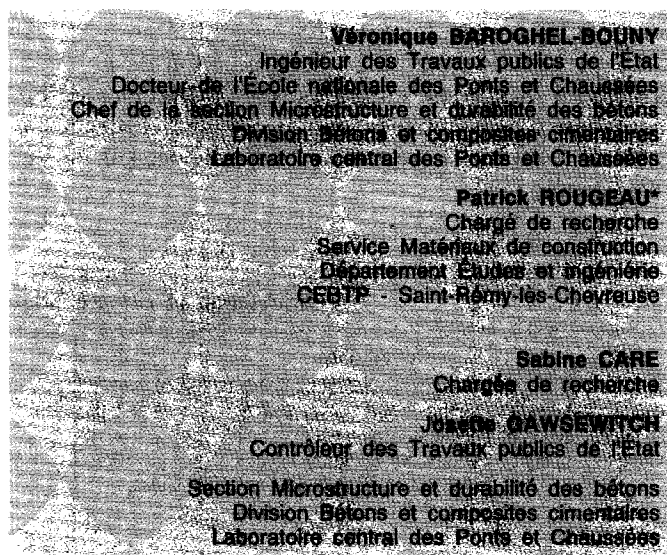


# Étude comparative de la durabilité des bétons B30 et B80 des ouvrages jumeaux de Bourges

## I - Microstructure, propriétés de durabilité et retrait



### RÉSUMÉ

L'étude présentée dans cet article s'inscrit dans le cadre du projet national « BHP 2000 », dont l'un des thèmes est la valorisation des bétons à hautes performances (BHP) et des bétons à très hautes performances (BTHP) sur le plan de la durabilité. Cette étude a pour objet de comparer la durabilité potentielle, évaluée à partir d'essais de laboratoire sur éprouvettes, des deux formulations - B30 (béton ordinaire) et B80 (BHP contenant des fumées de silice) - utilisées pour la construction des « ouvrages jumeaux » de Bourges.

L'analyse comparative, menée à partir d'une large panoplie de méthodes expérimentales, porte à la fois sur la microstructure, sur les propriétés relatives à la durabilité, ainsi que sur les retraits des matériaux.

Les résultats expérimentaux mettent en évidence la meilleure aptitude, en conditions de laboratoire, du BHP B80 à limiter les transferts gazeux ou liquides au sein du matériau, comparativement au béton ordinaire testé, malgré une plus forte tendance à la microfissuration. En outre, bien que le béton B80 ait un retrait endogène plus élevé, à long terme les deux matériaux ont un retrait total équivalent (à HR = 65 %).

**MOTS CLÉS :** 32 - Durabilité - Béton hydraulique - Porosité - Éprouvette - Béton hautes performances - Mesure - Retrait - Étanchéité (prop.) - Essai - Laboratoire - Micro - Structure (physicochim.) - Fissuration.

### Introduction

Dans le domaine du génie civil et du bâtiment, les années 1980 ont marqué une étape importante dans l'évolution du béton, matériau le plus universellement utilisé, avec l'avènement des bétons à hautes performances (BHP). Ces nouveaux matériaux offrent aux constructeurs des perspectives intéressantes, non seulement grâce à de meilleures caractéristiques mécaniques, mais également grâce à la durabilité accrue attendue.

Disposant désormais de moyens permettant d'évaluer les propriétés de durabilité de ces bétons en laboratoire (indicateurs de durabilité pertinents et modes opératoires reconnus) et d'un début de retour d'expérience sur ouvrages réels, bon nombre d'études et de recherches sont lancées à l'heure actuelle pour quantifier la durabilité des BHP.

C'est le cas de l'étude présentée dans cet article, qui s'inscrit dans le cadre du projet national « BHP 2000 », dont l'un des thèmes est la valorisation des BHP et des BTHP sur le plan de la durabilité.

\* Actuellement, Chef du département Matériaux, Division Produits ouvrages au CERIB, Épernon.

Cette étude a pour objet de comparer la durabilité potentielle, évaluée à partir d'essais de laboratoire sur éprouvettes, des deux formulations - B30 (béton ordinaire) et B80 (BHP contenant des fumées de silice) - utilisées pour la construction de deux ponts identiques (les « ouvrages jumeaux ») sur un même site à Bourges. La seconde phase de ce travail consistera à assurer le suivi à long terme des ouvrages sur site, à partir de prélèvements et de mesures non destructives.

L'analyse comparative décrite ici, menée à partir d'une large panoplie de méthodes expérimentales, porte à la fois sur la microstructure des matériaux (porosité, microfissuration, etc.), sur des propriétés relatives à la durabilité (perméabilité, etc.), ainsi que sur les retraits. La détermination de la diffusivité des ions chlorures par différentes méthodes expérimentales, qui complète cette étude de durabilité, est quant à elle décrite dans un autre article [1].

## Matériaux

La formulation et les caractéristiques du béton ordinaire B30 et du BHP B80 étudiés sont données dans les tableaux I et II, respectivement. Les bétons ont été fabriqués en centrale de béton prêt à l'emploi et les éprouvettes ont été confectionnées sur chantier lors du coulage de certaines parties des ouvrages. Après démoulage (à l'âge de 24 h), les éprouvettes ont été transportées dans les laboratoires d'essai en les protégeant dans des enveloppes en plastique pour éviter toute dessiccation. Elles ont ensuite été immergées dans de l'eau à  $T = 20 \pm 0,5$  °C jusqu'aux échéances prévues pour le lancement des essais (à l'âge de 28 ou 90 j), sauf dans le cas des éprouvettes destinées aux mesures de retrait, ces dernières débutant à l'âge de 24 h. Les éprouvettes destinées aux mesures de retrait endogène ont été préalablement enveloppées dans deux feuilles superposées de papier aluminium adhésif.

TABLEAU I  
Formulation et caractéristiques du béton B30

Constituant	Quantité
Sable reconstitué du Cher, carrière de Preuilly 0/4	750 kg.m <sup>-3</sup>
Gravillon calcaire, carrière du Subdray 4/10	400 kg.m <sup>-3</sup>
Gravillon calcaire, carrière du Subdray 10/20	599 kg.m <sup>-3</sup>
Ciment CPJ-CEM II/A-L 52,5 CP2 de Beffes* (CALCIA)	400 kg.m <sup>-3</sup>
Eau	172 l.m <sup>-3</sup>
<b>E/C = 0,43</b>	
Affaissement au cône d'Abrams : 6 cm	
$f_{c7} = 33,8$ MPa $f_{c28} = 39,0$ MPa $f_{c91} = 43,6$ MPa	$d_7 = 2,34$ $d_{28} = 2,34$ $d_{91} = 2,34$
(*) Ce ciment contient 8 % de filler calcaire et $C_3S = 60,7$ %, $C_2S = 13,6$ %, $C_3A = 10,1$ %, $C_4AF = 9,0$ %.	

TABLEAU II  
Formulation et caractéristiques du béton B80

Constituant	Quantité
Sable reconstitué du Cher, carrière de Preuilly 0/4	670 kg.m <sup>-3</sup>
Gravillon calcaire, carrière du Subdray 4/10	400 kg.m <sup>-3</sup>
Gravillon calcaire, carrière du Subdray 10/20	672 kg.m <sup>-3</sup>
Ciment CPJ-CEM II/A-D 52,5R PM d'Airvault* (CALCIA)	490 kg.m <sup>-3</sup>
Eau	170 l.m <sup>-3</sup>
Superplastifiant (CHRYSO SUPERPLAST THP) : 2,4 %	11,76 l.m <sup>-3</sup>
Retardateur de prise (CHRYSO CERITARD) : 0,7	3,43 l.m <sup>-3</sup>
<b>E/C = 0,35</b>	
Affaissement au cône d'Abrams : 15 cm	
$f_{c24h} = 39,6$ MPa $f_{c7} = 62,8$ MPa $f_{c28} = 84,0$ MPa $f_{c91} = 91,6$ MPa	$d_{24h} = 2,36$ $d_7 = 2,38$ $d_{28} = 2,39$ $d_{91} = 2,39$
(*) Ce ciment contient 7 % de fumée de silice et $C_3S = 63,2$ %, $C_2S = 13,6$ %, $C_3A = 7,6$ %, $C_4AF = 9,8$ %.	

## Microstructure des matériaux

### Procédures expérimentales

#### Analyse qualitative au microscope électronique à balayage

La microstructure des bétons B30 et B80 a été analysée de façon qualitative par microscopie électronique à balayage associée à une micro-sonde EDAX. Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont été effectuées sur fractures fraîches par électrons secondaires, ainsi que sur sections polies par électrons rétrodiffusés (ERD). À l'âge de 28 ou 90 j, les échantillons de matériau, prélevés au cœur d'éprouvettes  $\varnothing 16 \times 32$  cm, ont été étuvés sous vide à  $T \approx 45^\circ\text{C}$  en présence de gel de silice pendant 14 j. Dans le cas de l'analyse par ERD, les échantillons ont également été imprégnés de résine puis polis.

#### Quantification de la microfissuration

Pour chaque béton et chaque échéance, la quantification de la microfissuration a été réalisée au stéréomicroscope par comptages linéaires, sur deux sections ( $10 \times 10$  cm) de béton imprégnées d'un colorant rouge permettant de faire apparaître les discontinuités du matériau. La surface à examiner est couverte par un réseau de droites équidistantes de 0,5 cm, pour une longueur totale d'examen de 10 cm. À partir d'une observation visuelle au grossissement 100 sur les droites, les différents phénomènes interceptés sont comptabilisés. Cette analyse permet ainsi de déterminer les fréquences linéiques d'interception (en  $\text{cm}^{-1}$ ) des microfissures présentes dans la pâte ( $F_p$ ) ou au niveau des interfaces pâte-granulat ( $F_i$ ) ; des discontinuités d'interfaces pâte-granulat ( $D_i$ ) ; ainsi que des zones microporeuses de la pâte ( $Zm_p$ ) ou des zones interfaciales ( $Zm_i$ ).

#### Porosimétrie

Des mesures par intrusion de mercure ont été effectuées pour caractériser la structure poreuse des matériaux. Des mesures de porosité à l'eau ont également été réalisées par pesée hydrostatique, suivant le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM [2].

Les échantillons destinés aux mesures par intrusion de mercure (masse  $\approx 20$  g) ont été préparés à partir de tranches  $\varnothing 16 \times 1$  cm sciées dans des cylindres  $\varnothing 16 \times 32$  cm. Pour chaque matériau et chaque échéance, trois échantillons ont été testés. Avant la mesure proprement dite, ces échantillons ont tout d'abord été séchés selon la même procédure que pour l'analyse au MEB, afin que l'ensemble du réseau poreux soit accessible au mercure. La mesure a été réalisée avec un porosimètre à mer-

cure Carlo Erba (Porosimeter 2000 WS) où  $P_{\text{max}} = 200$  MPa. Les pores, tels que  $37 \text{ \AA} < r_p < 60 \mu\text{m}$ , sont accessibles avec cet appareil.

### Résultats et Analyse

#### État d'hydratation

À en juger par les images obtenues au MEB sur sections polies par ERD (grossissement = 200) à 90 j, la pâte de ciment durcie du béton B80 (fig. 1 et 2) contient une grande quantité de grains de ciment anhydres résiduels (zones très claires, presque blanches). Ces grains anhydres apparaissent en plus grande quantité dans le béton B80 que dans le béton B30 (fig. 3 et 4).

Dans le B30, on peut distinguer des grains de  $\text{C}_3\text{S}$  (gros grains anguleux) en cours d'hydratation : des auréoles de gel C-S-H (zones grises de C-S-H « pseudomorphiques » ou « topochimiques ») suivent le contour du cœur non hydraté de ces  $\text{C}_3\text{S}$ . Ceci illustre une hydratation qui progresse vers l'intérieur des grains initiaux de  $\text{C}_3\text{S}$  (hydrates internes). Dans le B80, les couronnes d'hydrates bordant les nombreux cœurs anhydres sont particulièrement fines et difficilement visibles.

Ces observations indiquent un état d'hydratation plus faible dans le B80 comparativement au B30, à 90 j. Le B80 est particulièrement peu hydraté malgré son âge. De plus, si l'évolution, entre 28 et 90 j, de l'état d'hydratation du matériau apparaît de façon notable pour le B30, celle-ci est moins perceptible pour le B80. Ceci confirme le ralentissement précoce des réactions d'hydratation du ciment dans le béton B80, résultat du faible rapport E/C initial de sa formulation.

Cependant, ce faible taux d'hydratation ne nuit en rien aux propriétés des BHP, mais peut au contraire apparaître positif [3]. En effet, dans une pâte à très faible rapport E/C, d'une part l'épaisseur de la couche de C-S-H est faible, assurant ainsi un meilleur « collage », et est constituée de C-S-H très denses (meilleures caractéristiques mécaniques) et, d'autre part, les anhydres  $\text{C}_3\text{S}$ , grâce à leur résistance mécanique intrinsèque, jouent le rôle de granulats idéaux, vu que la transition continue entre les  $\text{C}_3\text{S}$  et les C-S-H n'introduit pas de zone interfaciale aux caractéristiques plus faibles.

#### Aspect général de la microstructure

La microstructure de la pâte de ciment durcie du béton B30 apparaît plus complexe que celle du B80. On visualise en effet au MEB dans le B30 de nombreux hydrates avec des morphologies très diverses : aiguilles d'ettringite, cristaux de monosulfates, nombreuses plaquettes de portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sous forme d'amas, morphologies de C-S-H fibreuses ou denses (cf. fig. 5 et 7, à 28 jours).

Images obtenues au microscope électronique à balayage par électrons rétrodiffusés  
(grossissement = 200)  
sur la section polie d'échantillons de bétons âgés de 90 jours

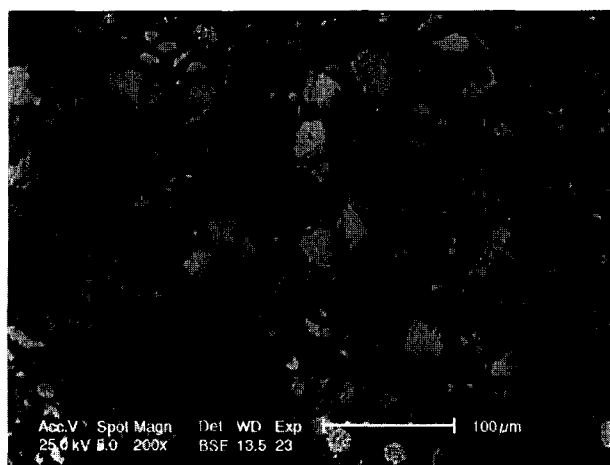


Fig. 1 - Béton B80.

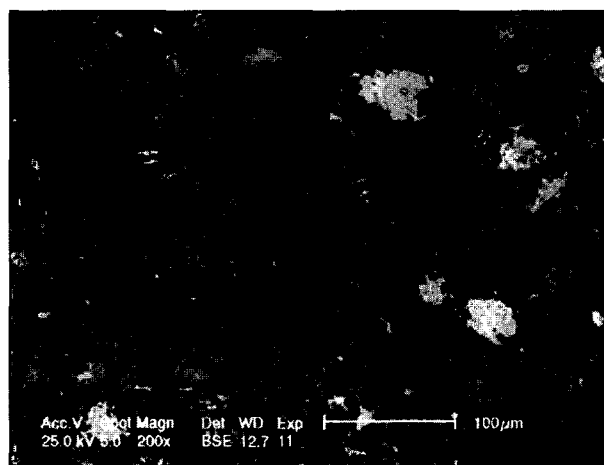


Fig. 3. Béton B30.

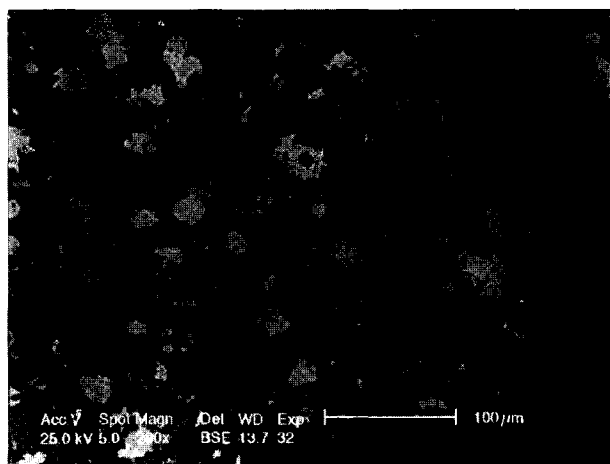


Fig. 2 - Béton B80.

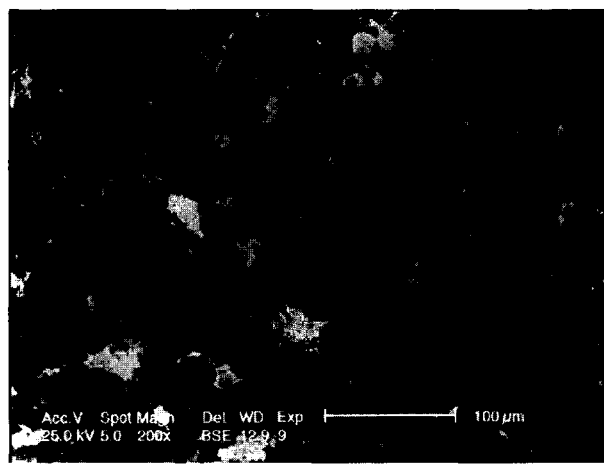


Fig. 4. Béton B30.

Images obtenues au microscope électronique à balayage par électrons secondaires  
(grossissement = 773)  
sur la fracture d'échantillons de bétons âgés de 28 jours

Vue générale de la pâte.

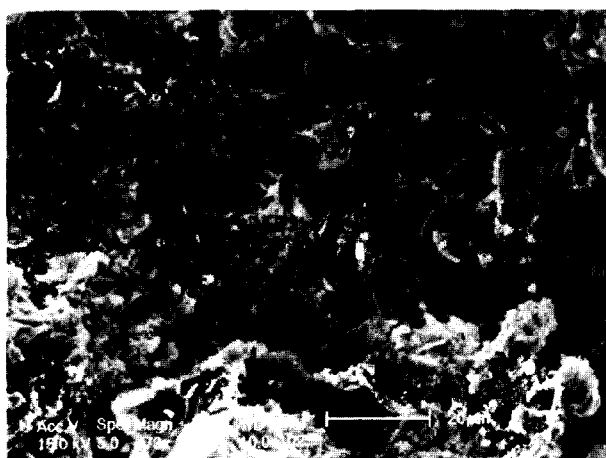


Fig. 5 - Béton B30.

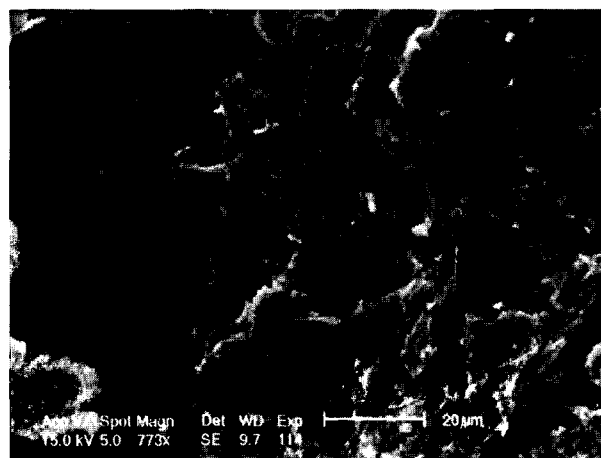


Fig. 6. Béton B80.

Interface pâte-granulat siliceux  
(1. Pâte de ciment - 2. Granulat siliceux).

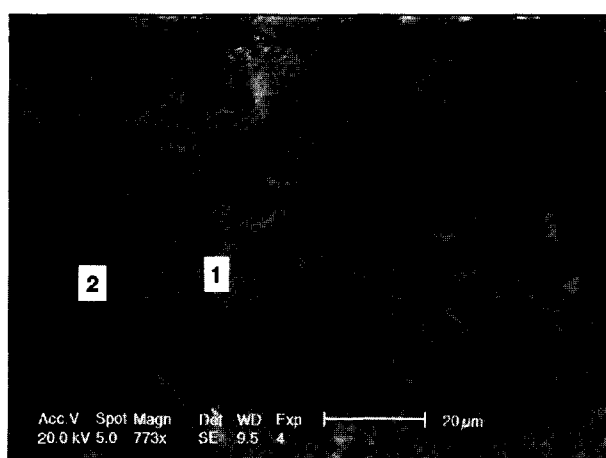


Fig. 7 - Béton B30.

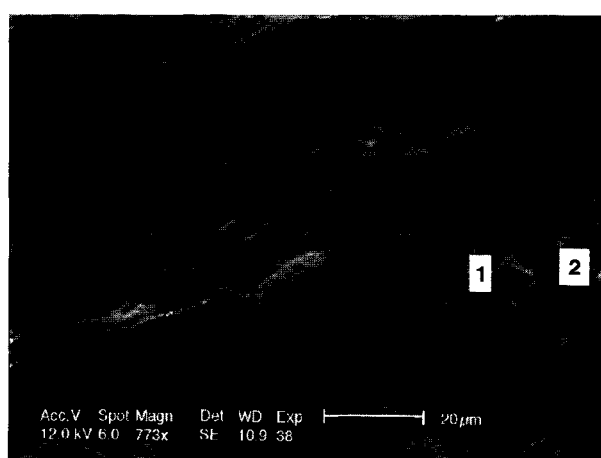


Fig. 8. Béton B80.

La microstructure de la pâte de ciment durcie du BHP semble particulièrement homogène (cf. fig. 6 et 8, à 28 j). Ainsi, la pâte présente dans le B80 apparaît au microscope essentiellement comme une matrice de C-S-H contenant des inclusions d'anhydres ( $C_3S$ ). Le béton B80 contient de faibles quantités de portlandite  $Ca(OH)_2$  résiduelle. En effet, une part importante de la portlandite formée par hydratation du ciment a réagi avec la fumée de silice pour former des C-S-H supplémentaires par réaction pouzzolanique. De plus, la portlandite résiduelle se présente de façon plus dispersée dans la pâte et sous la forme de cristaux plus petits bien imbriqués dans la masse des C-S-H. Ces caractéristiques sont systématiques dans ce type de matériaux [4]. Ceci contribue à limiter la porosité. Le plus faible rapport E/C et la présence de fumée de silice dans le B80 entraînent, en effet, moins d'eau et d'espace disponibles pour la cristallisation des hydrates.

Dans le béton B80, on observe la même texture et les mêmes faciès dans la masse de la pâte que dans une zone proche d'un granulat (cf. fig. 6 et 8). On ne trouve de cristaux d'ettringite que dans les bulles d'air. La microstructure présente beaucoup plus de zones de C-S-H denses.

Les images font apparaître qualitativement plus de porosité dans le B30 que dans le B80 (cf. également les valeurs de  $Zm_p + Zm_i$  dans le tableau III). Cette porosité apparaît sous la forme de zones noires au MEB et de zones colorées en rouge au stéréomicroscope, dans la masse des C-S-H, au niveau des cristaux de portlandite ou autour des granulats.

Tout ceci confère au B80 un aspect très dense, plus compact, plus homogène et plus faiblement poreux que le B30. Ces spécificités des BHP avaient d'ores et déjà été mises en évidence par Moranville-Regourd [5]. Des zones localisées de plus grande hétérogénéité sont toutefois présentes dans ce B80. En particulier, quelques zones de macroporosité (vides et bulles d'air) apparaissent quasi systématiques. Cette macroporosité est toutefois faiblement connectée au reste du réseau poreux qui est beaucoup plus fin, comme le montreront les résultats de porosimétrie et la mesure des propriétés de durabilité. Ces défauts résultent probablement des difficultés

d'homogénéisation lors de la mise en œuvre du béton et de la fabrication des éprouvettes.

Pour les deux bétons, les observations faites à 28 ou à 90 j ne font pas apparaître de différence notable, si ce n'est que la microstructure de la pâte semble plus dense à 90 j qu'à 28 jours.

#### **Microfissuration et caractéristiques de l'interface pâte-granulat**

Les résultats de l'analyse quantitative de la microfissuration des bétons au stéréomicroscope sont donnés dans le tableau III (moyenne des deux échantillons testés).

À 28 j, le béton B30 est très légèrement fissuré. Les microfissures sont de taille moyenne mais rarement interconnectées. Cependant, elles prolongent souvent les discontinuités d'interface. Après une cure de 90 j, on note de nombreuses discontinuités d'interface et des zones microporeuses de faible étendue dans la microstructure du B30 (fig. 9). Il n'y a pas d'évolution significative de la fissuration de ce béton entre les deux échéances considérées.

Après 28 j de cure, le béton B80 ne présente quasiment pas de fissures. En effet, les microfissures observées sont peu nombreuses, la plupart sont très courtes, et elles sont très souvent liées aux interfaces pâte-granulat.

À 90 j, le béton B80 est très nettement microfissuré (fig. 10). Il s'agit dans ce cas de microfissures courtes et très fines, reliant rarement plusieurs granulats, et non connectées entre elles. La répartition des microfissures dans la pâte paraît aléatoire. Cette microfissuration résulte probablement de l'important retrait d'autodessiccation des BHP [6]. Les conséquences de cette autodessiccation ont pu être amplifiées par la conservation préalable dans l'eau des éprouvettes. En effet, les pertes relatives de masse enregistrées au cours du prétraitement des échantillons destinés aux observations au MEB ou aux mesures par intrusion de mercure sont plus importantes à 90 j qu'à 28 j (cf. fig. 13). Ceci signifie que les éprouvettes ont absorbé de l'eau pendant la cure. De ce fait, un gradient de teneur en eau est apparu, et donc de contraintes, dans l'épaisseur des éprouvettes.

TABLEAU III  
Quantification de la microfissuration des bétons B30 et B80

Matériau	Âge (j)	$F_p + F_i$ ( $cm^{-1}$ )	$D_i$ ( $cm^{-1}$ )	$Zm_p + Zm_i$ ( $cm^{-1}$ )
B30	28	0,25	0,81	0,30
	90	0,10	0,97	0,17
B80	28	0,03	0,18	0,06
	90	2,09	0,27	0,09

Images obtenues au stéréomicroscope (grossissement = 32)  
et par imprégnation d'un colorant rouge sur la surface polie d'échantillons de bétons âgés de 90 jours

Zone interfaciale microporeuse autour d'un grain de sable.

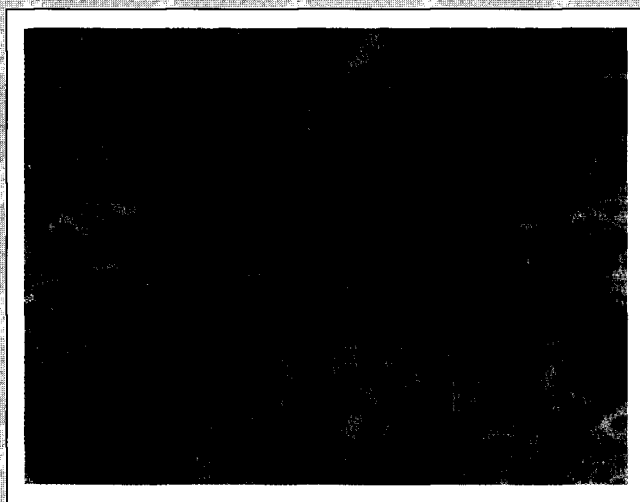


Fig. 9 - Béton B30.

Microfissures reliant des granulats voisins.

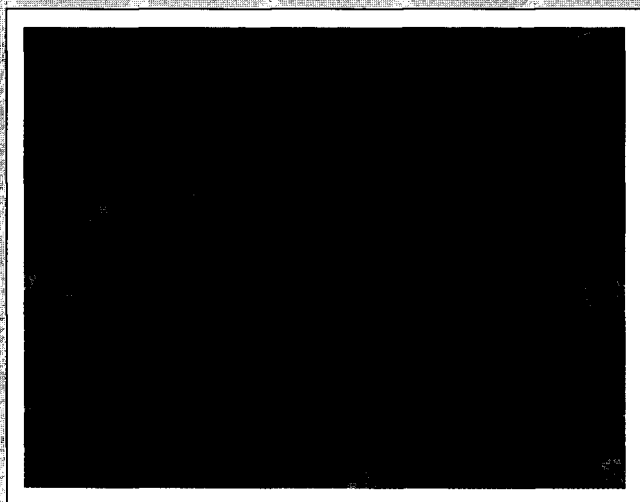


Fig. 10 - Béton B80.

Images obtenues au microscope électronique à balayage par électrons rétrodiffusés  
sur la section polie d'un échantillon de béton B80 âgé de 90 jours

Fissure pénétrant dans un granulat siliceux (sable)  
et traversant un granulat calcaire (sable).  
Les microfissures joignent des granulats voisins.

Microfissures dans la pâte et dans les granulats.

1. Pâte de ciment - 2. Granulat siliceux - 3. Granulat calcaire.

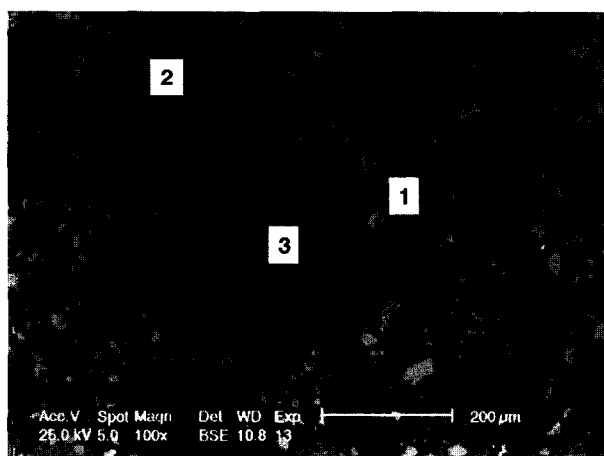


Fig. 11 - Grossissement = 100.

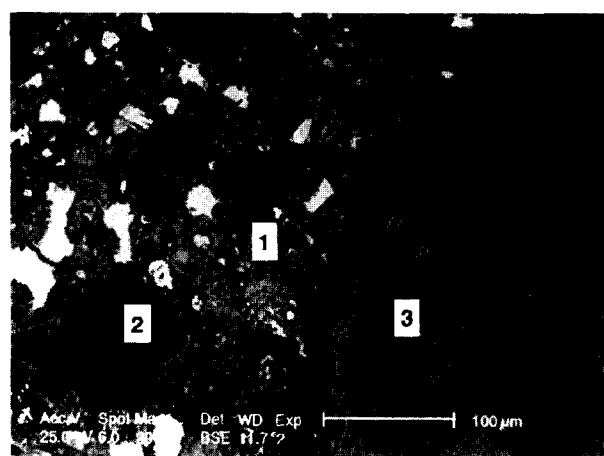


Fig. 12 - Grossissement = 200.

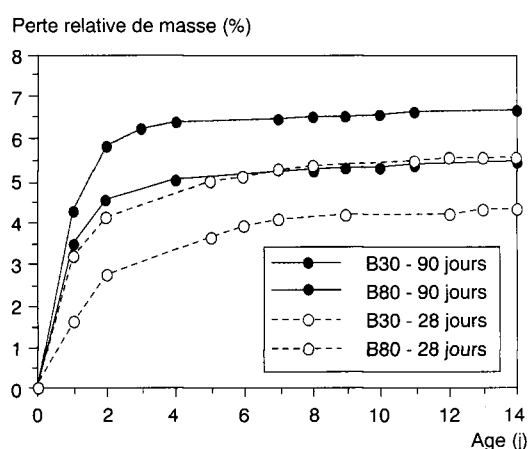


Fig. 13 - Perte relative de masse des échantillons au cours du prétraitement (séchage sous vide à  $T \approx 45^\circ\text{C}$  en présence de gel de silice).

Peu de différences sont notées en ce qui concerne les discontinuités d'interface pâte-granulat du B80, plus nombreuses à l'échéance de 90 j qu'à 28 jours.

Dans le cas du béton B30, à 28 et 90 j, les discontinuités d'interface sont nombreuses, faisant apparaître une liaison pâte-granulat plutôt moyenne. La liaison apparaît meilleure pour le BHP, pour lequel l'interface pâte-granulat n'apparaît pas comme une zone de faiblesse. Dans le cas du béton B80, on met en effet en évidence des ruptures transgranulaires : des fissures, perpendiculaires à l'interface, pénètrent ou traversent des granulats, en restant perpendiculaires à l'interface (fig. 11 et 12). De même, les fissures parallèles à l'interface ne sont pas localisées exactement à l'interface, mais dans le granulat, à quelques micromètres ou dizaines de micromètres de l'interface (fig. 12).

Les observations faites sur sections polies par ERD permettent de comparer le schéma de microfissuration des deux bétons après un prétraitement donné. En effet, on constate que le motif du réseau de microfissuration est identique pour les deux bétons (faïençage typique de dessiccation), mais que les mailles du réseau sont beaucoup plus

resserrées et l'ouverture des microfissures est beaucoup plus petite dans le cas du B30. La microfissuration est particulièrement visible à 90 j. Cette microfissuration a probablement été provoquée par le séchage sous vide préalable à l'observation microscopique. Cet état de fissuration n'est donc qu'un artefact et ne correspond en aucun cas à une situation que l'on obtiendrait sur ouvrage avec ces matériaux. Cependant, on met ici nettement en évidence, de manière comparative vu que le prétraitement subi est identique pour les deux bétons, un comportement différent, fonction de la formulation, vis-à-vis de la dessiccation et de la microfissuration qui s'ensuit (densité et ouverture des fissures).

### Porosimétrie

Les résultats de porosimétrie obtenus avec les bétons B30 et B80 sont présentés dans le tableau IV (moyenne des trois échantillons testés) et sur les figures 14 et 15.

On note une nette différence entre la porosité totale (volumique) mesurée par intrusion de mercure sur le béton B30 et sur le B80 (cf. tableau IV). La porosité du B80 est plus faible ( $\approx 7,5\%$ ) que celle du B30 ( $\approx 11\%$ ). Ceci est corroboré par la densité apparente plus élevée du B80 par rapport au B30. Pour un matériau et pour une échéance donnés, les valeurs de densité apparente mesurées par intrusion de mercure sont toutefois plus faibles que celles mesurées lors des essais de conformance des bétons (cf. tableaux I et II). Ceci correspond au fait que les échantillons destinés aux mesures par intrusion de mercure contiennent une plus faible proportion de granulats de grandes dimensions par rapport à une éprouvette de béton de grand volume, représentative de la formulation réelle.

Si l'on compare les valeurs de porosité mesurées par intrusion de mercure avec celles de porosité à l'eau, on s'aperçoit que ces dernières sont systématiquement plus élevées. Il y a, pour l'ensemble des bétons et des échéances, un rapport d'environ 0,6 entre les valeurs. Ceci est tout à fait classique pour ces types de béton (et est, en particulier, cohérent avec [7]) et résulte du fait que seuls les pores tels que  $37 \text{ \AA} < r_p < 60 \text{ \mu m}$  sont accessibles par intrusion de mercure.

TABLEAU IV  
Résultats de porosimétrie au mercure et de porosité à l'eau

Matériau	Âge (j)	Densité app. ( $\text{g. cm}^{-3}$ )	Volume cumulé ( $\text{mm.g}^{-1}$ )	$r_p$ moyen ( $\text{\AA}$ )	Porosité (Hg) (%)	Porosité ( $\text{H}_2\text{O}$ ) (%)
B30	28	2,28	46,9	560	10,7	16,3
	90	2,22	51,0	470	11,3	17,1
B80	28	2,33	32,5	270	7,6	14,1
	90	2,29	31,8	120	7,3	11,8



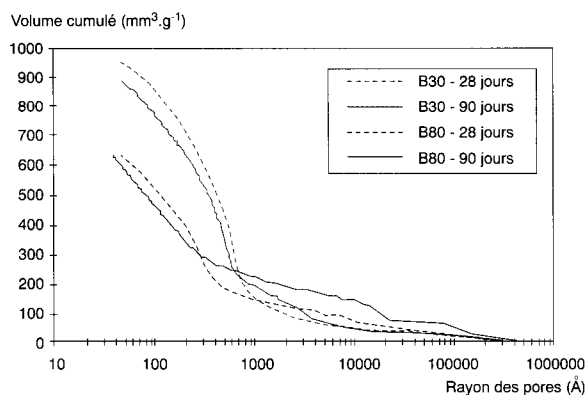


Fig. 14 - Courbes de volume cumulé en fonction du rayon des pores, obtenues par intrusion de mercure.

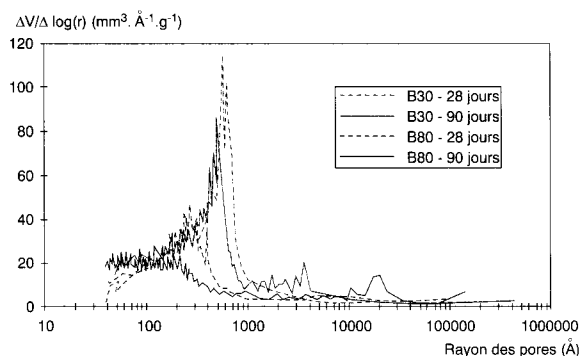


Fig. 15 - Distribution des tailles de pores, obtenues par intrusion de mercure.

Le calcul du rayon moyen des pores (cf. tableau IV), ou de manière plus détaillée, les distributions des tailles de pores (cf. fig. 15) mettent en évidence un réseau poreux plus fin dans le cas du B80, par rapport au B30. En effet, le mode poreux principal (pic) du B80 est situé dans une gamme de rayons de pores plus petits.

Sur ces résultats, l'évolution de chaque matériau entre 28 et 90 j est clairement mise en évidence : le rayon poreux moyen devient plus faible et le mode poreux principal se décale légèrement dans une gamme de rayons de pores plus petits. Ainsi, entre ces deux échéances, le réseau poreux s'est affiné et la microstructure s'est donc densifiée, grâce à la poursuite de l'hydratation du ciment pendant la conservation dans l'eau.

On remarque également, entre ces deux échéances, une diminution de l'amplitude du mode poreux principal et une diminution du volume cumulé dans la zone des faibles rayons de pores (cf. fig. 14 et 15). Ceci indique une diminution de la porosité dans cette gamme de tailles de pores, résultant de la formation d'hydrates qui viennent remplir les vides initiaux. Cependant, l'effet de la diminution de cette porosité est contrebalancé, vis-à-vis de la porosité totale, par les vides de taille plus grande ( $r_p \approx 0,3 \mu\text{m}$  pour le B30 et  $r_p \approx 2 \mu\text{m}$  pour le

B80) qui apparaissent sur la distribution à 90 j. On ne note, en effet, pas d'évolution significative, entre 28 et 90 j, de la porosité totale. La macroporosité qui apparaît pourrait correspondre à la microfissuration visible par microscopie et due notamment à l'autodessiccation. Le fait que l'on mesure un rayon caractéristique plus grand avec le B80 qu'avec le B30 pour cette macroporosité est alors cohérent avec les images obtenues au MEB par ERD, qui font apparaître une ouverture des microfissures plus importante pour le B80 que pour le B30 après un séchage des matériaux.

À la vue de l'ensemble de ces résultats relatifs à la microstructure, le béton B80 apparaît donc globalement moins poreux, plus dense et ayant un réseau poreux plus fin que le B30. Ces propriétés résultent essentiellement du plus faible rapport E/C et de la teneur optimisée en fumées de silice de la formulation du BHP. On peut s'attendre à ce que ces caractéristiques aient un effet positif notable sur les propriétés de durabilité du BHP. Toutefois, il est également nécessaire de vérifier que la plus forte tendance à la microfissuration du béton B80, enregistrée notamment à 90 j, n'altère pas ces propriétés.

## Propriétés de durabilité

### Détermination de la perméabilité

#### Mesure

Pour chaque béton et à chaque échéance, les mesures de perméabilité ont été réalisées sur trois tranches  $\varnothing 15 \times 5 \text{ cm}$  avec un perméamètre à charge constante (recommandé par CEMBUREAU). Le gaz utilisé pour la mesure est l'oxygène.

La perméabilité d'une éprouvette de béton dépend de la structure poreuse du matériau et également de la répartition de sa teneur en eau : la perméabilité augmente quand le taux de saturation moyen de l'éprouvette diminue. Pour déterminer la perméabilité (en mètre carré) d'un béton, il est donc nécessaire, d'une part, de sécher, au moins partiellement, l'éprouvette destinée à la mesure afin que le gaz puisse percoler à travers cette éprouvette et, d'autre part, de connaître le taux de saturation moyen (ou mieux, la répartition de la teneur en eau) de l'éprouvette au moment de la mesure.

Les éprouvettes destinées aux mesures de perméabilité ont été ici préconditionnées de la façon suivante : séchage en étuve ventilée à  $T \approx 80^\circ\text{C}$  pendant 7 j, suivi d'un séchage en étuve ventilée à  $T \approx 105^\circ\text{C}$  jusqu'à stabilisation de la masse (pesée à la précision de 0,01 g) à 0,05 % près.

## Résultats

Les résultats des mesures de perméabilité sont présentés dans le tableau V, en fonction du taux de saturation moyen de l'éprouvette obtenu à chaque étape indiquée du préconditionnement.

Il y a peu de différence entre les résultats obtenus à 28 et à 90 j pour chacun des bétons B30 et B80. On notera, toutefois, que la perméabilité est légèrement plus faible à 90 j qu'à 28 j, mettant en évidence la densification des matériaux.

Au cours du séchage à  $T \approx 80^\circ\text{C}$ , la perméabilité du béton B80 est inférieure à celle du B30 d'environ une puissance de 10. Par conséquent, lorsque le séchage reste modéré, si des microfissures étaient présentes avant le préconditionnement, notamment à 90 j, ou apparaissent au cours du processus de séchage, celles-ci n'altèrent toutefois pas les propriétés de durabilité du béton B80.

En revanche, le séchage à  $T \approx 105^\circ\text{C}$  engendre une importante augmentation de la perméabilité, notamment dans le cas du BHP, et amenuise les différences entre les deux bétons. Ceci est peut-être le résultat d'une microfissuration importante qui apparaît dans le B80 à la suite de ce séchage plus poussé.

## Détermination du coefficient de capillarité

### Procédure expérimentale

Le coefficient de capillarité des matériaux est déterminé à partir d'un essai d'imbibition par une face (ou absorption capillaire) sur des éprouvettes ( $\varnothing 16 \times 6$  cm) préalablement séchées (étuvage à  $T \approx 80^\circ\text{C}$ ) à l'issue de la cure (28 ou 90 j dans l'eau). Pour chaque matériau et chaque échéance, trois éprouvettes sont testées à  $T = 20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ .

Le coefficient de capillarité est défini par l'expression  $C = 100.M/(S.\sqrt{t})$ , où  $M$  est la masse totale d'eau absorbée depuis le début de l'imbibition,  $t$  est le temps écoulé et  $S$  est la section de l'éprouvette. Ce coefficient est calculé sur la première portion linéaire de la courbe donnant  $100.M/S$  en fonction de  $\sqrt{t}$ .

## Résultats

Les coefficients de capillarité (valeurs moyennes) obtenus pour les bétons B30 et B80 sont récapitulés dans le tableau V.

Les résultats montrent qu'à une échéance donnée le coefficient de capillarité du béton B80 est plus faible que celui du B30, illustrant non seulement une plus faible aptitude au transfert, mais également une capacité de stockage limitée pour le BHP, résultat de sa structure poreuse plus fine.

La densification des matériaux entre 28 et 90 j est là encore mise en évidence par la diminution du coefficient de capillarité entre ces deux échéances.

## Caractérisation vis-à-vis de la carbonatation

### Mesure

La caractérisation des bétons vis-à-vis de la carbonatation a été effectuée, à l'issue de la cure de 28 j, à partir d'un essai accéléré dans une enceinte ayant une teneur en  $\text{CO}_2$  de  $70 \pm 5\%$ , à  $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$  et à  $\text{HR} = 65 \pm 5\%$ .

Préalablement à l'essai de carbonatation, les éprouvettes (portions de  $\varnothing 16 \times 32$  cm) ont été conditionnées de la manière suivante : séchage en étuve ventilée à  $T \approx 40^\circ\text{C}$  pendant 3 j, puis exposition à  $\text{HR} = 65 \pm 5\%$  et à  $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$  pendant 3 jours.

TABLEAU V  
Résultats des mesures de perméabilité et d'absorption capillaire

Matériau	Âge (j)	Préconditionnement*	Taux de saturation moyen (%)	Perméabilité ( $10^{-18} \text{ m}^2$ )	Coefficient de capillarité
B30	28	3 j à $T = 80^\circ\text{C}$ 7 j à $T = 80^\circ\text{C}$ $T = 105^\circ\text{C}$	43 20 < 0,1	34 95 270	2,01
	90	3 j à $T = 80^\circ\text{C}$ 7 j à $T = 80^\circ\text{C}$ $T = 105^\circ\text{C}$	38 34 < 0,1	34 77 220	1,70
B80	28	3 j à $T = 80^\circ\text{C}$ 7 j à $T = 80^\circ\text{C}$ $T = 105^\circ\text{C}$	64 52 < 0,1	3,8 15 240	1,12
	90	3 j à $T = 80^\circ\text{C}$ 7 j à $T = 80^\circ\text{C}$ $T = 105^\circ\text{C}$	65 57 < 0,1	0,75 11 210	0,95

(\*) Séchage préalable à la mesure de perméabilité.

La profondeur moyenne carbonatée des bétons en fonction du temps d'exposition au CO<sub>2</sub> (jusqu'à 90 j) a été mesurée par pulvérisation d'une solution de phénolphthaléine sur des fractures fraîches des éprouvettes.

### Résultats

Les résultats des mesures de carbonatation sont présentés dans le tableau VI (valeurs moyennes).

Les résultats indiquent que le pH du béton B80 reste supérieur à 9 pendant toute la durée de l'essai, alors que le B30 se carbonate progressivement au cours du temps.

Cependant, on connaît mal, à l'heure actuelle, la part respective de chacune des deux composantes suivantes :

- difficile pénétration du CO<sub>2</sub> dans le BHP (réseau poreux très fin et occupé probablement à plus de 65 % par la phase liquide au cours de cet essai, cf. tableau V),
- très faible teneur en Ca(OH)<sub>2</sub> résiduelle du BHP, résultat de la réaction pouzzolanique avec la fumée de silice, se présentant sous la forme de fins cristaux très disséminés dans la microstructure [4]. Dans ces conditions, la carbonatation ne peut que rester limitée et est très difficilement quantifiable par phénolphthaléine.

## Retrait total et endogène

### Mesure

La mesure est réalisée à  $T = 20 \pm 1$  °C sur des éprouvettes de dimensions  $7 \times 7 \times 28$  cm jusqu'à l'âge de 180 j. La mesure de référence est prise à l'âge d'un jour. Les déformations sont mesurées à l'aide d'un rétractomètre (précision  $10 \mu\text{m.m}^{-1}$ ). La masse des éprouvettes est également suivie (précision 0,1 g).

La mesure de retrait total est effectuée sur trois éprouvettes par formulation à  $HR = 65 \pm 5$  %.

TABLEAU VI  
Évolution de la profondeur moyenne carbonatée des bétons B30 et B80 âgés de 28 j lors de l'exposition au CO<sub>2</sub>

Durée de l'exposition au CO <sub>2</sub> (j)	B30	B80
	Profondeur moyenne carbonatée (mm)	
0	0	0
3	1,3	0
7	3,3	0
14	4,7	0
28	8,7	0
56	10,3	0
90	13	0

La mesure de retrait endogène est également réalisée sur trois éprouvettes par formulation, ces éprouvettes étant recouvertes de deux feuilles superposées de papier aluminium adhésif pour les préserver de tout échange hydrique avec le milieu environnant (salle de laboratoire à  $HR = 65 \pm 5$  %). L'efficacité de cette protection est reconnue [8], mais a tout de même été vérifiée par le calcul des pertes relatives de masse des éprouvettes tout au long de l'essai.

### Résultats

Les déformations mesurées (valeurs moyennes) sont reportées dans le tableau VII et la figure 16.

Le retrait total tel qu'il est mesuré ici représente la déformation libre potentielle de retrait que l'on obtiendrait dans des conditions proches de celles existant *in situ*. Cette mesure apparaît donc comme un bon indicateur du comportement du matériau en conditions réelles, notamment dans un objectif de comparaison entre différentes formulations.

TABLEAU VII  
Résultats de retrait endogène et total (à  $HR = 65 \pm 5$  %)

Age (j)	B30		B80	
	Retrait endogène (10 <sup>-6</sup> )	Retrait total (10 <sup>-6</sup> )	Retrait endogène (10 <sup>-6</sup> )	Retrait total (10 <sup>-6</sup> )
7	80	187	80	297
28	100	380	120	457
90	105	513	137	517
180	105	533	137	530

Déformations de retrait (10<sup>-6</sup>)

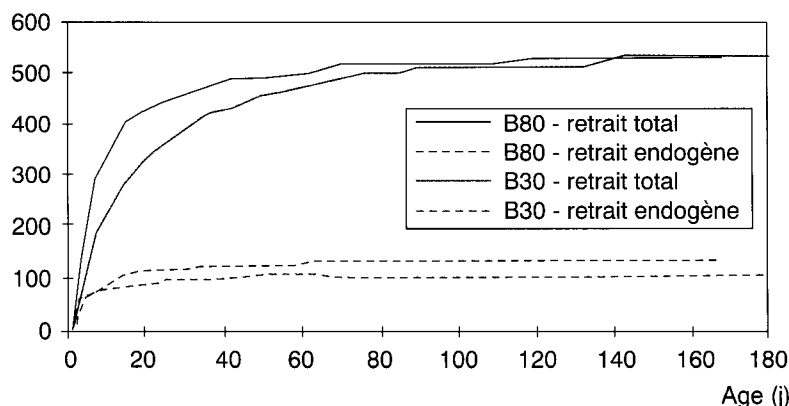


Fig. 16 - Déformations de retrait endogène et total (à  $HR = 65 \pm 5$  %) à  $T = 20 \pm 1$  °C.

Les valeurs de retrait total à 180 j pour B80 et B30 sont quasiment identiques. Les plus fortes valeurs de retrait endogène en fonction du temps, obtenues pour le B80, n'entraînent un retrait total supérieur à celui du B30 seulement à court terme. Cette constatation expérimentale est classique pour les BHP ou BTHP. En effet, on enregistre habituellement, pour ce type de bétons, des valeurs de retrait total à long terme similaires voire inférieures à celles des bétons ordinaires, bien que le retrait endogène des BHP et BTHP soit toujours plus élevé [9] et [10].

## Conclusions

Les résultats expérimentaux présentés dans cet article mettent en évidence la meilleure aptitude, en conditions de laboratoire, du BHP B80 à limiter les transferts gazeux ou liquides au sein du matériau, comparativement au béton ordinaire B30.

Ces propriétés de durabilité du BHP résultent de sa microstructure : matrice composée essentiellement de C-S-H denses et contenant très peu de portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et caractérisée par sa compacité (faible porosité totale et faible rayon moyen des pores). Ceci résulte du plus faible rapport E/C et de la teneur optimisée en fumées de silice de la formulation du béton B80.

Les propriétés de durabilité du béton B80 ne semblent pas être altérées par sa plus forte tendance à la microfissuration, décelée en particulier après 90 j de cure par immersion dans l'eau.

On peut donc penser que ces propriétés seront assurées sur ouvrage, en particulier dans l'épaisseur d'enrobage. Le béton B80 est donc susceptible d'assurer une meilleure protection des armatures du béton armé. Les résultats présentés dans cet article sont à compléter par les résultats relatifs à la diffusivité des ions chlorures donnés dans la référence [1].

En outre, bien que le béton B80 ait un retrait endogène plus élevé, les deux matériaux ont un retrait total à long terme équivalent (à HR  $\approx$  65 %).

Le gain de durabilité escompté par l'utilisation de BHP dans les ouvrages devra être confirmé par des mesures effectuées à long terme sur des structures réelles. Ce travail sera notamment réalisé à partir de mesures *in situ* ou par prélèvements sur les « ouvrages jumeaux » de Bourges, pour ce qui concerne les bétons B30 et B80 de cette étude. De plus, également dans le cadre du projet national « BHP 2000 », des corps d'épreuve en béton armé, fabriqués avec quinze formulations différentes de bétons allant du B20 au B120, et installés sur trois sites en France et un site au Canada, seront suivis au cours du temps.

Le suivi de structures *in situ* constitue en effet une seconde étape indispensable après l'étude de la durabilité du matériau évaluée à partir d'essais de laboratoire sur éprouvettes. Il fournit les données nécessaires, tout d'abord, à l'évaluation du degré de pertinence et de représentativité des paramètres choisis pour quantifier la durabilité, puis aux corrélations avec les essais accélérés, et enfin à la calibration des modèles de prédiction de la durée de vie des ouvrages.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BAROGHEL-BOUNY V., ROUGEAU P., CHAUSSADENT T., CROQUETTE G. (1998), *Étude comparative de la durabilité des bétons B30 et B80 des ouvrages jumeaux de Bourges - Partie II : Étude expérimentale de la pénétration des ions chlorures par différentes méthodes*, dans ce même numéro.
- [2] *Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité*, AFPC-AFREM « Durabilité des bétons », LMDC, 1998.
- [3] VERNET C., CADORET G. (1992), *Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des BHP* in « Les Bétons à Hautes Performances, caractérisation, durabilité, applications », Presses de l'ENPC, pp. 115-128.
- [4] BAROGHEL-BOUNY V. (1994), *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, Analyse, Interprétations*, Laboratoire central des Ponts et Chaussées, 468 pages.
- [5] MORANVILLE-REGOURD M. (1992), *Microstructure des BHP* in « Les Bétons à Hautes Performances, caractérisation, durabilité, applications », Presses de l'ENPC, pp. 25-44.
- [6] BAROGHEL-BOUNY V. (1997), *Experimental investigation of self-desiccation in high-performance materials - Comparison with drying behaviour*, Proceedings of the International Research Seminar « Self-desiccation and its importance in Concrete Technology », June 10th, 1997, Lund, Sweden (Edited by B. Persson & G. Fagerlund, Lund), pp. 72-87.
- [7] KALIFA P., TSIMBROVSKA M., BAROGHEL-BOUNY V. (1998), *High-performance concrete at elevated temperatures - An extensive experimental investigation of thermal and hygral properties and microstructure*, Proceedings of International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes, Sherbrooke'98, August 16-20, 1998, Sherbrooke (Québec) Canada (Edited by P.-C. Aïtcin and Y. Delagrave), vol. 2, pp. 259-279.

- [8] TOUTLEMONDE F., LE MAOU F. (1996), Protection des éprouvettes de béton vis-à-vis de la dessiccation. Le point sur quelques techniques de laboratoire, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **203**, mai-juin, pp. 105-119.
- [9] BAROGHEL-BOUNY V., GODIN J., GAWSEWITCH J. (1996), *Microstructure and moisture properties of high-performance concrete*. Proceedings of the « 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance concrete BHP 96 », 29-31 May 1996, Paris, France (LCPC, Presses de l'ENPC), pp. 451-461.
- [10] LE ROY R., de LARRARD F. (1993), *Creep and shrinkage of high-performance concrete : the LCPC experience*. Proceedings of the 5th International RILEM Symposium in Barcelona, RILEM 93 (E. & SPON, London) pp. 500-508.

### Remerciements

Les auteurs remercient Stéphane Mazounie et Pierre Roussel pour la réalisation de différents essais.

Dans le cadre du projet national « BHP 2000 », la DRAST (METL) et la DDE du Cher ont contribué au financement de cette étude.

### ABSTRACT

Comparative laboratory study of the durability of two types of concrete (B30 and B80) used for the « twin bridges » at Bourges

Part I : Microstructure, durability and shrinkage

V. BAROGHEL-BOUNY, P. ROUGEAU, S. CARÉ, J. GAWSEWITCH

The study described in this paper is part of a National Project (Bétons à Hautes Performances 2000) one part of which involves evaluating the durability of high-performance and very high-performance concrete. This study uses laboratory tests on samples to compare the potential durability of two formulations - B30 (ordinary concrete) and B80 (high-performance concrete containing silica fume) - used in the construction of « twin bridges » at Bourges.

Comparative analysis was conducted using a large range of experimental methods and concerned the microstructure, relative durability and shrinkage of the materials.

The experimental results show that under laboratory conditions gaseous or liquid transfers within the material are better limited by the B80 high-performance concrete than the tested ordinary concrete, despite the greater susceptibility of the former to microcracking. Furthermore, although the B80 concrete was subject to higher endogenous shrinkage, the long term shrinkage of the two materials was similar (at RH = 65 %).