

# La microfissuration d'autodessiccation et la durabilité des BHP et BTHP

(Self-desiccation microcracking and HPC and VHPC durability)

M.-P. Yssorche-Cubaynes, J.-P. Ollivier

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA-UPS, 31077 Toulouse Cedex (France)

Article reçu : 30 septembre 1997 ; Article accepté : 19 février 1998

## R É S U M É

Cet article présente les principaux résultats d'une vaste étude expérimentale ayant pour principal objectif d'étudier dans quelle mesure les microfissures engendrées par l'autodessiccation dans les bétons à hautes performances (BHP) et les bétons à très hautes performances (BTHP) peuvent remettre en cause la durabilité potentiellement élevée de ces bétons. Pour cela, la durabilité de 8 bétons de résistance moyenne en compression à 28 jours comprise entre 20 et 110 MPa est caractérisée par des mesures de perméabilité à l'air. L'amplitude et la vitesse d'autodessiccation de ces bétons sont déterminées. Elles sont d'autant plus importantes que le rapport E/C diminue. La microfissuration engendrée par l'autodessiccation est quantifiée pour les 8 bétons âgés de 28 jours et d'un an. Le principe et le degré de précision de l'outil de quantification utilisé sont présentés. La surface spécifique de microfissuration croît avec le développement de l'autodessiccation. La perméabilité à l'air des bétons conservés en autodessiccation est mesurée. Des résultats préliminaires montrant qu'une préparation des échantillons non maîtrisée pouvait conduire à des perméabilités de BHP élevées et dispersées, la mise au point d'un préconditionnement s'est avérée nécessaire. Son influence sur l'état microstructural des bétons est discutée. Avec le préconditionnement adopté, la perméabilité à l'air n'évolue pas entre 28 jours et 3 ans. Ainsi, l'existence de microfissures d'autodessiccation dans les BHP et BTHP ne remet pas en cause leur durabilité.

## A B S T R A C T

This paper presents principal results of an extensive experimental study related to a main objective: to study how microcracks inducing by self-desiccation of High Performance Concrete can call into question the potentially high durability of these concretes. So, durability of 8 concretes of a 20-110 MPa range has been characterised with air permeability measurements. Development of self-desiccation has been determined. The lower the water to cement ratio, the higher is the self-desiccation. Microcracks due to self-desiccation have been quantified for 8 concretes between 28 days and 1 year. The principle and the accuracy of the quantification's tool have been presented. Cracking specific surface area increases with the development of self-desiccation. Air permeability of concretes stored in self-desiccation conditions has been measured. Preliminary results showing that wrong preparation of samples can lead to great and scattered permeability of HSC, then the development of an experimental procedure had been necessary. Its influence on microstructure of concretes has been analysed. With our procedure, permeability does not increase between 28 days and 3 years. Finally, it can be concluded that self-desiccation microcracks in HPC and VHPC do not question the durability.

## 1. INTRODUCTION

Pour obtenir un béton durable, il faut qu'il résiste à la pénétration d'agents agressifs tels que l'eau, les ions chlore... Cela implique que toute fissure et toute microfissure, non inhérente au fonctionnement propre du béton de structure, peut avoir un effet néfaste. Ces fissures, qui apparaissent lorsque les contraintes de traction engendrées sont supérieures aux résistances en traction du béton, ont deux principales causes :

– la contraction du béton lors du refroidissement succédant au dégagement de chaleur engendré par les réac-

tions d'hydratation (encore appelé retrait thermique), – l'autodessiccation.

Pour être exhaustif, il faut ajouter également que des fissures peuvent aussi être engendrées par le ressuage, le retrait plastique ou le retrait de dessiccation.

Notre objectif se limite à l'étude de l'influence de l'autodessiccation sur la durabilité des bétons à hautes et très hautes performances. Plus précisément, le but de cet article est d'étudier dans quelle mesure le réseau de microfissures engendrées par l'autodessiccation peut remettre en cause, par son ampleur, la durabilité des BHP et BTHP. Soulignons que la durabilité de ces

### Editorial note

LMDC, The Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, is a RILEM Titular Member. It is directed by Prof. Jean-Pierre Ollivier, a RILEM Senior Member who is member of the RILEM Coordinating Committee.

bétons est, *a priori*, potentiellement élevée [1, 2]. En effet, ils ont, de part leur constitution, une porosité capillaire communicante beaucoup plus faible que celle des bétons courants.

Une large gamme de bétons a été confectionnée : du béton courant de 20 MPa de résistance moyenne en compression après 28 jours de cure humide aux BTHP de 110 MPa. Ces bétons ont été conservés après 1 jour de cure humide dans une enveloppe étanche (c'est-à-dire sans échange hydrique). Nous disposons ainsi de bétons représentatifs de l'état du matériau au cœur des ouvrages.

Le phénomène d'autodessiccation est mis en évidence par un suivi de l'évolution de l'humidité relative au cœur du béton durant 1 an. L'influence du rapport E/C et de la présence ou non de fumée de silice est analysée.

La microfissuration engendrée par l'autodessiccation est ensuite observée et quantifiée pour tous les bétons âgés de 28 jours et d'un an. Compte tenu de l'intérêt qu'elle présente pour le problème posé, la méthode utilisée pour quantifier la microfissuration est présentée ainsi qu'une analyse statistique permettant d'estimer la précision des mesures de microfissuration.

On détermine, enfin, dans quelle mesure cette microfissuration peut remettre en cause la durabilité des BHP et BTHP. Pour cela, la durabilité de tous les bétons étudiés est caractérisée à l'aide d'une propriété de transfert souvent choisie comme indicateur de durabilité [3] : la perméabilité au gaz. L'analyse critique de résultats préliminaires montrant qu'une préparation des échantillons inadaptée pouvait conduire à des perméabilités de BHP élevées et dispersées [4], la mise au point d'un préconditionnement s'est avérée nécessaire. L'influence de ce dernier sur l'état microstructural des bétons est, tout d'abord, discutée. Les résultats relatifs aux mesures de perméabilité à l'air effectuées à 28 jours, 1 an et 3 ans sont ensuite présentés et analysés.

## 2. MATÉRIAUX ÉTUDIÉS

Huit bétons ont été confectionnés :

- 2 bétons courants (BC) dits « de référence » de 20 et 35 MPa de résistance moyenne après 28 jours de cure humide (notée  $f_{c28}$ ),
- 4 bétons de hautes performances, un BHP de résistance moyenne en compression voisine de 60 MPa et 3 BHP de 85 MPa,
- 2 bétons à très hautes performances (BTHP) de résistance moyenne en compression de 110 MPa.

Les 3 bétons de résistance moyenne en compression voisine de 85 MPa se distinguent par :

- la nature minéralogique des granulats (calcaire et diabase),
- la présence ou non de 10% en poids de liant de Fumée de Silice Condensée,

Les deux BTHP n° 6 et n° 7 se distinguent par la nature minéralogique des granulats.

La composition et les caractéristiques à l'état frais et

	BC 0	BC 1	BHP 2	BHP 3	BHP 4	BHP 5	BTHP 6	BTHP 7
CEM II/A 32,5	250	350	-	-	-	-	-	-
CEM I 52,5	-	-	400	405	405	450	500	500
Fumée de Silice	-	-	-	45	45		50	50
Marbre	2020	1900	1900	-	1860	1860	-	1830
Diabase	-	-	-	1960	-	-	2000	-
Eau totale	187,5	208,7	176	157,5	157,5	148	137,5	137,5
Résine GT (%)*	0	0	1	4	3	4	4	4
Affaissement (cm)	2,5	9	> 25	16,5	15	20	2	14,5
E/L	0,75	0,59	0,44	0,35	0,35	0,33	0,25	0,25
$f_{c28}$ (MPa)	20,1	33,9	59,3	85,8	91,7	80	102	113,9

\* % total (eau + extrait sec) du dosage en liant.

durci des différents bétons sont présentées dans le Tableau 1.

## 3. EFFETS DE L'AUTODESSICCATION

### 3.1 Mise en évidence de l'autodessiccation

L'autodessiccation désigne le phénomène de dessiccation interne progressif, observable au cœur d'une éprouvette de pâte de ciment au fur et à mesure que l'hydratation progresse. Ce phénomène résulte de la contraction Le Chatelier. Des chercheurs, [5, 6] ou plus récemment [7] ont mis en évidence le phénomène en mesurant l'évolution de l'humidité relative interne en fonction du temps sur des pâtes, des mortiers ou des bétons. Nous adoptons la même démarche mais en étudiant une large gamme de bétons dont les rapports E/C varient de 0,75 à 0,27.

Après 1 jour de cure humide, 10 à 20 grammes de béton sont prélevés au cœur d'éprouvettes cylindriques de 11 cm de diamètre et de 22 cm de haut. Ces fragments de béton sont conservés dans des tubes étanches durant 1 an. On simule ainsi des conditions d'autodessiccation. Les variations de l'humidité relative d'équilibre sont mesurées à l'aide d'une sonde hygrométrique de marque Vaisala HMP 31UT à intervalle de temps régulier. Les résultats sont présentés à la Fig. 1.

Pour conserver à la figure toute sa lisibilité, les points expérimentaux des courbes de la Fig. 1 ont été supprimés (sauf pour la courbe du béton n° 2). L'incertitude des mesures d'humidité relative est indiquée à la Fig. 2.

Nous obtenons, pour une large gamme de bétons, des résultats tout à fait comparables à ceux obtenus sur pâtes de ciment [5], sur mortiers et bétons [6] et sur pâtes et bétons [7]. Ainsi, les courbes de la Fig. 1 indiquent que l'autodessiccation, exprimée par l'abaissement de l'humidité interne, est très faible pour les bétons courants. Elle est, en outre, d'autant plus importante et plus rapide que le rap-

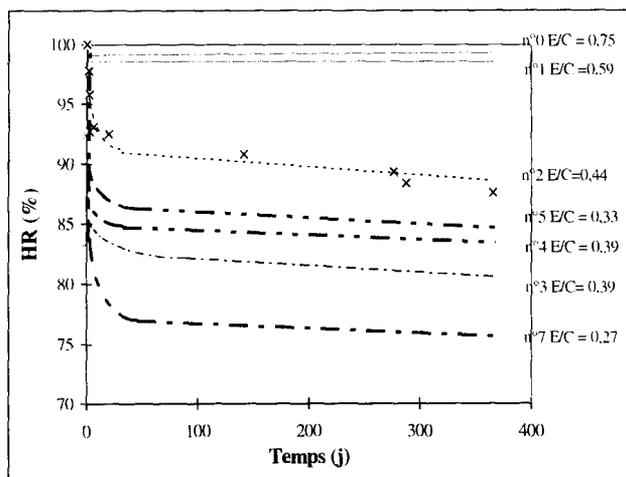


Fig. 1 - Mise en évidence de l'autodessiccation des bétons.

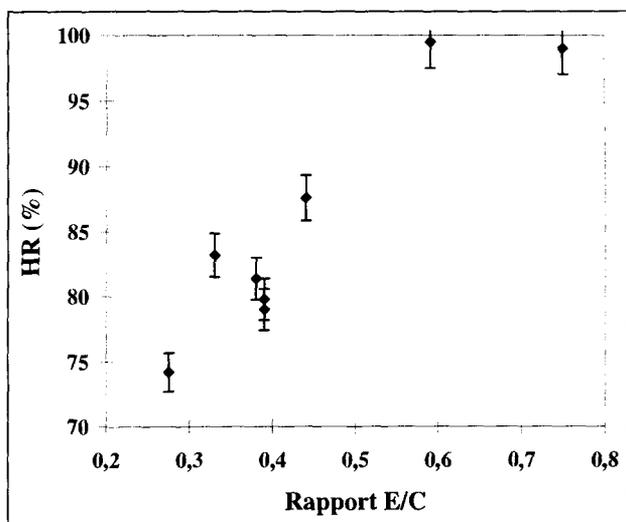


Fig. 2 - Variation de l'humidité relative des bétons à l'équilibre avec le rapport E/C.

port E/C du béton est plus faible (cf. Fig. 2). L'humidité relative d'équilibre atteint ainsi 75% environ après 1 mois pour un BTHP de rapport E/C de 0,27, valeur à laquelle on considère que l'hydratation n'est généralement plus possible [8]. Il faut cependant souligner que tous les ciments ne réagissent pas de façon identique vis à vis de la valeur d'humidité relative en dessous de laquelle l'hydratation s'arrête. Pour s'affranchir de ce paramètre, dans cette étude, le même ciment a été utilisé pour tous les BHP et BTHP ce qui facilite l'interprétation des résultats en permettant de comparer les bétons.

### Influence des paramètres de composition

Compte tenu de l'incertitude de mesure d'humidité relative, de l'ordre de  $\pm 3\%$ , les courbes d'autodessiccation obtenues pour un BHP sans fumée de silice (n° 5) et un BHP avec 10% en poids de liant de FSC (n° 4), de même résistance en compression, sont peu différentes (cf. Fig. 1). Ce résultat va à l'encontre de beaucoup de résultats bibliographiques [9, 10]. En effet, *a priori*, lorsqu'un BHP contient de la fumée de silice, l'autodessiccation devrait être plus forte pour trois raisons principales :

- l'emploi de fumée de silice permet d'affiner la structure poreuse,
- la réaction pouzzolanique de la fumée de silice engendre un fort retrait chimique, [9],
- cette réaction est relativement insensible à une chute d'humidité relative, [11].

On n'observe pas, en outre, d'effet spécifique de la nature du granulat (diabase ou calcaire) pour deux BHP de résistance proche de 85 MPa (n° 3 et n° 4). Ce résultat est prévisible car l'autodessiccation dépend du rapport E/C de la pâte de ciment.

## 3.2 La microfissuration d'autodessiccation

Si de nombreuses publications traitant de l'autodessiccation peuvent être consultées, il n'en est pas de même, en revanche, en ce qui concerne l'étude quantitative de la microfissuration qu'elle peut engendrer.

La méthode utilisée pour observer et quantifier la microfissuration est tout d'abord présentée. Une analyse statistique relative à la quantification de la microfissuration s'est avérée nécessaire pour préciser l'incertitude des mesures. Les résultats relatifs à l'observation et à la quantification de la microfissuration des bétons âgés de 28 jours et 1 an sont ensuite analysés.

### 3.2.1 Méthodes pour observer et quantifier la microfissuration

La technique de simple réplique [12] est utilisée pour observer la microfissuration des bétons.

Le relevé informatisé des microfissures permet, au moyen d'un logiciel d'analyse d'images MINDA [13], [14] de déterminer leur densité  $L_A$ .

$$L_A = \frac{L_t}{A_n} = \frac{\text{longueur totale de microfissures}}{\text{aire nette étudiée}}$$

La surface spécifique de microfissuration (notée  $S_v$ ), grandeur macroscopique choisie pour caractériser la microfissuration, se définit alors par la relation :

$$L_A = \frac{\pi}{4} S_v$$

À l'aide d'un microscope électronique à balayage, nous observons et quantifions la microfissuration de 60 vues choisies aléatoirement dans une réplique à un grandissement de ( $\times 200$ ). Pour un échantillon de béton de 98,5 cm<sup>2</sup> de surface à un âge donné, nous analysons la microfissuration de quatre répliques soit 78,4 mm<sup>2</sup>. La surface spécifique résultante  $S_v$  est la moyenne des quatre surfaces spécifiques obtenues à partir des quatre répliques.

### 3.2.2 Analyse statistique

L'analyse statistique d'un échantillon qualifié de peu microfissuré ( $S_v$  inférieur à 0,5 mm<sup>-1</sup>) est effectuée à partir d'une réplique d'un BHP conservé 28 jours sans échanges. De même, celle d'un échantillon qualifié de très microfissuré ( $S_v$  supérieur à 1,5 mm<sup>-1</sup>) est réalisée sur une réplique d'un BTHP conservé 28 jours sans

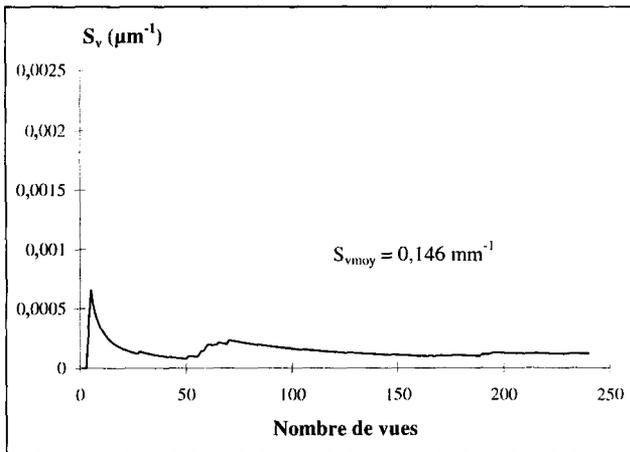


Fig. 3a – Surface spécifique de microfissuration en fonction du nombre de vues. Cas du béton peu microfissuré.

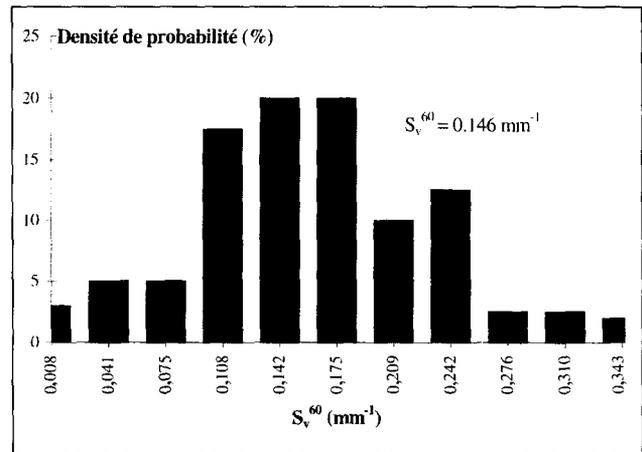


Fig. 4a – Histogramme de densité de probabilité de  $S_v^{60}$ . Cas du béton peu microfissuré.

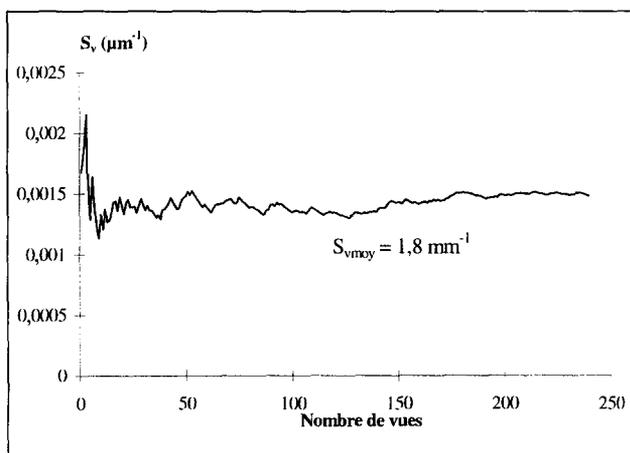


Fig. 3b – Surface spécifique de microfissuration en fonction du nombre de vues. Cas du béton très microfissuré.

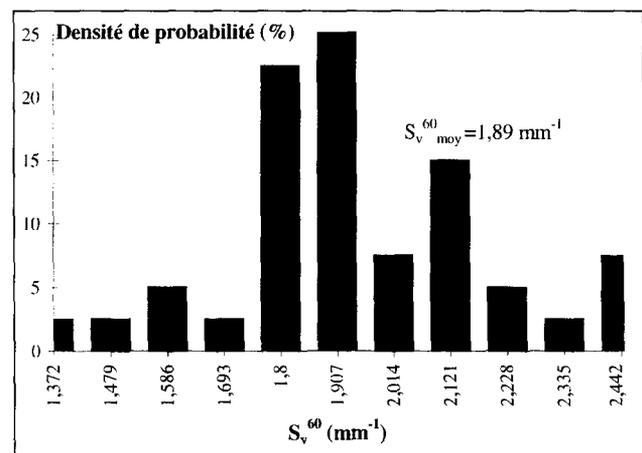


Fig. 4b – Histogramme de densité de probabilité de  $S_v^{60}$ . Cas du béton très microfissuré.

échanges puis préconditionné 6 jours à 50°C puis 1 jour en dessiccateur à 20°C.

Pour ces deux répliques respectives, 240 champs disjoints, régulièrement distribués sur la surface de la réplique, sont numérisés et la fissuration en est extraite.

L'évolution de la surface spécifique de microfissuration  $S_v$  est tracée en fonction du nombre de champs prospectés. Cette courbe nous permet de fixer la taille de l'échantillon macroscopique (cf. Figs. 3a et 3b).

Dans le cas du béton très microfissuré ( $S_{v\text{moy}} = 1,8 \text{ mm}^{-1}$ ), la valeur de  $S_v$  se stabilise autour de 25 vues analysées. Au contraire, dans le cas du béton peu microfissuré, l'analyse de 140 vues semble nécessaire. Toutefois, pour choisir le nombre de vues à analyser, il faut aussi prendre en compte le temps d'analyse qui doit rester raisonnable. Nous avons donc choisi, à titre de compromis, de fixer la taille de notre échantillon macroscopique à 60 vues quelque soit l'état de microfissuration. Le temps d'analyse est alors de l'ordre de 3 heures pour une réplique.

L'erreur commise en analysant 60 vues pour caractériser la microfissuration d'échantillons peu et très microfissurés est, ensuite, déterminée. Pour cela, parmi les 240 champs, nous effectuons un tirage uniforme de 60 vues avec lesquelles nous calculons  $S_v^{60}$ . Cette opération est répétée un certain nombre de fois (en l'occurrence, 40 fois).

La fonction de distribution de la variable aléatoire  $S_v^{60}$   $F(x) = p(x < X)$  est, ensuite, déterminée pour les deux répliques. On en déduit alors la densité de probabilité par dérivation relative à l'échantillon peu microfissuré (cf. Fig. 4a) et très microfissuré (cf. Fig. 4b).

$p(X) dx = dF / dx dx = p(X < x < X + dx)$ . L'incrément  $\delta S_v$  est choisi de façon à avoir environ 10 intervalles.

Si on assimile la répartition des densités de probabilité expérimentales présentées aux Figs. 4a et 4b à celle d'une loi normale, on peut estimer la probabilité pour que la grandeur  $S_v^{60}$  soit égale à la valeur moyenne  $S_{v\text{moy}}^{60}$  à l'écart type « s » près.

Dans le cas de l'échantillon peu microfissuré, nous avons :

$$S_{v\text{moy}}^{60} = 0,146 \text{ mm}^{-1} \quad s = 0,0723 \text{ mm}^{-1}$$

Dans le cas de l'échantillon très microfissuré, nous avons :

$$S_{v\text{moy}}^{60} = 1,89 \text{ mm}^{-1} \quad s = 0,245 \text{ mm}^{-1}$$

Pour une valeur de l'erreur de l'ordre de l'écart type, on peut estimer avoir :

- 70% de chances que l'erreur soit inférieure à 49% pour l'échantillon peu microfissuré,
- 60% de chances que l'erreur soit inférieure à 13% pour l'échantillon très microfissuré.

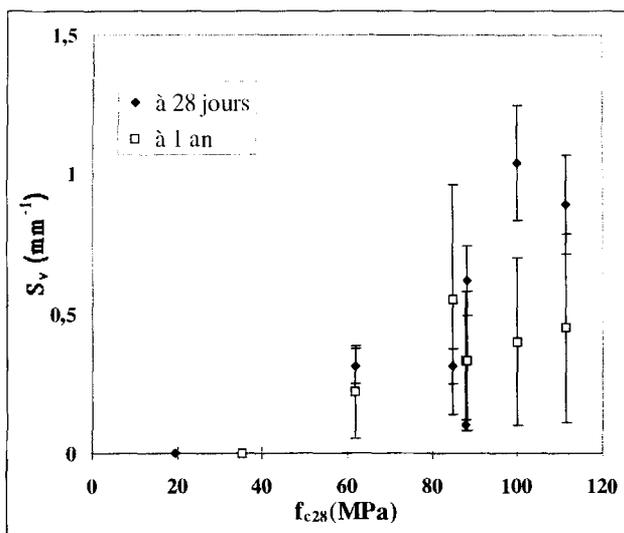


Fig. 5 – Variation de la surface spécifique de microfissuration d'autodessiccation des bétons en fonction de la résistance moyenne en compression. Influence de l'âge.

### 3.2.3 Résultats et analyses

À l'aide de la technique de la réplique, nous avons observé et quantifié la microfissuration de bétons conservés après 1 jour de cure humide sans échange.

La Fig. 5 présente la variation de surface spécifique de microfissuration des bétons ( $S_v$ ) en fonction de leur résistance moyenne en compression. Les bétons sont conservés 28 jours et 1 an sans échange hydrique.

Les bétons courants ne sont pas microfissurés. L'autodessiccation étant très faible avec de tels bétons, l'absence de microfissures était prévisible.

Au contraire, les BHP et BTHP sont microfissurés. Cette différence entre les bétons courants et les BHP et BTHP confirme que la microfissuration observée résulte bien de l'autodessiccation et pas d'un autre phénomène (comme un développement de la microfissuration provoqué lors de la préparation de l'échantillon). La surface spécifique de microfissuration des BHP et BTHP tend à augmenter avec la résistance en compression du béton donc avec l'intensité de l'autodessiccation et reste inférieure à  $1 \text{ mm}^{-1}$ . À titre de comparaison, la microfissuration est voisine de  $1,5 \text{ mm}^{-1}$  pour un béton courant chargé en compression uniaxiale à 94% de sa charge de rupture.

L'observation qualitative de cette microfissuration montre qu'elle n'est pas réellement structurée en réseau interconnecté. Il faut préciser, cependant, que toutes nos observations sont réalisées sur des plans et non en 3 dimensions. On n'a donc pas accès à la profondeur des microfissures. De plus, nous ne disposons d'aucun outil quantitatif pour déterminer le degré d'interconnexion des microfissures ni de leur ouverture. Dans ce sens, la mesure d'une propriété de transfert telle que la perméabilité à l'air prend tout son intérêt. En effet, la perméabilité est très sensible à ces deux paramètres.

Cette première partie de l'étude permet de conclure sur un point très important : la microfissuration d'autodessiccation n'évolue pas de façon significative entre 28 jours et 1 an. Dès études sont actuellement en cours pour caractériser la microfissuration à 3 ans.

## 4. CONSÉQUENCES DE L'AUTODESSICCATION SUR LA DURABILITÉ DES BÉTONS DE CŒUR

La perméabilité aux gaz étant une propriété de transfert particulièrement sensible à deux paramètres non pris en compte jusque là, à savoir l'ouverture des fissures et leur degré d'interconnexion, elle a donc été choisie pour caractériser la durabilité. Cependant, pour pouvoir mesurer la perméabilité aux gaz de BHP et BTHP, il faut les préconditionner. L'analyse critique de résultats préliminaires montrant qu'une préparation des échantillons inadaptée pouvait conduire à des perméabilités de BHP élevées et dispersées [4], la mise au point d'un préconditionnement s'est avérée nécessaire. L'influence de ce dernier sur l'état microstructural des bétons est, tout d'abord, discutée. Les résultats relatifs à la mesure de la perméabilité à 28 jours, 1 an et 3 ans sont ensuite analysés.

### 4.1 Méthode pour mesurer la perméabilité

La perméabilité à l'air est mesurée pour tous les bétons avec le perméamètre à air à charge variable [15].

### 4.2 Influence du préconditionnement

#### 4.2.1 Le préconditionnement : une nécessité

Le béton peut être considéré comme un matériau triphasique constitué d'une phase gazeuse (l'air), d'une phase liquide (l'eau) et d'une phase solide (pâte de ciment hydraté et granulats). Les transferts de gaz dans le béton, et donc la perméabilité à l'air, dépendent de l'état de saturation de la structure poreuse. La perméabilité à l'air d'un béton dont le réseau poreux est saturé n'est pas mesurable. Il faut donc préconditionner les échantillons pour, dans un premier temps, atteindre un état d'humidité tel que la perméabilité puisse être mesurée.

Dans un second temps, pour pouvoir comparer la perméabilité à l'air des bétons, il faut maîtriser leur humidité relative.

Pour comparer les perméabilités des bétons, donc leurs réseaux poreux, le préconditionnement doit drainer les mêmes familles de pores. D'autre part, la perméabilité caractérise essentiellement le transfert d'un fluide dans la porosité capillaire d'un béton. Il suffit donc que le préconditionnement permette le drainage de tous les pores de dimension supérieure à  $10 \text{ nm}$  (c'est-à-dire les pores capillaires) pour discriminer les bétons du point de vue de la perméabilité.

À l'aide de la relation de Kelvin Laplace, on peut associer à une humidité relative donnée et une température donnée un rayon de pores maximum encore emplies d'eau «  $r_{pmax}$  » à l'issue du préconditionnement, en supposant l'équilibre réalisé. On peut ainsi déterminer les familles de pores qui sont vidangées de leur eau.

Dans un premier temps, avec le préconditionnement choisi (6 jours dans une étuve ventilée à  $50^\circ\text{C}$  et 1 jour en dessiccateur à  $20^\circ\text{C}$ ), nous nous interrogeons pour

Tableau 2 – Humidité relative d'équilibre (en %) des bétons avant et après préconditionnement à 28 jours et à 1 an			
Conservation sans échange à 28 jours			
Type de bétons	avant préconditionnement	après préconditionnement	$\Delta HR$ (%)
BHP n° 2	95	77	18
BTHP n° 7	77	73	4
Conservation sans échange à 1 an			
Type de bétons	avant préconditionnement	après préconditionnement	$\Delta HR$ (%)
BC n° 0	99	70	29
BC n° 1	99	58	41
BHP n° 2	88	58	30
BHP n° 3	80	69	11
BHP n° 4	80	67	13
BHP n° 5	83	68	15
BTHP n° 7	75	56	19

$\Delta HR$  (%) = HR avant le préconditionnement - HR après le préconditionnement.

savoir quelles familles de pores sont drainées, ceci indépendamment de la durée du traitement. Dans un second temps, nous nous intéressons au temps requis pour atteindre cet objectif.

#### 4.2.2 Dimension des pores drainées à l'équilibre et mise en équilibre des humidités

##### ■ Dimension des pores drainées

À l'aide du diagramme de l'air humide, on peut déterminer l'humidité relative régnant dans une étuve à 50°C. Si l'air, à 20°C et 50% d'humidité relative, est chauffé dans l'étuve ventilée, l'humidité relative qui y règne est voisine de 12%. C'est, à l'équilibre, celle du béton.

À 50°C et 12% d'humidité relative, la relation de Kelvin Laplace donne les dimensions des pores vidés de leur eau : le rayon maximum est 0,4 nm. Toute la porosité capillaire communicante est donc drainée à l'équilibre.

##### ■ Mise en équilibre des humidités

Avec le préconditionnement choisi dans notre étude, nous déterminons à l'aide de mesures d'humidité relative si l'état d'équilibre est atteint c'est-à-dire si l'humidité relative est proche de 12% au sein de l'échantillon après 6 jours dans l'étuve.

Pour cela, l'humidité relative de petits morceaux de béton prélevés, après rupture, au cœur d'échantillons de 11,2 cm de diamètre et 5 cm de haut conservés en autodesiccation et placés dans des tubes à essai a été mesurée. L'humidité relative d'équilibre a été mesurée avant et après le préconditionnement à 28 jours pour le BHP n° 2 et le BTHP n° 7 et à 1 an pour tous les bétons (cf. Tableau 2).

Après le préconditionnement, l'humidité relative au cœur des échantillons de bétons est très supérieure à l'humidité relative d'équilibre 12%. Quel que soit le béton, l'état d'équilibre n'est donc pas atteint après 6 jours à 50°C et 1 jour en dessiccateur.

Cependant, nous constatons que, quels que soient les bétons, l'humidité relative d'équilibre est inférieure à 77%

au cœur d'échantillons de deux bétons testés âgés de 28 jours et inférieure à 70% à 1 an. En calculant le rayon moyen maximum des pores emplis d'eau après le préconditionnement à l'aide de la relation Kelvin Laplace, on constate que la porosité capillaire est drainée à cœur pour tous les bétons. En effet,  $r_{pmax}$  des bétons n° 2 et n° 7 à 28 jours après préconditionnement est voisin de 3,5 nm, celui des bétons conservés 1 an est proche de 2,5 nm.

D'autre part, nous constatons que la variation de l'humidité relative avant et après le préconditionnement ( $\Delta HR$ ) est variable d'un béton à l'autre. L'efficacité du traitement n'est donc pas la même. Le drainage est, en outre, plus ou moins complet. Par exemple, à 1 an, tous les pores de rayon supérieur à 2 nm sont drainés pour le béton courant n° 1 tandis que seulement les pores de rayon supérieur à 3,5 nm sont vidés de leur eau pour le BHP n° 3. Le préconditionnement n'a, par conséquent, manifestement pas le même effet sur ces deux bétons. Ce résultat est confirmé par les mesures de pertes de masse des échantillons pendant le préconditionnement.

Les pertes de masse des échantillons de bétons avant, pendant et après le préconditionnement de 6 jours à 50°C suivi de 1 jour en dessiccateur ont été mesurées. PMO désigne les pertes de masse d'échantillons de béton de 11,2 cm de diamètre et 5 cm de hauteur enregistrées dès la fin de cure (1 jour). De même, PM1 correspond aux pertes de masse d'échantillons de béton de même dimension durant le préconditionnement. Enfin, PM2 désigne les pertes de masse de morceaux de bétons prélevés au cœur d'échantillons après le préconditionnement. Ces morceaux de béton sont étuvés à 105°C  $\pm$  1°C jusqu'à poids constant. Ces pertes de masse sont rapportées au volume apparent de l'échantillon. Nous pouvons donc assimiler PM1, PM2 et PM3 à des porosités.

La somme de ces pertes de masse notée  $\Sigma PM$  correspond à la quantité totale d'eau libre contenue dans les échantillons de béton. La somme (PMO + PM1) correspond à la quantité d'eau qui s'est évaporée avant la mesure de perméabilité tandis que PM2 correspond à la quantité d'eau libre que contient encore l'échantillon au moment de la mesure de perméabilité.

La Fig. 6 présente l'évolution des pertes de masse PMO, PM1 et PM2 en fonction de  $f_{c28}$  pour tous les bétons conservés sans échanges à l'âge de 28 jours. On remarque que le préconditionnement choisi n'affecte pas de la même façon le réseau poreux d'un BC, d'un BHP ou d'un BTHP.

En conservation sans échange, les pertes de masse PMO sont peu différentes de zéro, les pertes de masse PM1 représentent alors approximativement la quantité d'eau qui s'est évaporée avant la mesure de perméabilité. Cette quantité d'eau diminue durant le préconditionnement lorsque la résistance des bétons augmente. Au contraire, la quantité d'eau libre PM2 restante dans l'échantillon au moment de la mesure de perméabilité augmente avec  $f_{c28}$ . Cependant, au delà de 80 MPa, il reste grosso modo la même quantité d'eau dans les bétons après le préconditionnement et cette quantité d'eau libre contenue dans l'échantillon est plus grande que celle évaporée durant le préconditionnement.

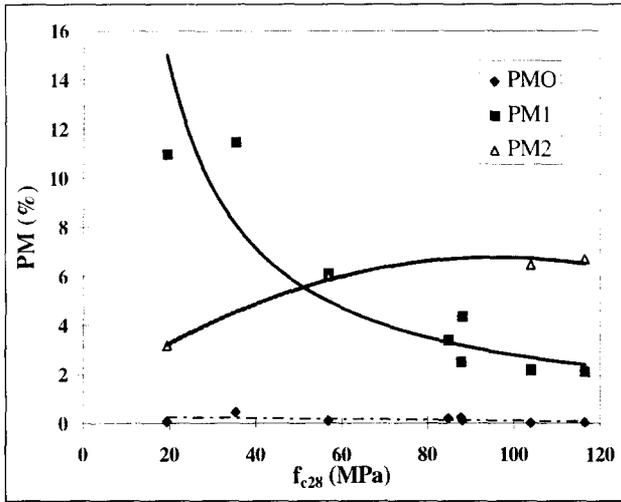


Fig. 6 – Variation des pertes de masse PMO, PM1 et PM2 avec la résistance  $f_{c28}$  pour tous les bétons conservés sans échange à l'âge de 28 jours.

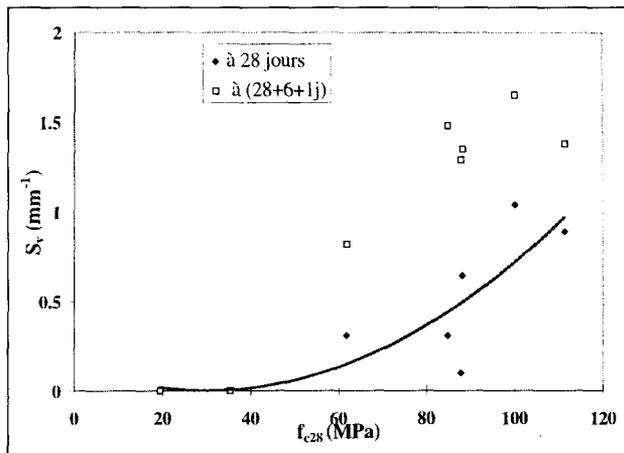


Fig. 7 – Variation de la surface spécifique de microfissuration avec la résistance  $f_{c28}$ . Influence du préconditionnement.

Au moment de la mesure de perméabilité, le BHP n° 2, par exemple, a perdu une quantité d'eau libre voisine de 6,2% (PMO + PM1). Il reste dans ce même échantillon 6% d'eau évaporable. Le BTHP n° 7 a, dans les mêmes conditions de conservation, perdu seulement 2,1% de son eau libre et il reste dans l'échantillon 6,7% d'eau évaporable.

Ainsi, le préconditionnement a permis de drainer environ 50% du réseau poreux du BHP n° 2 et 20% seulement du BTHP n° 7. Nous n'affectons donc pas de la même façon le réseau poreux de ces deux bétons mais rappelons que, dans tous les cas, la porosité capillaire est drainée.

Un autre point important à souligner est la mise en évidence de l'existence de gradients hydriques entre la périphérie de l'éprouvette et son cœur. Ces gradients peuvent être responsables du développement d'une microfissuration qualifiée de secondaire.

Nous avons quantifié les réseaux de microfissures d'échantillons avant et après le préconditionnement : à 28 jours et à 28 jours plus 6 jours à 50°C plus 1 jour en dessiccateur noté (28 + 6 + 1j). La technique utilisée pour l'observation et la quantification de la microfissuration est explicitée au paragraphe 3.2.1

	Sv *(surface spécifique de microfissuration) (mm <sup>-1</sup> )		
	Sv en peau		Sv à cœur
Âge du béton	à 28 jours	à (28 + 6 + 1j)	à (28 + 6 + 1j)
BHP n°3	0,53	2,09	0,41

Analyse de 4 répliques, pour une réplique, analyse de 60 vues (x 400)

Nous avons analysé les **mêmes** zones de béton avant et après le préconditionnement soit 4 répliques pour chaque béton (n° 0 à n° 7) respectivement à 28 jours et à (28 + 6 + 1j). Nous présentons sur la Fig. 7 l'évolution de la surface spécifique de microfissuration Sv en fonction de  $f_{c28}$  de tous les bétons à 28 jours et à (28+6+1j).

Nous constatons que le traitement thermique de 6 jours à 50°C ne crée pas de microfissures de surface pour les bétons courants. Ainsi, aucune microfissure n'est observée avant ou après préconditionnement. L'absence de microfissures dans les bétons courants s'explique probablement par la forte porosité de ces bétons qui permet la relaxation des contraintes dans le matériau mais aussi, par l'existence de faibles gradients hydriques en peau.

Au contraire, pour tous les autres bétons étudiés, l'évolution du paramètre Sv est quasiment similaire entre 28 jours et (28 + 6 + 1j). Le préconditionnement provoque une même augmentation de la densité des microfissures initialement existantes.

Soulignons, en outre, le caractère *superficiel* de cette microfissuration. Nous avons, en effet, mis en évidence ce phénomène pour le BHP n° 3 : l'échantillon a été scié après le préconditionnement pour observer et quantifier la microfissuration à cœur. Le Tableau 3 montre que la surface spécifique de microfissuration obtenue au cœur après le préconditionnement est voisine de celle obtenue en surface avant le préconditionnement [16].

Le préconditionnement choisi provoque donc une augmentation significative de la surface spécifique de microfissuration, elle même croissante avec la résistance en compression du béton. Toutefois, cette microfissuration reste superficielle et n'est que l'extension d'une microfissuration préalablement existante.

### 4.3 Résultats et analyses

La Fig. 8 présente la variation de la perméabilité à l'air de bétons conservés sans échange en fonction de la résistance moyenne en compression, à 28 jours, 1 an et 3 ans.

**Il n'y a pas de variation significative de la perméabilité à l'air entre 28 jours, 1 an et 3 ans.**

Pour les BHP et BTHP, ce résultat est la conséquence logique des observations précédentes. En effet, entre 28 jours et 1 an, l'humidité relative d'équilibre de ces bétons varie peu, la microfissuration se stabilise. La quantification de la microfissuration des bétons âgés de 3 ans est en cours d'analyse pour vérifier ce résultat.

Cependant, on peut s'interroger quant à l'évolution de la perméabilité à l'air des bétons courants entre 28 jours et 3 ans. La stabilité de la perméabilité peut s'expliquer soit

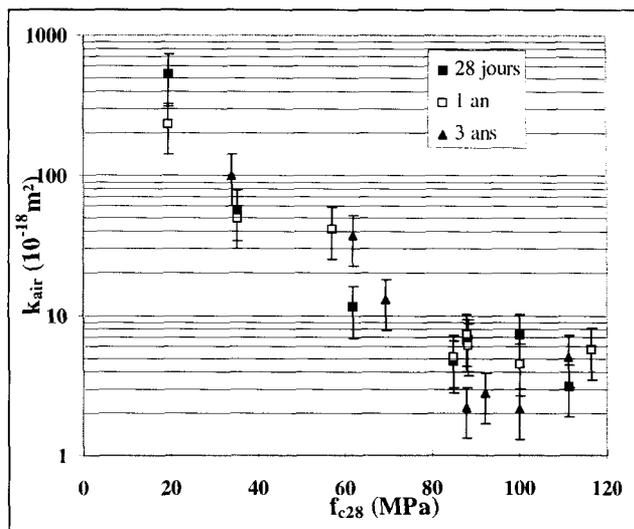


Fig. 8 – Variation de la perméabilité à l'air en fonction de la résistance  $f_{c28}$ . Influence de l'âge.

par la faible variation de la porosité capillaire entre 28 jours et 3 ans (l'hydratation étant quasiment terminée à 28 jours) soit par la faible variation du degré d'interconnexion du réseau poreux.

## 5. CONCLUSIONS

Notre étude démontre un résultat important : la perméabilité à l'air d'une large gamme de bétons conservés en autodessiccation n'évolue pas entre 28 jours et 3 ans. Ainsi, **l'existence d'une microfissuration d'autodessiccation mise en évidence dans des BHP et BTHP ne remet pas en cause la durabilité potentielle de tels matériaux.**

Au cours de cette étude, nous avons en outre quantifié le phénomène d'autodessiccation pour des bétons de rapport E/C compris entre 0,27 et 0,75 en mesurant la variation de leur humidité relative d'équilibre au cours du temps. L'amplitude et la vitesse de l'autodessiccation sont d'autant plus importantes que le rapport E/C diminue. L'autodessiccation liée à l'utilisation de fumée de silice n'est pas plus sévère. De plus, la surface spécifique de microfissuration augmente avec le développement de l'autodessiccation qui, pour l'essentiel, se produit pendant les 28 premiers jours. Cependant, elle n'évolue pas entre 28 jours et 1 an. La quantification de la microfissuration des bétons âgés de 3 ans est en cours pour vérifier ce résultat.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques pour son soutien scientifique et financier.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Rollet, M., Levy, C. and Chabanis, F., 'Physical, mechanical and durability characteristics of various compressive strength (from 20 to 120 MPa)', Proceedings of an Canmet/ACI international conference on advances in concrete technology, (Athènes, 1992), 207-225.
- [2] Tang, L. and Nilsson, L.O., 'The effect of curing conditions on diffusivity of silica fume in high strength concrete', Proceedings of 9th International Congrès on Chemistry of Cement, (New Delhi, 1992) vol.5, 100-106.
- [3] Kropp, Hilsdorf, H.D., 'Performance Criteria for Concrete durability', Groupe de travail 116 de la RILEM, State of Art Report, (Chapman et Hall, 1995).
- [4] Yssorche, M.P., 'Étude de la perméabilité à l'air des BHP', DEA de Génie Civil, Université Paul Sabatier-INSA de Toulouse, France, (1991).
- [5] Wittmann, F.H., 'Surface tension shrinkage and strength of hardened cement paste', *Mater. Struct.* 1 (6) (1968) 547-552.
- [6] Paillère, A.M., Buil, M., Serrano, J.J. and De Larrard, F., 'Bétons à hautes performances par optimisation de l'emploi de fluidifiants et de fibres d'acier', Proceedings of a symposium AIPC 'Structures en béton de l'avenir', (Versailles, 1987).
- [7] Baroghel-Bouny, V., 'Caractérisations des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, analyses et interprétations"', Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, (1994), 468.
- [8] Patel, G., Killoh, D.C., Parrot, L.J. and Gutteridge, W.A., 'Influence of curing at different relative humidities upon compound reactions and porosity in Portland cement paste', *Mater. Struct.* 21 (123) (1988) 192-197.
- [9] Mejlhede Jensen, O. and Freiesleben Hansen, P.F., 'Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume-modified cement paste', *ACI Materials Journal* 93 (6) (1996).
- [10] Persson, B., 'Self-desiccation and its importance in concrete technology', *Mater. Struct.* 30 (198) (1997) 293-305.
- [11] Justness, H., Sellevold, E.J. and Lundevall, G., 'High Strength Concrete Binders. Part A: Reactivity and Composition of Cement Pastes with and without Condensed Silica Fume', Proceedings of an ACI/Canmet IVth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolan in Concrete, (Istanbul, May 1992).
- [12] Ollivier, J.P., 'A non destructive procedure to observe microcracks of concrete by scanning electron microscope', *Cement and Concrete Research* 15 (1985) 1055-1060.
- [13] Ringot, E., 'Automatic quantification of microcracks network by stereological method of total projection in mortars and concretes', *Ibid.* 18 (1988) 35-43.
- [14] Massat, M., 'Caractérisation de la microfissuration, de la perméabilité et de la diffusion d'un béton : application au stockage des déchets radioactifs', Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, France, 1991.
- [15] Yssorche, M.P., Bigas, J.P. and Ollivier, J.P., 'Mesure de la perméabilité à l'air des bétons au moyen d'un perméamètre à charge constante', *Mater. Struct.* 1 (1994) 547-552.
- [16] Massat, M., Ollivier, J.P. and Yssorche, M.P., 'Microcracking analysis of permeability specimens in high performance concrete', Proceedings of the 4th euroseminar on microscopy applied to building materials, (Visby, Suède, 1993).