérer un élément plus déterminant que le rapport E/C ?

RÉSUMÉ

Lors de travaux de recherche effectués conjointement dans les laboratoires de l'Institut national des sciences appliquées (INSA) de Toulouse (France) et de l'université de Sherbrooke (Canada), on a constaté que la perméabilité au gaz des bétons confectionnés à Toulouse était moins élevée. Une étude sur mortier a été élaborée pour évaluer l'importance de la nature minéralogique du granulats. La perméabilité des mortiers avec granulats de marbre s'est avérée toujours plus basse que celle des mortiers avec granulats de granite. De par son interaction avec la pâte de ciment hydraté, la nature minéralogique du granulats gouverne, et ce de façon plus déterminante que le rapport E/C, le niveau de perméabilité à l'air du mortier en voie de dessiccation. Les résultats montrent également que la perméabilité aux gaz est fonction de l'interaction pâte/grulats des plus petites particules. La substitution partielle de la fraction fine d'un granulats à béton par un granulats de marbre de dimension équivalente mérite d'être prise en considération en vue d'optimiser la perméabilité aux gaz du béton et d'accroître ainsi la durabilité du béton de peau.

MOTS CLÉS : 32 - Béton hydraulique - Perméabilité - Mortier - Pâte de ciment - Granulats - Rapport eau/ciment - Gaz - Micro-fissuration - Durabilité - Marbre - Béton de peau.

Daniel PERRATON

Professeur
Département de Génie de la construction
École de technologie supérieure
Université du Québec – Montréal (Québec), Canada

Pierre-Claude AÏTCIN

Professeur
Département de Génie civil
Université de Sherbrooke – Sherbrooke (Québec), Canada

Introduction

Lors de travaux de recherche effectués conjointement dans les laboratoires de l'Institut national des sciences appliquées (INSA) de Toulouse et de l'université de Sherbrooke, on a constaté que la perméabilité aux gaz des bétons confectionnés dans chacun des laboratoires était nettement différente (fig. 1).

Ces résultats semblent indiquer que la modification du paramètre de composition E/C, reconnue comme étant le moyen par excellence de maîtriser les performances d'un béton, n'est pas dans le cas présent la cause des plus grandes variations de perméabilité. C'est ce qui est illustré par la figure 2 (déduite de la fig. 1). Celle-ci montre en effet que :

- un béton confectionné à $E/C = 0,7$ peut être deux à trois fois plus imperméable qu'un autre béton de $E/C = 0,3$;
- le prétraitement d'un béton peut multiplier par 2 ou 3 sa perméabilité.

On comprend aisément que ces constatations, parfois paradoxales, nous aient amenés à lancer un programme de recherches sur mortiers pour éclaircir nos résultats.

Éléments distinctifs des bétons de Toulouse et de ceux de Sherbrooke. Du point de vue de leur composition, les bétons confectionnés à Toulouse se distinguaient à plusieurs niveaux de ceux confectionnés à Sherbrooke. Après avoir écarté les risques d'erreurs liés à l'appareillage utilisé dans chacun des deux laboratoires, un premier programme de recherche a été élaboré pour étudier l'influence de certains paramètres distinctifs : le volume de pâte (V_p), la granulométrie, le pourcentage de sable et le type de ciment. Les résultats de ces recherches ont été

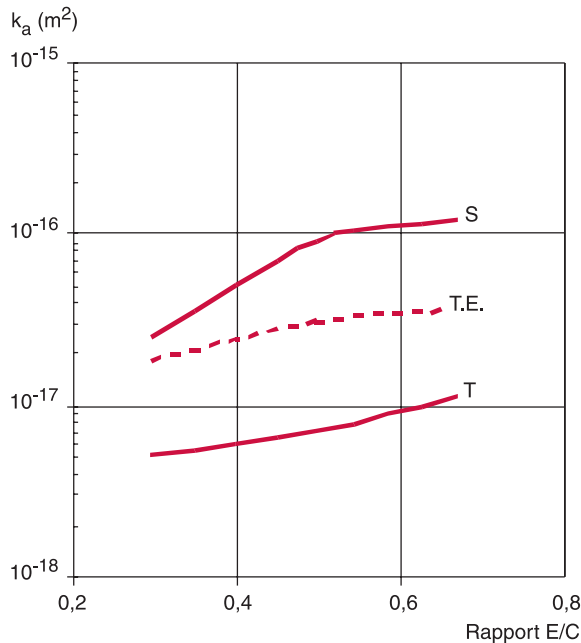


Fig. 1 - Variation de la perméabilité aux gaz des bétons. S : fabriqué à Sherbrooke, mûri 7 jours puis séché 28 jours à 22 °C et 50 % de HR. T : fabriqué à Toulouse, mêmes traitements. TE : fabriqué à Toulouse, 2 jours de séchage supplémentaires à 60 °C.

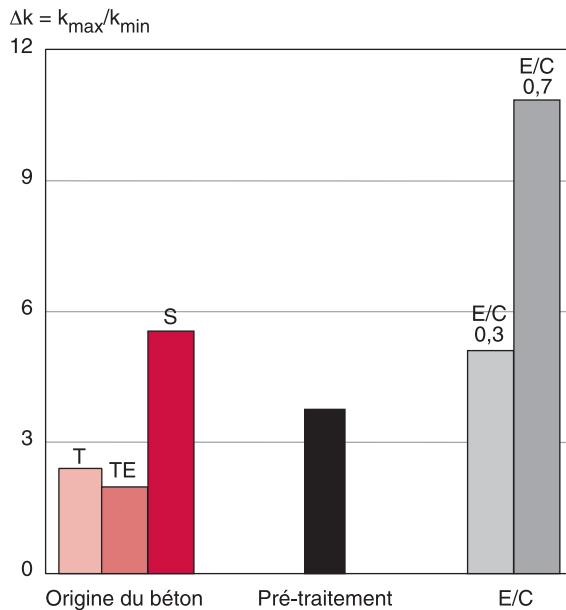


Fig. 2 - Influence de divers paramètres sur les variations de perméabilité aux gaz.

publiés dans le cadre du premier colloque canadien sur le ciment et le béton [1].

Bien que les résultats de ce programme de recherche aient permis de cibler certains effets qualifiés de « statistiquement significatifs » sur la perméabilité apparente du béton k_a , dans l'ensemble aucun des paramètres étudiés n'a permis de justifier les écarts de perméabilité présentés sur la figure 1. On a pu tirer cependant de ces expériences

que le volume de pâte n'a pas d'effet significatif sur la valeur de k_a , dans des proportions jugées réalistes [1, 2]. En effet, bien que le volume des pores capillaires augmente avec le volume de pâte, les résultats obtenus indiquent que la perméabilité à l'air diminue plutôt. Cette constatation est étroitement liée à la compatibilité de déformation entre les constituants du béton, qui gouverne le niveau de microfissuration de la matrice, particulièrement critique à l'interface pâte/granulat.

Un des éléments distinctifs importants entre les bétons confectionnés à Toulouse et ceux confectionnés à Sherbrooke, ignoré jusqu'alors, demeure la nature minéralogique des granulats : les bétons de Sherbrooke ont été confectionnés avec un sable granitique naturel ($E_0 = 49$ GPa) combiné à un gros granulat à base de calcaire dolomitique ($E_0 = 44$ GPa) alors que les bétons de Toulouse ont été confectionnés avec des granulats de marbre ($E_0 = 76$ GPa).

Facteurs étudiés

Un nouveau programme de recherche a donc été élaboré pour étudier l'importance de l'interface pâte/granulat sur la perméabilité aux gaz du béton. Trois facteurs ont été retenus pour cette étude :

- les écarts de rigidité, entre la pâte et le granulat,
- l'interaction physico-chimique entre la pâte et le granulat,
- l'influence de la surface spécifique du granulat et de son état de saturation au gâchage sur l'interface pâte/granulat. En effet, l'état de saturation des granulats au gâchage peut avoir un effet significatif sur les propriétés à l'interface pâte/granulat. Certains mélanges ont donc été confectionnés à partir de granulats humides (teneur en eau comprise entre 3 et 5 %).

Description du perméamètre

Le perméamètre utilisé dans le cadre de cette recherche est un perméamètre à charge constante permettant la mesure de la perméabilité suivant un écoulement de percolation à régime permanent. Les éprouvettes soumises à l'essai sont de forme cylindrique.

On force l'écoulement entre les extrémités planes de l'éprouvette, en s'assurant d'une étanchéité adéquate le long de la paroi latérale du cylindre. Cette étanchéité est obtenue par l'entremise d'une

membrane flexible en latex, confinée le long de la paroi de l'éprouvette par une pression d'air.

La cellule de perméabilité utilisée pour les mesures de la perméabilité à l'air des mortiers a été développée dans les laboratoires de l'université de Sherbrooke. Elle est constituée d'un cylindre creux en acier servant de support à la membrane en latex, et est munie d'une tête supérieure (l'entrée), reliée à un débitmètre et à un manomètre, et d'une tête inférieure (la sortie) raccordée à une pompe à vide et à un manomètre. L'éprouvette est placée dans la cellule et la pression moyenne d'écoulement est ajustée en contrôlant indépendamment les pressions à la sortie et à l'entrée de la cellule. La cellule est présentée en détail dans la référence [3].

En cours d'essai, le débit gazeux traversant l'éprouvette est mesuré à l'entrée, tout en maintenant constantes les pressions à l'entrée et à la sortie de la cellule du perméamètre. Le calcul du coefficient de perméabilité résulte alors directement de la loi de Darcy, transposée pour le cas des fluides compressibles [4]. La figure 3 schématise le principe de fonctionnement de l'appareil.

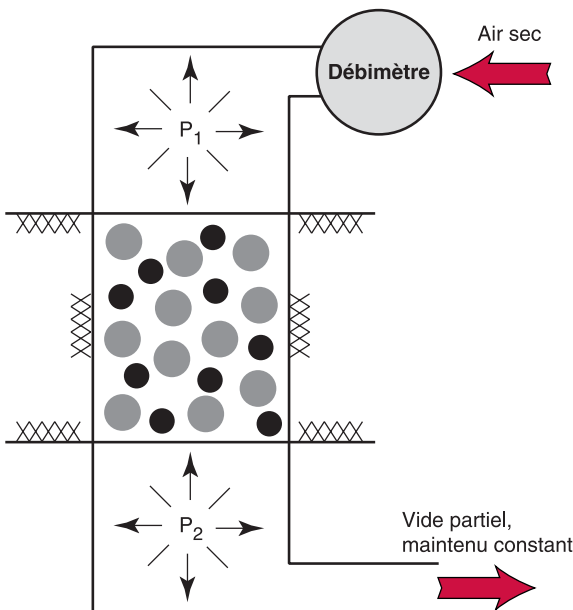


Fig. 3 - Schéma du principe de fonctionnement du perméamètre.

Matériaux et composition des mortiers. Conditionnement des éprouvettes et séquence d'essais

Le projet de recherche a été mené sur des mortiers constitués de granulats de taille uniforme et, pour certains, de mélanges binaires. Dans le cadre de cette étude, le rapport E/C est faible (0,28),

comparable à celui des bétons à haute performance, et le volume de pâte, V_p , fixé constant à 40 % (pourcentage volumique) pour tous les mortiers.

Matériaux et composition des mortiers

Deux types de granulats, commercialement utilisés au Québec, ont été choisis :

- un gravier granitique naturel (noté G),
- un marbre concassé (noté M).

Le jeu du retrait de dessiccation de la pâte au contact du granulat de marbre, moins déformable, devrait, *a priori*, induire des contraintes de traction plus importantes dans la pâte de ciment hydraté que pour le granulat de granite.

Par tamisage mécanique, des groupes de particules de taille relativement uniforme ont été constitués. L'identification de ces groupes est présentée dans le tableau I. Dans le cas des mélanges binaires, les proportions ont été établies à partir de la règle de Fuller-Thompson, pour la combinaison des groupes #7 et #2 (combiné 7-2). Pour le combiné 7-4, on a conservé *les mêmes proportions*, soit un mélange massique de 1 pour 1.

TABLEAU I
Identification de groupes de particules
de taille uniforme utilisés pour la confection des mortiers

Groupe #	d_{max} (mm)	d_{min} (mm)	Taille moyenne des particules $d_m = \sqrt{d_{max} \cdot d_{min}}$ (mm)
2	2,5	1,25	1,77
4	5	2,5	3,54
7	10	5	7,07

Le coefficient d'absorption d'eau et la masse volumique de ces granulats ainsi que les propriétés mécaniques des roches-mères sont données dans le tableau II.

Les granulats utilisés pour le gâchage des mortiers ont été séchés dans les conditions du laboratoire plutôt qu'à l'étuve. Dans ces conditions, lors du malaxage, une partie de l'eau de gâchage est absorbée par le granulat. Par conséquent, la quantité d'eau équivalente à celle absorbée par le granulat a été ajoutée à l'eau de gâchage, de manière à conserver constant le rapport E/C. De même, lors du gâchage des mortiers à partir de granulats humides (teneur en eau comprise entre 3 et 5 %) le volume d'eau de gâchage a été corrigé de manière à tenir compte de la quantité d'eau réelle contenue dans le granulat, évaluée au moment du gâchage,

de manière à maintenir la qualité et le volume de pâte constant dans ces mortiers.

La fraction fine d'un granulat favorise la présence d'air piégé dans un béton. Dans les mortiers, on peut mesurer couramment des teneurs en air piégé de l'ordre de 6 à 10 %. Lors des premières gâchées, des teneurs en air croissantes ont été mesurées à mesure que la taille des particules du mortier diminuait : 0,3 % pour le groupe #7 (d_m : 7,07 mm) et 6,8 % pour le groupe #2 (d_m : 1,77 mm). Ces écarts peuvent rendre difficilement exploitables les résultats de perméabilité puisque, d'une part, la présence d'air change la mobilité du gaz au sein du matériau et, d'autre part, elle diminue la masse granulaire dans le mortier, changeant ainsi le volume de pâte. Il a donc été convenu d'utiliser pour *tous les mortiers* un agent désaérateur, du tributyle phosphate, pour contrôler leur teneur en air.

La composition des mortiers confectionnés dans le cadre de cette étude est présentée dans le

tableau III. Les différentes compositions montrent clairement que le volume de pâte est le même pour l'ensemble des mortiers. À cette fin, un superplastifiant a été incorporé dans tous les mortiers à des dosages divers.

Finalement, il est bon de souligner que la même procédure de malaxage a été conservée de façon minutieuse pour la confection de tous les mortiers. Immédiatement après le malaxage, le mortier a été disposé dans un moule (100 × 100 × 400 mm) à raison de quatre à cinq couches, vibrées de 90 à 120 secondes chacune ; le nombre de couches et le temps de vibration ont été fixés de façon à minimiser la présence d'air piégé dans le mortier, sans causer de ségrégation.

Conditionnement des éprouvettes et séquence d'essai élaborée pour évaluer la perméabilité à l'air des mortiers

Tous les mortiers ont été mûris dans un bac rempli d'eau saturée en chaux pendant 28 jours. Après

TABLEAU II
Caractéristiques des particules utilisées comme granulat dans la confection des mortiers et propriétés mécaniques des roches-mères

	Masse volumique (kg/m ³)	Absorption (%)	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité E ₀ (GPa)	Coefficient de Poisson ν_0
Marbre (M)	2 760	0,5	110	8	85	---
Granite* (G)	2 690	1,2	138	11	49	0,10

* Valeurs tirées de la référence [5].

TABLEAU III
Composition des mortiers

Identification		G2	G4	G7	G7-2	G7-4	G2-H	G7-H	M2	M4	M7	M7-4	M7-H
Saturation des granulats au gâchage		Sec					Humide		Sec				Humide
kg/m ³	Eau*	185	185	190	185	190	185	190	185	190	190	190	185
	Ciment	665	670	680	675	675	660	675	655	670	675	675	665
	Granulat	1 610	1 620	1 630	1 620	1 625	1 590	1 620	1 620	1 655	1 660	1 665	1 645
Taille des particules d_m : (mm)		1,77	3,54	7,07	4,42 50-50	5,30 50-50	1,77	7,07	1,77	3,54	7,07	5,30 50-50	7,07
Nature minéralogique		GRANITE						MARBRE					
% masse	Superplastifiant (fraction solide)	1,07**	0,86	0,48	0,86	0,64	1,26	0,73	1,14	1,10	0,55	0,93	0,95
	Tributyle phosphate	0,16 %***						0,16 %***					
ρ béton frais (kg/m ³)		2 465	2 480	2 505	2 485	2 495	2 445	2 490	2 465	2 525	2 530	2 535	2 505

* Incluant l'eau du superplastifiant.
** Superplastifiant : poly-naphtalène sulfonate (PNS). Le dosage est exprimé en pourcentage d'extrait sec par rapport à la masse de ciment.
*** Pourcentage de la masse d'eau de gâchage

7 jours de cure, les éprouvettes ($\phi = 38 \text{ mm}$; $L = 50 \text{ mm}$) ont été surfacées pour réaliser les essais de perméabilité. Toutes les éprouvettes sont représentatives de la masse du mortier, car elles ont été taillées suffisamment loin des parois.

De façon à évaluer l'influence du degré de dessiccation, la perméabilité apparente des mortiers a été mesurée à plusieurs reprises, selon une séquence de dessiccation progressive, de plus en plus sévère. L'organigramme de la figure 4 illustre la séquence de dessiccation à laquelle les éprouvettes ont été soumises et les périodes ciblées pour mesurer l'évolution de leur perméabilité apparente.

La perméabilité apparente, évaluée sous un écoulement à régime permanent d'air sec, a été mesurée à une pression moyenne de 80 kPa sous l'effet d'un gradient de pression de 40 kPa.

Résultats des mesures de perméabilité apparente des mortiers

Avant de présenter les résultats des mesures de perméabilité à l'air, il convient de définir certains paramètres importants utilisés en référence pour la présentation et l'interprétation des résultats.

Degré de saturation D_s

La présence d'eau dans certains pores modifie substantiellement le réseau d'écoulement de l'air. Lors de l'analyse, on peut tenir compte de l'état de saturation de l'éprouvette au moment de l'essai en définissant son degré de saturation. En fait, on ne peut envisager de mettre en relation des résultats

de perméabilité aux gaz obtenus sur diverses éprouvettes, même ayant la même porosité totale, que dans la mesure où les degrés de saturation lors de l'essai sont comparables. Le degré de saturation D_s correspond à la fraction d'eau encore confinée dans les pores du matériau lors de l'essai, exprimée par rapport à son pouvoir de rétention d'eau. Donc :

$$D_s(\%) = \left[\frac{M_{SSS} - M_{\text{essai}}}{M_{SSS} - M_{\text{sèche}}} \right] \times 100 \%$$

où

- D_s : degré de saturation (%),
- M_{SSS} : masse de l'éprouvette saturée superficiellement sèche (g),
- M_{essai} : masse de l'éprouvette au moment de la mesure de k_a (g),
- $M_{\text{sèche}}$: masse sèche de l'éprouvette (g).

Porosité volumique

Le degré de saturation de l'éprouvette est calculé par référence au pouvoir de rétention d'eau de l'échantillon, lequel correspond au volume poreux total de l'éprouvette. Le volume poreux total de l'éprouvette est établi en déterminant la différence entre la masse de l'éprouvette saturée superficiellement sèche (M_{SSS}) et sa masse sèche ($M_{\text{sèche}}$). À partir du volume de l'éprouvette, on peut alors calculer sa porosité volumique représentant le rapport de son volume poreux à son volume total. Sur une base expérimentale, soit par la pesée hydrostatique d'une éprouvette saturée, on détermine alors le volume total de l'éprouvette (fraction poreuse et fraction solide) et on calcule

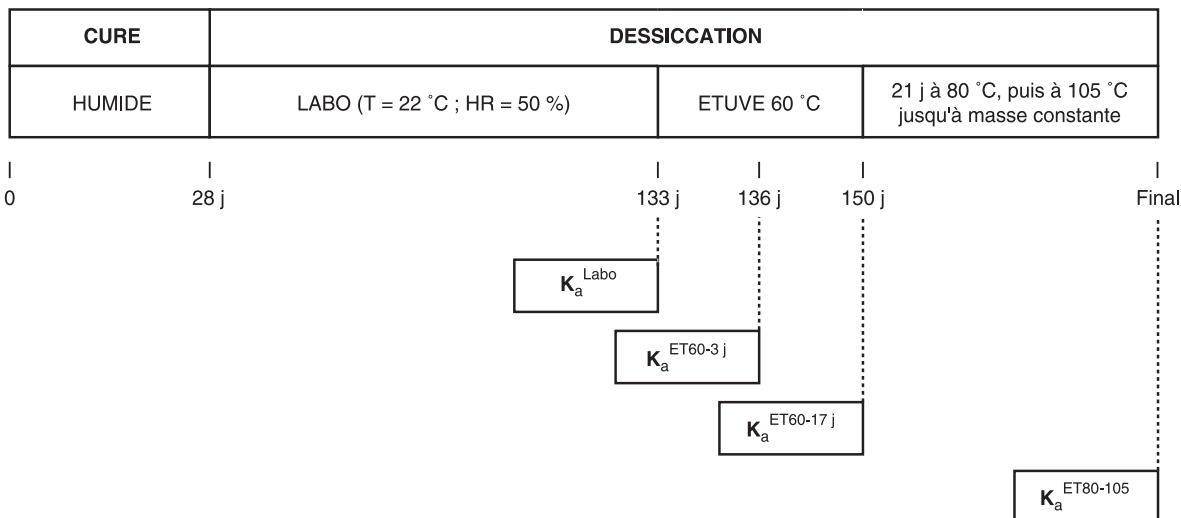


Fig. 4 - Séquence de dessiccation des éprouvettes.

ainsi sa porosité volumique, $\varepsilon_{\text{expé}}$, à partir de la relation suivante :

$$\varepsilon_{\text{expé}}(\%) = \left[\frac{M_{\text{SSS}} - M_{\text{sèche}}}{M_{\text{SSS}} - M_{\text{eau}}} \right] \times 100 \%$$

où

- $\varepsilon_{\text{expé}}$: porosité volumique établie expérimentalement par pesée hydrostatique, excluant le volume d'air piégé et/ou entraîné,
- M_{eau} : masse de l'éprouvette saturée superficiellement sèche, pesée dans l'eau (g).

En définitive, pour déterminer la porosité totale d'une éprouvette et, par conséquent, son degré de saturation lors de l'essai, il faut connaître la masse de l'éprouvette à l'état sec. Sur la base d'un degré d'hydratation du ciment fixé, *a priori*, à 60 %, on estime que les pertes d'eau totales des éprouvettes de mortiers avec granulats de marbre et de granite confectionnés dans le cadre de ce programme de recherche devraient être respectivement de l'ordre de 7,1 g et 7,7 g. Attendu que le degré d'hydratation peut être plus faible que 60 %, ce qui impliquerait que la quantité d'eau évaporable serait plus grande, il a été admis, malgré tout, que la masse d'eau totale évaporée après le dernier cycle de

séchage (ÉT80-105) correspondait à une dessiccation totale de l'éprouvette ($D_s = 0 \%$).

Perméabilité apparente

À l'exception des essais effectués après trois jours de dessiccation à 60 °C, la perméabilité apparente des mortiers a été mesurée sur un groupe de trois éprouvettes de manière à obtenir une moyenne représentative [4]. Dans le cas des essais effectués après trois jours de dessiccation à 60 °C, les résultats sont présentés uniquement pour montrer l'évolution de la perméabilité en cours de dessiccation.

Les valeurs moyennes de la perméabilité apparente, k_a , obtenues pour les mortiers confectionnés avec des granulats de granite et de marbre, sont présentées dans les tableaux IV et V ainsi que les valeurs du degré de saturation des éprouvettes à l'essai (D_s).

Dans un premier temps, il est intéressant de noter que les résultats présentés dans les tableaux IV et V indiquent que la perte de masse mesurée après étuvage à 105 °C est du même ordre de grandeur que celle estimée par calcul pour un degré d'hydratation du ciment de 60 %.

Les mortiers contenant des granulats de granite présentent globalement une porosité volumique,

TABLEAU IV
Résultats des essais de perméabilité effectués sur mortiers confectionnés avec des granulats granitiques ($\phi = 38 \text{ mm}$; $L = 50 \text{ mm}$; cure 28 jours)

Séquence de dessiccation												
		LABO		ÉTUVE								
		105 j		60 °C : + 3 j		60 °C : + 14 j		80 °C : + 21 j 105 °C : masse constante				
	Série	d_m (mm)	$k_a^{\text{Labo}} \times 10^{18}$ (m ²)	D_s (%)	$k_a^{\text{ET60-3j}} \times 10^{18}$ (m ²)	D_s (%)	$k_a^{\text{ET60-14j}} \times 10^{18}$ (m ²)	D_s (%)	$k_a^{\text{ET80-105}} \times 10^{18}$ (m ²)	D_s (%)	Perte de masse (g)	Abs** { $\varepsilon_{\text{expé}}$ } (%)
Sec	G2	1,77	25	56	65*	34	130	16	460	0	7,52	5,6 {13,8}
	G4	3,54	75	55	140*	32	295	17	1 250	0	7,37	5,4 {13,5}
	G7	7,07	105	57	140*	33	505	17	2 350	0	7,57	5,6 {13,5}
	G7-4	5,30	110	56	160*	35	430	16	1 700	0	7,32	5,4 {13,3}
	G7-2	4,42	60	57	100	33	250	14	890	0	7,36	5,5 {13,6}
Humide	G2-H	1,77	40	55					655	0	7,28	5,5 {13,4}
	G7-H	7,07	140	55			670 ¹	16	3 450	0	7,70	5,7 {14,1}

* Mesuré sur une seule éprouvette.
 ** Abs (%) = $\frac{M_{\text{SSS}} - M_{\text{sèche}}}{M_{\text{sèche}}} \times 100$

TABEAU V
Résultats des essais de perméabilité effectués sur mortiers confectionnés
avec des granulats de marbre ($\phi = 38 \text{ mm}$; $L = 50 \text{ mm}$; cure 28 jours)

		Séquence de dessiccation										
		LABO		ÉTUVE								
		105 j	60 °C : + 3 j		60 °C : + 14 j		80 °C : + 21 j 105 °C : masse constante					
	Série	d_m (mm)	$k_a^{\text{Labo}} \times 10^{18}$ (m ²)	D_s (%)	$k_a^{\text{ET60-3j}} \times 10^{18}$ (m ²)	D_s (%)	$k_a^{\text{ET60-14j}} \times 10^{18}$ (m ²)	D_s (%)	$k_a^{\text{ET80-105}} \times 10^{18}$ (m ²)	D_s (%)	Perte de masse (g)	Abs** { $\epsilon_{\text{expé}}$ } (%)
Sec	M2	1,77	< 4	53	20	31	40	14	120	0	6,86	5,1 {12,6}
	M4	3,54	30	56	50*	33	125	14	520	0	7,44	5,4 {13,7}
	M7	7,07	110	58	160*	31	485	15	2 250	0	6,86	4,9 {12,5}
	M7-4	5,30	45	57	75*	33	170	15	685	0	6,74	4,8 {12,2}
	M7-2	4,42										
Humide	M2-H	1,77										
	M7-H	7,07	110	53			420	12	1 600	0	7,47	5,5 {13,7}

* Mesure sur une seule éprouvette.
** Abs (%) = $\frac{M_{\text{SSS}} - M_{\text{seche}}}{M_{\text{seche}}} \times 100$

$\epsilon_{\text{expé}}$ légèrement supérieure à celle des mortiers contenant des granulats de marbre : 13,7 % comparativement à 12,9 % (tableaux IV et V) : mais il n'est pas établi que cette différence soit significative. Les mortiers ont atteint le même degré de saturation.

Bien que la perméabilité d'un granulat ne soit pas négligeable, elle n'a que très peu d'importance dans le contexte de ces travaux : la matrice est microfissurée par suite de la dessiccation de l'éprouvette ; la percolation de l'air à travers le mortier est donc largement gouvernée par la formation de réseaux de microfissures dont l'importance rend, à toutes fins pratiques, négligeable l'importance de la perméabilité de la masse granulaire.

Les résultats des tableaux IV et V sont également représentés sur les figures 5 et 6. La figure 5 met clairement en évidence que :

- la perméabilité des mortiers confectionnés avec des granulats de granite est toujours supérieure à celle des mortiers confectionnés avec des granulats de marbre ;
- les mortiers confectionnés avec des particules fines sont nettement plus imperméables (courbe M2/G2 de la figure 5).

La figure 6 illustre de façon plus schématique la variation de la perméabilité apparente associée

aux caractéristiques physiques de chacun des mortiers. **Indépendamment du type de granulat, la perméabilité du mortier décroît avec la taille de l'inclusion granulaire.**

Dans cette étude, le fait d'étudier la perméabilité aux gaz sur des mortiers constitués de particules de taille uniforme a pour effet de favoriser la propagation des microfissures dans la pâte de ciment

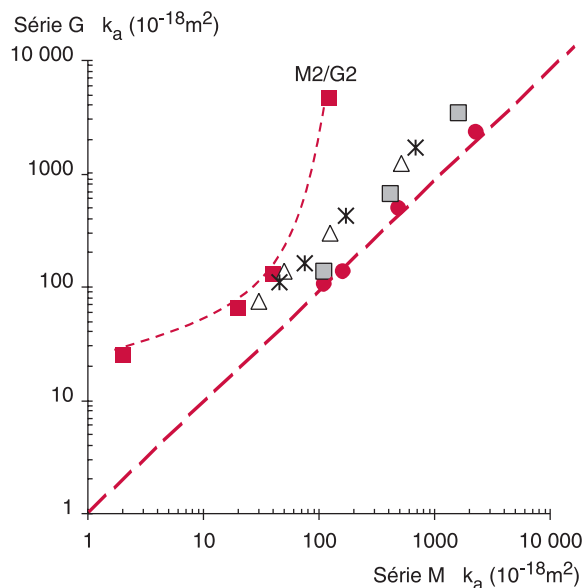
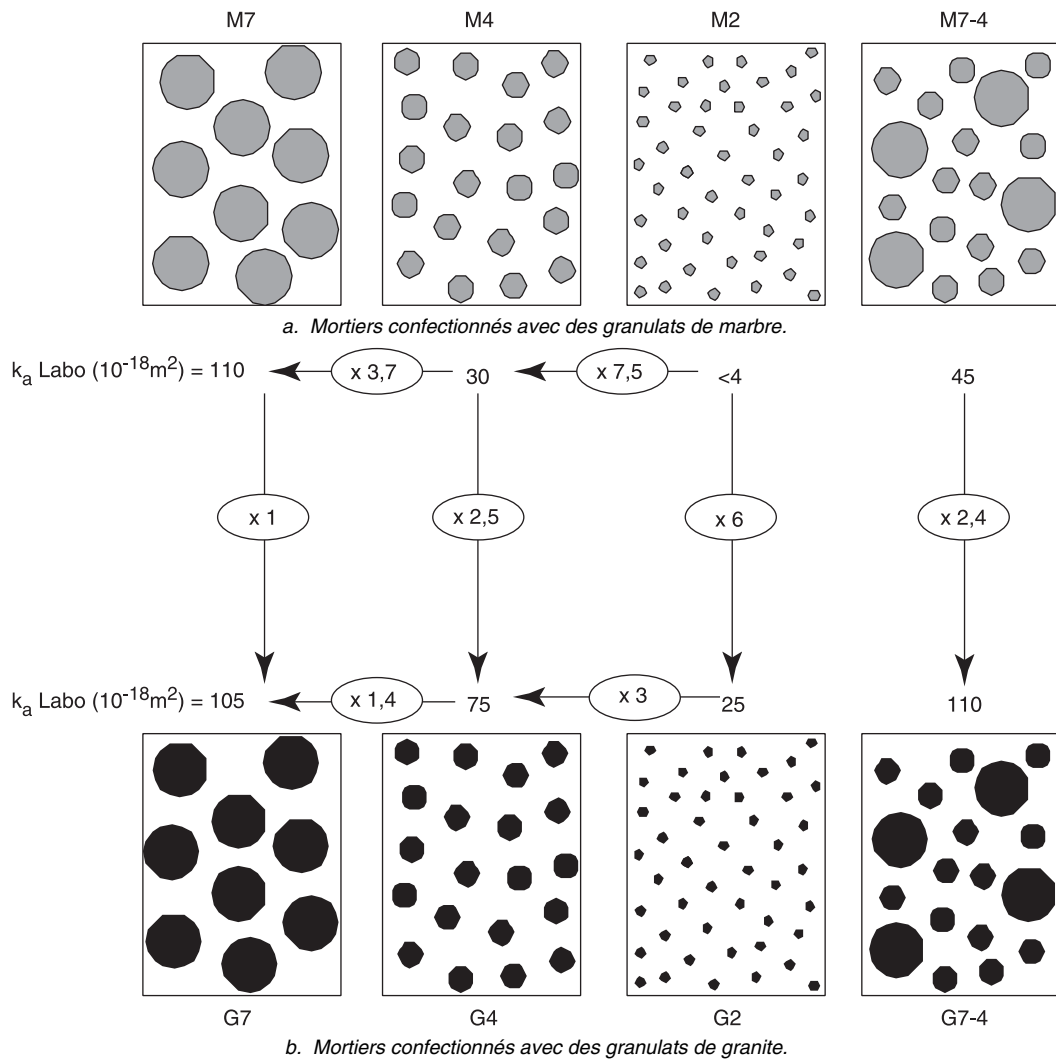


Fig. 5 - Comparaison des perméabilités apparentes des mortiers de marbre (M) et de granite (G).

Fig. 6 - Représentation schématique des caractéristiques physiques, spécifiques à chacun des mortiers, jumelée aux valeurs de la perméabilité apparente.



hydraté ; la présence de particules fines, dans un sable, peut freiner la propagation des microfissures lorsque ces particules présentent une bonne adhérence avec la pâte de ciment hydraté. Dans le cas des mortiers étudiés, la diminution de la taille des particules permet donc, entre autres, de fractionner le réseau de microfissures induit par suite du séchage de l'éprouvette (fig. 6) et de modifier le réseau d'écoulement au sein de la matrice.

La figure 6 montre également que la perméabilité apparente est pratiquement la même pour les mortiers avec granules de marbre et de granite dans le cas des mortiers fabriqués avec les particules de taille relativement grossière ($d_m = 7,07$ mm). C'est dire que, dans ce cas particulier, la microfissuration de la pâte de ciment hydraté est indépendante de la nature minéralogique du granulat, voire de ses propriétés mécaniques.

Analyse et interprétation des résultats

Les résultats présentés dans les tableaux IV et V et sur la figure 5 montrent que les mortiers avec granules de marbre sont toujours plus imperméables, pour une même dimension de particules, que les mortiers avec granules de granite. De surcroît, le mortier avec granules de marbre constitué des particules les plus petites ($d_m = 1,77$ mm) présente le même niveau de perméabilité que les bétons de Toulouse [6], eux aussi élaborés avec des granules de marbre. En outre, le comportement de ce mortier (mortier M2) est semblable à celui des bétons de Toulouse lorsque l'on mesure la perméabilité à l'air après un séchage à l'étuve ($60^\circ C$ pendant 3 jours). **La nature minéralogique du granulat joue donc un rôle déterminant quant à la perméabilité aux gaz d'un mortier.**

Interface pâte/granulat

C'est particulièrement à l'interface pâte/granulat que réside, à notre avis, l'explication la plus plausible quant au niveau de la perméabilité à l'air des mortiers confectionnés à partir de granulats de marbre.

L'interface pâte/granulat joue un rôle de premier plan dans le comportement mécanique du béton [7-9] ; on associe même le comportement inélastique du béton à la présence, avant chargement, de défauts localisés à l'interface pâte/granulat [8, 10], attribuables à l'incompatibilité de déformation entre la pâte et le granulat sous l'effet des retraits et/ou des phénomènes thermiques.

La description du mécanisme de formation de l'interface pâte/granulat est fort complexe, puisqu'elle dépend de nombreux paramètres. Il est certain qu'il existe une zone, à proximité d'un granulat, distincte de ce qu'il est convenu d'appeler le « cœur de la pâte » : c'est la zone de transition ou auréole de transition. Elle se distingue au niveau de sa microstructure par sa porosité et sa minéralogie.

L'épaisseur de la zone de transition dépend notamment du type de ciment, du degré d'hydratation, du rapport E/C et, plus particulièrement dans le cas qui nous concerne, de la nature même du granulat. En outre, il semble que son épaisseur soit nettement plus faible à proximité d'un granulat de calcite que d'un granulat de quartz. Plusieurs chercheurs rapportent que, dans bien des cas, la fracture d'une éprouvette mixte composée d'une pâte de ciment jumelée à une particule de calcite se produit soit dans la pâte, assez loin de l'interface, soit, le plus souvent, dans le granulat [10, 11]. C'est donc dire que l'adhérence de la pâte au contact d'un granulat de marbre peut être excellente.

À la lumière de nos résultats et de la littérature [10-13], une meilleure cohésion de nature chimique entre la pâte et le granulat de marbre minimise le degré de décollement à l'interface pâte/granulat et réduit ainsi de façon appréciable la présence de défauts qui modifient substantiellement la perméabilité à l'air du mortier.

État de saturation des granulats au gâchage

L'utilisation de particules humides au gâchage a pour effet de plus ou moins modifier l'interface pâte/granulat, tant au niveau de sa porosité que de sa minéralogie. À l'interface des particules humides, on retrouve une teneur en eau légèrement plus élevée alors que, avec des particules sèches, une partie de l'eau au voisinage du granulat est absor-

bée par succion, forçant ainsi un rapprochement des grains de ciment, ce qui limite la mobilité des ions vers l'interface.

Les valeurs de la perméabilité apparente présentées dans les tableaux IV et V sont très révélatrices ; elles montrent un comportement différent en raison de la nature minéralogique de la particule lorsque, au moment du gâchage, celle-ci est humide. En effet, pour les mortiers confectionnés avec des particules humides, la valeur de k_a augmente dans le cas du granite, alors qu'elle diminue pour des particules de marbre. Ces résultats confirment l'importance de l'activité chimique et physico-chimique qui prévaut entre la pâte de ciment hydraté et les particules de marbre.

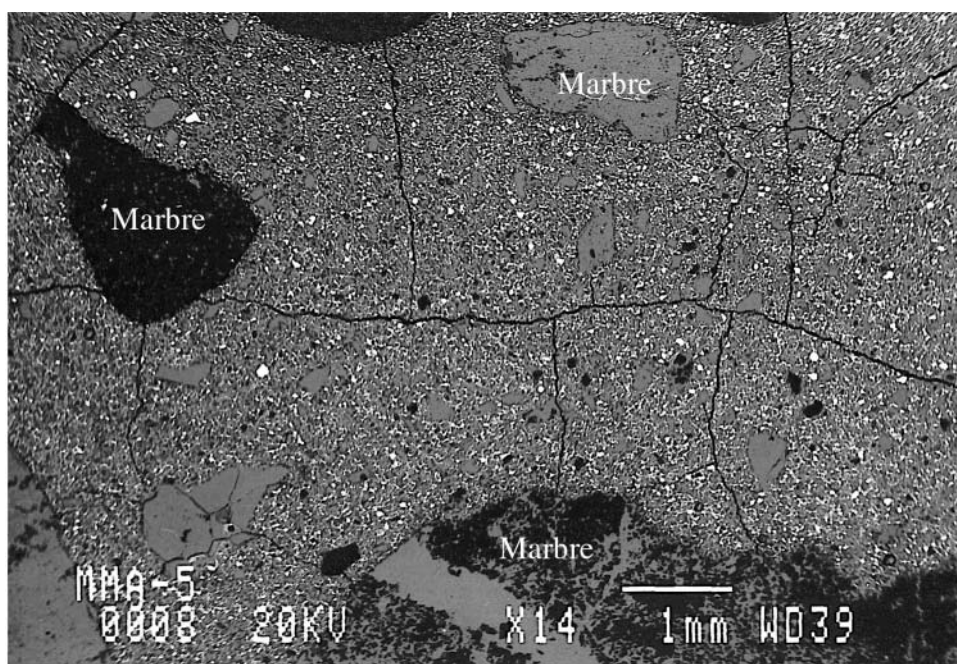
Fissuration des mortiers confectionnés avec des granulats de marbre et de granite

Des observations au microscope électronique à balayage (MEB) de surfaces polies de mortiers ont été conduites en vue d'analyser l'état de fissuration. L'état de fissuration observé au MEB n'est pas en soi représentatif de celui qui prévaut au sein des éprouvettes lors des essais de perméabilité puisque le dégazage des éprouvettes aux fins d'analyse intensifie le retrait de la pâte de ciment hydraté et accentue ainsi sa fissuration. Ces observations donnent toutefois de précieux renseignements quant aux modes de fissuration et de décollement de la pâte de ciment hydraté dus au retrait de dessiccation et, spécifiquement, aux interfaces pâte/granulat.

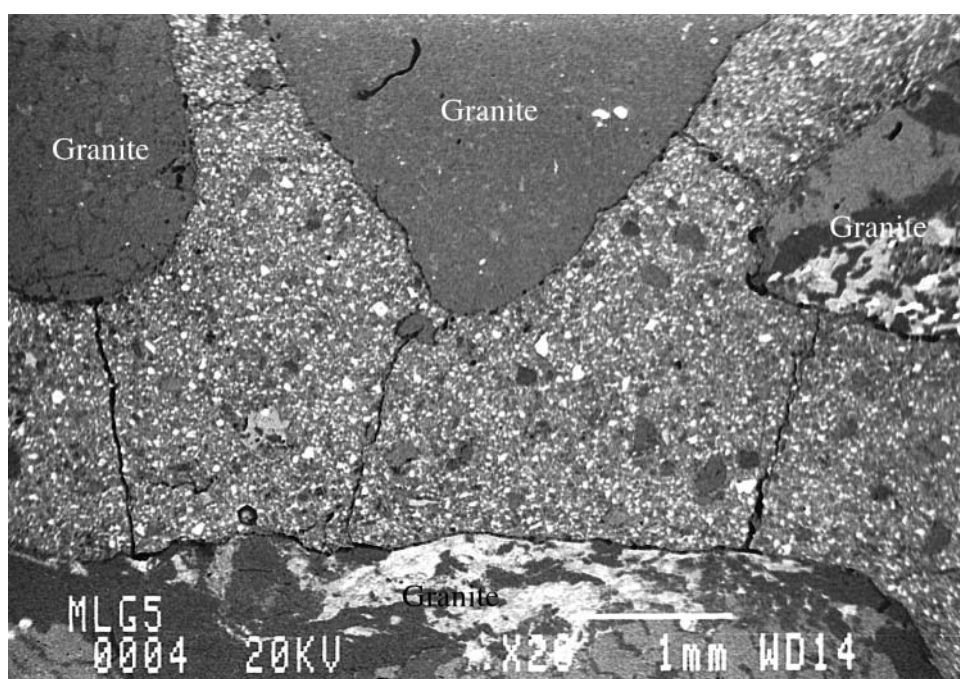
Dans l'ensemble, ces observations au MEB montrent clairement que la pâte de ciment hydraté est fissurée dans sa masse et ce, pour les deux types de granulat étudiés. La microstructure se présente également très distinctement aux interfaces pâte/granulat en regard au type de granulat et ce, indépendamment de la taille de la particule. **La microstructure des mortiers confectionnés à partir des deux types de granulats se différencie essentiellement au niveau du degré de décollement à l'interface pâte/granulat** : le degré de décollement à la zone d'interface des particules de granite est toujours plus marqué que celui qui prévaut dans le cas des particules de marbre.

Une vue d'ensemble de la microstructure des mortiers avec granulats de marbre et de granite (particules grossières : $d_m = 7,07$ mm) est présentée sur les figures 7a et 7b. Nous constatons que les fissures amorcées dans la masse de la pâte de ciment hydraté se prolongent d'un granulat à l'autre. Le profil général de la fissuration est relativement régulier : le réseau de fissures dans la pâte se pré-

Fig. 7 - Vue d'ensemble de la fissuration des mortiers observée au microscope électronique à balayage sur surfaces polies (particules : $d_m = 7,07$ mm).



a. Mortiers confectionnés avec des granulats de marbre.



b. Mortiers confectionnés avec des granulats de granite.

sente sous forme de mailles, dont la dimension maximale, observée pour les particules grossières, est de quelques millimètres (< 4 mm pour $d_m = 7,07$ mm) et lorsque la taille des particules est réduite, le maillage se raffine (mailles inférieures à 1 mm pour $d_m = 1,77$ mm).

Bien que, dans le cas des particules les plus grossières ($d_m = 7,07$ mm), les fissures aillent aussi

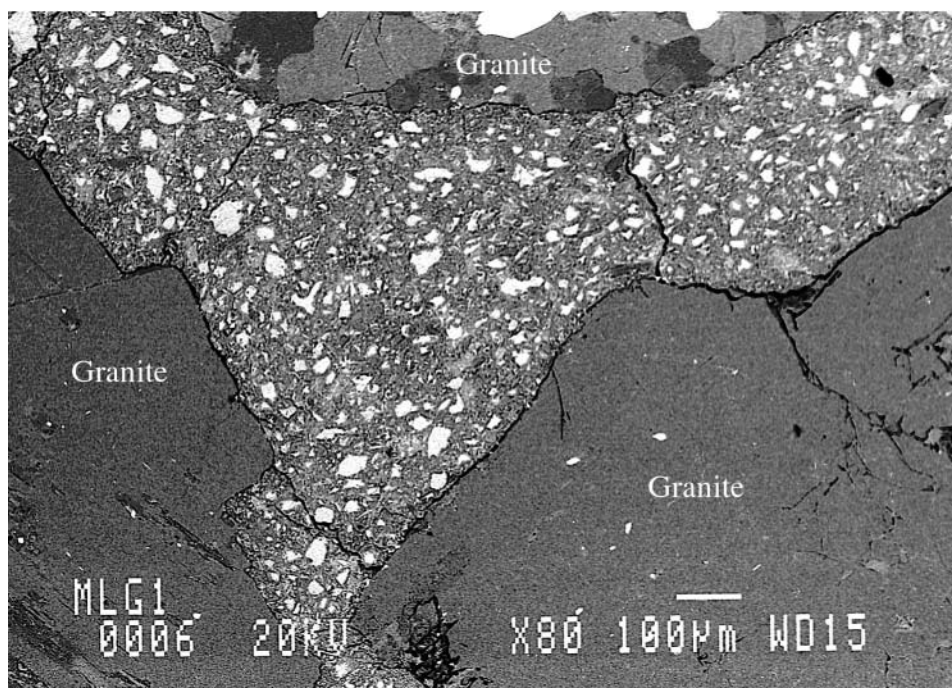
d'un granulat à l'autre, mais de façon plus indirecte, dans bien des cas, ces fissures en croisent d'autres sur leur trajectoire (cf. fig. 7a). Par conséquent, pour les mortiers contenant des particules grossières, le degré de fissuration dans le cœur de la pâte est tel que le phénomène de décollement à l'interface pâte/granulat est un élément bien secondaire. Pour ce groupe de particules, les

résultats des mesures de perméabilité le montrent bien : la perméabilité apparente est pratiquement la même, que les mortiers soient confectionnés avec des granulats de marbre ou de granite (cf. fig. 6).

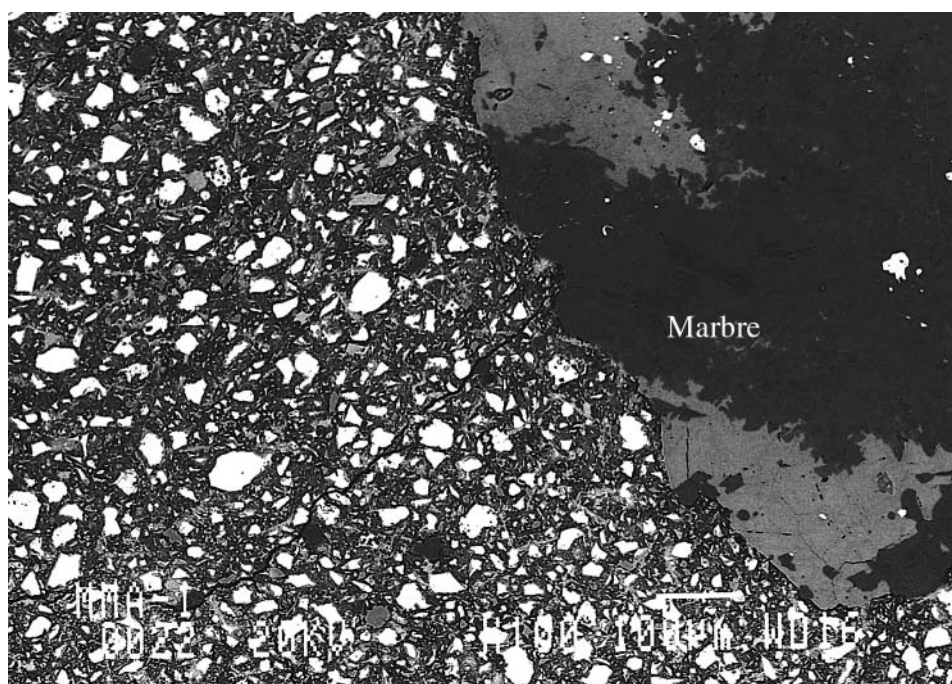
Dans le cas des mortiers confectionnés avec des particules plus petites ($d_m = 1,77 \text{ mm}$), le rôle de

la qualité de l'interface est mieux mis en valeur. Les figures 8a et 8b présentent la microstructure observée au MEB pour ces mortiers. Ces figures illustrent bien la distinction qui existe au niveau de l'interface entre les deux types de granulats. Pour les mortiers avec particules de marbre, la fissuration amorcée au sein de la pâte de ciment

Fig. 8 - Fissuration à l'interface pâte/granat des mortiers observée au microscope électronique à balayage sur surfaces polies (particules : $d_m = 1,77 \text{ mm}$).



a. Mortiers confectionnés avec des granulats de granite. Fissuration nette.



b. Mortiers confectionnés avec des granulats de marbre. Fissuration pratiquement inexistante.

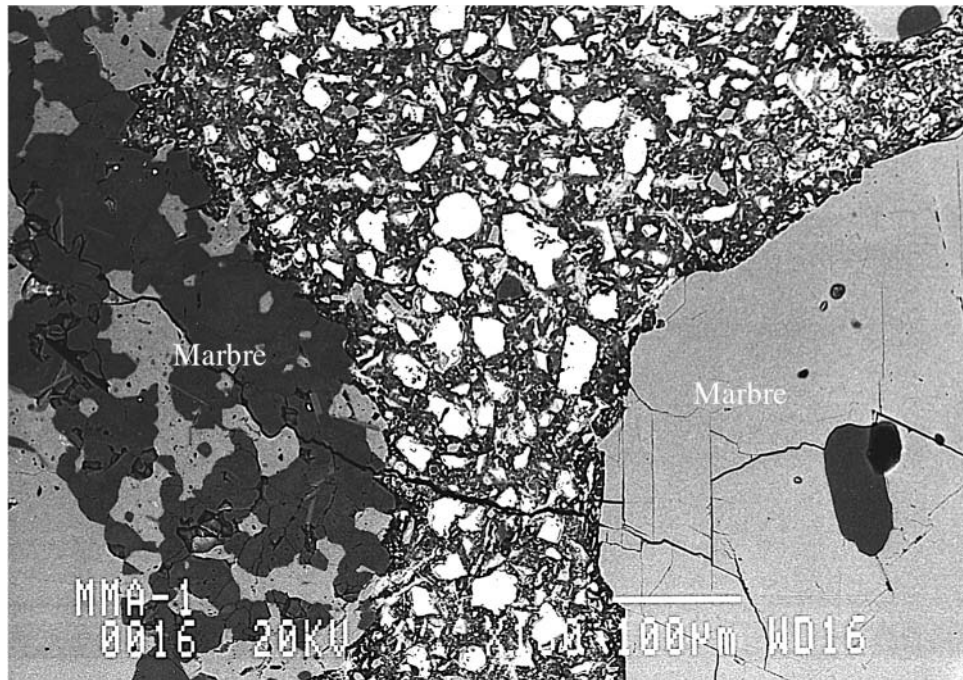


Fig. 9 - Prolongement de la fissuration de la pâte de ciment hydraté dans les granulats de marbre, sans fissuration apparente à l'interface pâte/granulat. Observation au microscope électronique à balayage sur surfaces polies (particules : $d_m = 1,77$ mm).

hydraté se prolonge, dans bien des cas, dans les plus petits granulats en général (fig. 9). Dans d'autres cas, la fissuration de la pâte de ciment hydraté est littéralement freinée à l'interface par la présence du granulat de marbre (cf. fig. 8b).

Conclusion

Le programme d'essais sur mortiers a permis de mettre en perspective une des principales causes à l'origine des différences de perméabilité à l'air observées entre les bétons de Toulouse et ceux de Sherbrooke : **c'est essentiellement la nature du granulat qui détermine le niveau de perméabilité à l'air du béton** ; la nature du granulat détermine le degré de défauts (microfissures) à l'interface pâte/granulat, principal responsable de la percolation d'un gaz à travers le béton ; la présence de ces défauts (microfissures) facilite le parcours de l'air à travers le réseau des pores capillaires les plus grossiers de la pâte de ciment hydraté. Évidemment, il est impératif de souligner le fait que le préconditionnement des éprouvettes joue également un rôle très important sur l'interaction entre le granulat et la pâte de ciment hydraté, laquelle peut notamment modifier la dynamique à l'origine des défauts à l'interface. Globalement, il est clair que la nature minéralogique du granulat, de par son interaction avec la pâte de ciment hydraté, va gouverner, **et ce de façon plus déter-**

minante que le rapport E/C, le niveau de perméabilité à l'air du béton.

À la lumière de l'ensemble des résultats obtenus sur mortiers, un point majeur mérite d'être souligné :

le granulat de marbre permet de minimiser la perméabilité à l'air d'un mortier (béton) et, plus particulièrement, les particules de petites dimensions jouent un rôle déterminant : pour les deux types de granulats étudiés (marbre et granite), la perméabilité des mortiers contenant des particules du groupe #2, uniforme ($d_m = 1,77$ mm), est comparable à celle de bétons confectionnés à partir d'un granulat de même type mais de granulométrie étalée. La perméabilité aux gaz est donc fortement tributaire de l'interaction pâte/granulat des particules fines. Nos essais sur mortiers montrent l'importance significative des particules de taille intermédiaire (autour de 1 mm). C'est dire que la substitution partielle de la fraction fine d'un granulat à béton par un granulat de marbre pourrait permettre l'optimisation de la perméabilité aux gaz du béton et accroître ainsi sa durabilité et plus spécifiquement celle du béton de peau qui est soumis à des cycles de mouillage/séchage plus sévères. Cet élément de conclusion est majeur pour le marché des mortiers de réparation pré-ensachés appliqués en couche mince en peau des bétons de structures réhabilitées, dans lesquels on se limite actuellement à l'utilisation de particules de quartz.

- [1] PERRATON D., CARLES-GIBERGUES A., AÏTCIN P.-C. (1989a), *Contribution à l'étude de la perméabilité à l'air des bétons à hautes performances*, le premier colloque canadien sur le ciment et le béton, présenté à l'université Laval, Québec, Canada.
- [2] PERRATON D., CARLES-GIBERGUES A., AÏTCIN P.-C. (1989b), *Perméabilité vue par le chercheur. Les Bétons à Hautes Performances – du matériau à l'ouvrage*, Presses de l'ENPC, pp. 263-284.
- [3] PERRATON D., *La perméabilité aux gaz des bétons hydrauliques*, Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse, © 1992, 225 pages.
- [4] PERRATON D., CARLES-GIBERGUES A., AÏTCIN P.-C. (1999), Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons : perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque. Partie II – Étude de l'influence de la taille des éprouvettes et de la variabilité des résultats dans le cas d'un BHP, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **221**, mai-juin, pp. 79-87.
- [5] BAALBAKI W. (1990), *Bétons à haute performance à matrice constante, influence de la nature des granulats sur le comportement mécanique*, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- [6] PERRATON D., CARLES-GIBERGUES A., AÏTCIN P.-C. (1988), *Air Permeability Measurement*, MRS Boston, **vol. 137**, pp. 191-201.
- [7] MASO J.-C. (1969), La nature minéralogique des agrégats, facteur essentiel de la résistance des bétons à la rupture et à l'action du gel, *Revue Matériaux et Construction*, **647, 648 et 649**, pp. 247, 276 et 321, 330.
- [8] MEHTA P.K. (1986), *Concrete Structure, Properties and Materials*, Prentice-Hall Inc., USA, 450 pages.
- [9] NEVILLE A.M., BROOKS J.J. (1987), *Concrete Technology*, Longman Scientific and Technical, UK, 438 pages.
- [10] MASO J.-C. (1982), *La liaison pâte-granulats, Le Béton hydraulique*, Presses l'ENPC, chap. 14, pp. 247-259.
- [11] MEHTA P.K., MONTEIRO P.S.M. (1987), *Effect of Aggregate, Cement, and Mineral Admixtures on the Microstructure of the Transition Zone*, MRS : Bonding in Cementitious Composites, **vol. 114**, pp. 65-75.
- [12] BRETON D., CARLES-GIBERGUES A., BALIVY G., GRANDET J. (1991), Contribution to the Formation Mechanism of the Transition Zone Between Rock-Cement Paste, *Cement and Concrete Research*, **vol. 22**.
- [13] CARLES-GIBERGUES A., OLLIVIER J.-P., FOURNIER B., BÉRUBÉ M.-A. (1989), *A new approach to the study of alkali-aggregate reaction mechanisms*, 82^e Conférence internationale sur les réactions alcali-granulat, Kyoto, pp. 161-166.

Liste des principaux symboles utilisés

Abs	coefficient d'absorption d'eau (%)
C_o	résistance à la compression de la roche-mère (MPa)
D_s	degré de saturation (%)
d_m	taille moyenne des particules (mm)
E_o	module d'élasticité de la roche-mère (GPa)
H_R	humidité relative (%)
k_a	coefficient de perméabilité apparente (m ²)
L	longueur de l'éprouvette (mm)
M_{eau}	masse de l'éprouvette saturée superficiellement sèche, pesée dans l'eau (g)
M_{essai}	masse de l'éprouvette au moment de la mesure de k _a (g)
M_{sèche}	masse sèche de l'éprouvette (g)
M_{sss}	masse de l'éprouvette saturée superficiellement sèche (g)
T_o	résistance à la traction de la roche-mère (MPa)
ν_o	coefficient de Poisson de la roche-mère
ρ_{sss}	masse volumique (kg/m ³)
ε_{expé}	porosité volumique établie expérimentalement par pesée hydrostatique, excluant le volume d'air piégé et/ou entraîné (%)
φ	diamètre de l'éprouvette (mm)

ABSTRACT

Permeability of cover concrete: Can choice of aggregate turn out to be more determinant than the W/C ratio?

D. PERRATON, P.-C. AİTCIN

Based on research work carried out jointly at the laboratories of the Institut National des Sciences Appliquées (INSA) in Toulouse (France) and the University of Sherbrooke (Canada), it has been observed that the gas permeability of concretes produced in Toulouse always proves to be lower. A study performed on mortars has been devised to assess the importance of the mineralogical nature of the aggregate. The permeability of mortars with marble aggregate is consistently less than that of mortars with granite aggregate. By virtue of interaction with the hydrated cement paste, the mineralogical nature of the aggregate dictates, to a greater extent than the W/C ratio, the level of air permeability of the mortar subjected to drying. Results also reveal that gas permeability is dependent upon the paste/aggregate interaction of the smallest particles. The partial substitution of the fines portion of a concrete aggregate by a similarly-sized marble aggregate warrants further consideration, in the aim of optimizing the gas permeability of the concrete and thereby increasing durability of the cover concrete.