

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées



# Véronique Baroghel-Bouny

# Les spécificités des bétons à hautes performances

Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles

> ÉTUDES ET RECHERCHES DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES

Conformément à la note du 04/07/2014 de la direction générale de l'Ifsttar précisant la politique de diffusion des ouvrages parus dans les collections éditées par l'Institut, la reproduction de cet ouvrage est autorisée selon les termes de la licence CC BY-NC-ND. Cette licence autorise la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, cet ouvrage peut être copié, distribué et communiqué par tous moyens et sous tous formats.



(CC BY-NC-ND 4.0)

Attribution — Vous devez créditer l'Oeuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Ifsttar vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Oeuvre.

Pas d'Utilisation Commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Oeuvre, tout ou partie du matériel la composant.

Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Oeuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'Oeuvre modifiée.

# Le patrimoine scientifique de l'Ifsttar

Le libre accès à l'information scientifique est aujourd'hui devenu essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés pour de nouveaux travaux, l'Ifsttar a entrepris la numérisation et la mise en ligne de son fonds documentaire. Ainsi, en complément des ouvrages disponibles à la vente, certaines références des collections de l'INRETS et du LCPC sont dès à présent mises à disposition en téléchargement gratuit selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND.

Le service Politique éditoriale scientifique et technique de l'Ifsttar diffuse différentes collections qui sont le reflet des recherches menées par l'institut.



www.ifsttar.fr

Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux, de l'Aménagement et des Transports 14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne F-77447 Marne la Vallée Cedex 2



Contact : diffusion-publications@ifsttar.fr

# Les spécificités des bétons à hautes performances

# Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles

Véronique Baroghel-Bouny

Septembre 2004



Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 58, bd Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15 Véronique BAROGHEL-BOUNY Chef de la section Microstructure et durabilité des bétons Division bétons et composites cimentaires Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Ont également contribué à ces travaux :

- P. Belin, J.-F. Bouteloup, Th. Chaussadent, F. de Larrard, J. Gawsewitch, G. Platret, P. Roussel, G. Villain (LCPC Paris)
- > D. Henry (LCPC, sous contrat de recherche LCPC-ATILH)
- G. Olivier (LRPC de l'est parisien)
- S. Arnaud, G. Orcel, J Prost (LRPC de Lyon)
- > K. Ounoughi (LRPC de Bordeaux, actuellement DDE 34)
- P. Fasseu (LRPC de Lille)
- > A. Ammouche (LERM, Arles)
- > H. Hornain (LERM, actuellement ECI Arles)
- P. Rougeau (CERIB, Epernon)
- M. Carcasses (LMDC-INSA, Toulouse)
- D. Quénard (CSTB, Grenoble)
- > C. Mary-Dippe, L. Hasni (CEBTP, Saint-Rémy-lès-Chevreuse)
- B. Bissonnette (CRIB, Département de génie civil, Faculté des sciences et de génie, Université Laval, Québec, Canada)

Les résultats présentés dans ce document ont été obtenus dans le cadre de différentes études et recherches, notamment :

- > Projet national « BHP 2000 » (Directeur technique : D. Brazillier, DDE de l'Yonne)
- Thème de recherche « Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages » (OA 9), dirigé par Véronique Baroghel-Bouny (LCPC)
- Opération de recherche « Durabilité du béton armé et de ses constituants : maîtrise et approche performantielle » (11B021), dirigée par Véronique Baroghel-Bouny (LCPC)

Pour commander cet ouvrage : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées IST – Diffusion des Éditions 58 boulevard Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15 Téléphone : 01 40 43 50 20 – Télécopie : 01 40 43 54 95

ou serveur Internet LCPC : http://www.lcpc.fr

Légende de couverture : Photo-montage : « De l'ouvrage à l'analyse microscopique » -Pont de l'Ile de Ré et site expérimental de vieillissement de La Rochelle (Charente-Maritime).

Prix : 20,00 € HT

Ce document est propriété du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation de son Directeur général (ou de ses représentants autorisés)

© 2004 - LCPC

ISSN 1161-028X

# SOMMAIRE

Sommaire	3
Résumé	. 5
I - Introduction	7
I.1 - Présentation générale	7
1.2 - Rappel des principes de formulation des BHP	8
1.3 - Le Projet National "BHP 2000"	. 8
1.3.1 - L'étude sur sites naturels de vieillissement	8
1.3.2 - L'étude sur ouvrage ancien : le Pont de l'Ile de Ré	9
1.3.3 - L'étude sur les Ouvrages Jumeaux de Bourges	9
I.4 - L'étude sur les ouvrages de la ligne SNCF "TGV Méditerranée"	. 9
II - Description des bétons, des sites et des ouvrages étudiés	. 9
II.1 - Les bétons	. 9
II.2 - Les sites de vieillissement	10
II.3 - Les ouvrages réels	10
III - Caractéristiques microstructurales	11
III 1 - Examen de la microstructure au MEB	11
III 1 1 - Prénaration des échantillons et technique exnérimentale	11
III 1 2 - Résultats expérimentaux obtenus sur énrouvettes de laboratoire	12
III.1.3 - Résultats expérimentaux obtenus sur carottes prélevées in situ	12
III.1.4 - Conclusions	13
III.2 - Investigation de la structure poreuse par intrusion de mercure	13
III.2.1 - Préparation des échantillons	13
III.2.2 - Résultats généraux : comparaison de la structure poreuse des bétons ordinaires et des Bi	ΗP
-	14
III.2.3 - Effet du rapport E/C et de la teneur en fumées de silice	15
III.24 - Effet de l'air entraîné sur la structure poreuse des BHP	15
III.2.5 - Effet du vieillissement	16
11.2.6 - Effet de 'peau' en conditions natureiles	16
III.3 - Quantification de la microfissuration au microscope optique par analy	se
d'images	18
III.3.1 - Technique mise en œuvre	18
11.3.2 - Longueurs specifiques de microfissures (à l'état vierge)	18
III.3.3 - Cartographies de microfissuration (a l'etat vierge)	19
ni.3.4 - Hemarques finales	19
IV - Indicateurs de durabilité	20
IV.1 - Préambule	20
IV.2 - Procédures expérimentales	21
IV.2.1 - Porosité accessible à l'eau	21
IV.2.2 - Perméabilité apparente aux gaz	21
IV.2.3 - Coefficient de diffusion apparent des ions chlorure en conditions saturées	21
IV.2.4 - Permeabilite a l'eau liquide	21
IV.2.5 - Obernolent d'absorption capillaire	22
IV.3 - nesultais experimentaux obtenus sur eprouvettes conservées en laboratoire 2	22
IV.3.1 * FUIUSHE accessible a Leau	22
IV.3.3 - Coefficient de diffusion apparent des inte chlarure en conditions acturées	23
IV 3 4 - Perméabilité à l'eau liquide	24 25
	20

## Les spécificités des bétons à hautes performances Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles

IV.3.5 - Coefficient d'absorption capillaire	
IV.4 - Effet du vieillissement	
IV.5 - Synthèse : durabilité "potentielle" globale des bétons étudiés	
V - Témoins de durée de vie vis-à-vis de la corrosion des armatures d	u béton
	29
V.1 - Preambule	29
V.2 - Procédures expérimentales	
V.2.1 - Profils hydriques déterminés par gammadensimétrie	
V.2.2 - Profondeur et profils de carbonatation	29
V.2.2.1 - Profondeur carbonatée mesurée par phénolphtaléine	
V.2.2.2 - Profils de teneurs en Ca(OH) <sub>2</sub> résiduelle et en CO <sub>2</sub> de carbonatation déter ATG	minés par 30
V.2.3 - Profils de concentration en chlorures déterminés par analyse chimique	
V 3 - Résultats expérimentaux obtenus sur prélèvements effectués in situ	30
V 3 1 - Profile bydrigues	30
V 3.2 - Profondeur et profils de carbonatation	
V.3.2 - 1 rolongeur er promo de carbonatáron	31
V 3.2.2 - Profils de teneurs en $Ca(OH)_{a}$ résiduelle et en $CO_{a}$ de carbonatation	
V.3.2.3 - Svnthèse	
V.3.3 - Profils de concentration en chlorures	33
VI - Comportement sous cycles de gel-degel avec ou sans sels	
VI.1 - Procedures experimentales	
VI.1.1 - Facteur d'espacement des bulles d'air	
VI.1.2 - Evaluation de la resistance aux cycles de gel-degel sans sels (gel interne) en laborat	oire 35
VI.1.3 - Evaluation de la resistance aux cycles de gel-degel avec sels (ecalilage) en laboratol	re 35
VI.2 - Resultats experimentaux obtenus en laboratoire et in situ	
VI.2.1 - Hésistance aux cycles de gel-degel sans sels (gel interne) en laboratoire	
VI.2.2 - Resistance aux cycles de gel-degel avec sels (ecalilage) en laboratoire	
VI.2.3 - Synthese du comportement au gel des BHP evalue en laboratoire	
<ul> <li>Comparaison avec les résultats de l'essai accéléré normalisé d'écaillage réalisé en laborato</li> </ul>	ire 38
VII - Comportement vis-à-vis d'autres agressions - Exemples pour l'	attaque
acide et l'alcali-réaction	
VII 1 - Comportement vis-à-vis de l'attaque acide	
VII 2 - Comportement vis-à-vis de l'alcali-réaction	40
VII 2.1 - L'effet "protecteur" d'une faible teneur en eau initiale	40
VII 2 2 - L'effet "inhibiteur" ou "ralentisseur" des fumées de silice.	40
VII.2.3 - Conclusions	
VIII - Synthese et conclusion generale	
VIII.1 - Synthèse des principaux résultats relatifs à la protection des armature	s contre
la corrosion assurée par les BHP	41
VIII.2 - Synthèse du comportement des BHP sous cycles de gel-dégel avec	ou sans
sels	42
VIII 3 - Conclusion générale	43
IX - Références	44

Tableaux

Figures

# <u>RÉSUMÉ</u>

Ce document offre une synthèse des principaux résultats concernant les caractéristiques microstructurales et les propriétés relatives à la durabilité des bétons à hautes performances (BHP), acquis dans le cadre de différentes études et recherches, en particulier dans celui du Projet National "BHP 2000" et de projets de recherche dirigés par le LCPC. La durabilité concernée dans ce document a trait essentiellement à la prévention :

- de la corrosion des armatures du béton armé,
- des dégradations du béton dues aux cycles de gel-dégel en présence ou non de sels.

La durabilité a été étudiée sur des échantillons de matériaux issus d'éprouvettes testées en conditions de laboratoire, d'éléments de structure, ou encore d'ouvrages réels exposés à des conditions naturelles variées.

Les principes de formulation des BHP, le contenu des études et des recherches considérées et les caractéristiques des ouvrages et des matériaux étudiés sont tout d'abord rappelés. Ensuite, sont présentés des résultats expérimentaux relatifs à diverses propriétés et à leur évolution en fonction des paramètres de formulation, des conditions environnementales, de l'âge, ... :

- caractéristiques microstructurales (examen de la microstructure au microscope électronique à balayage, analyse de la structure poreuse par intrusion de mercure et quantification de la microfissuration au microscope optique par analyse d'images),
- indicateurs de durabilité (porosité, perméabilité, coefficient de diffusion des chlorures, ...),
- témoins de durée de vie vis-à-vis de la corrosion des armatures du béton armé (profils de taux de saturation, de carbonatation et de concentration en chlorures, ...).

La durabilité "potentielle" d'un large éventail de bétons a également été évaluée. Le comportement sous cycles de gel-dégel avec ou sans sels a été examiné en laboratoire et *in situ*. Quelques exemples sont en outre donnés relativement au comportement en laboratoire vis-à-vis d'autres agressions (attaque acide et alcali-réaction).

Tous les résultats indiquent pour les BHP une durabilité "potentielle" élevée et en particulier une très bonne résistance aux agents agressifs d'origine externe (la pénétration des chlorures et la carbonatation sont limités à une zone très superficielle) et interne. Le meilleur comportement des BHP, mis en évidence en laboratoire et *in situ* par rapport à des formules plus classiques, fournit des arguments solides pour prescrire des BHP en vue d'assurer une durée de vie plus longue aux ouvrages en béton armé (ou précontraint) et/ou éviter bon nombre de pathologies (alcali-réaction, lixiviation par les liquides chimiquement agressifs, ...).

# I - INTRODUCTION

# I.1 - Présentation générale

Dans le domaine du génie civil et du bâtiment, les années 80 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 matériaux offrent aux constructeurs des perspectives intéressantes, non seulement grâce à de meilleures caractéristiques mécaniques, mais également grâce à la durabilité accrue attendue. Ces bétons ont été intégrés au moins partiellement dans la réglementation française. Les règlements BAEL et BPEL ont en effet vu leur domaine d'application s'étendre aux B60 puis aux B80, ainsi que le DTU Feu.

On dispose désormais d'outils permettant de quantifier en laboratoire les propriétés relatives à la durabilité pour de tels matériaux (indicateurs de durabilité pertinents, méthodes d'essais standardisées et modèles analytiques ou numériques [1]) et d'un début de retour d'expérience sur ouvrages réels. De ce fait, bon nombre d'études et de recherches ont été lancées depuis quelques années, dans le but de prévoir la durabilité à long terme des ouvrages construits avec ces matériaux et de la prendre en compte dès la conception de la structure et le choix de la formule de béton.

Ce document offre une synthèse des principaux résultats concernant les caractéristiques microstructurales et les propriétés relatives à la durabilité des bétons à hautes performances, acquis dans le cadre de différentes études et recherches, en particulier dans celui du Projet National *"BHP 2000"* et de projets de recherche dirigés par le LCPC. La durabilité concernée dans ce document a trait essentiellement à la prévention :

- de la corrosion des armatures du béton armé,
- des dégradations du béton dues aux cycles de gel-dégel en présence ou non de sels.

Elle a trait, dans une moindre mesure, au comportement des bétons vis-à-vis d'autres agressions, telles que l'attaque acide et l'alcali-réaction. La durabilité a été étudiée sur des échantillons de matériaux issus d'éprouvettes testées en conditions de laboratoire, d'éléments de structure, ou encore d'ouvrages réels exposés à des conditions naturelles variées. Les résultats présentés dans ce document viennent compléter la littérature existante sur le sujet (voir par exemple les synthèses figurant dans [2], [3] ou [4]), pour illustrer les spécificités des BHP du point de vue des caractéristiques microstructurales (degré d'hydratation, nature et morphologie des produits d'hydratation, ...) et des propriétés relatives à la durabilité des ouvrages en béton armé vis-à-vis de différents types d'agression.

Le programme des travaux réalisés et l'ensemble des résultats obtenus ne sont pas détaillés ici. Seuls quelques exemples significatifs sont présentés. Pour plus d'informations, le lecteur pourra se reporter aux documents cités en référence dans le texte.

# 1.2 - Rappel des principes de formulation des BHP

Les bétons à hautes performances sont souvent associés à  $R_{moy.28} \ge 60$  MPa, où  $R_{moy.28}$  est la résistance mécanique moyenne à la compression à 28 jours.

Du point de vue de la formulation, ces matériaux se caractérisent notamment par un rapport eau/ciment (E/C) faible (E/C < 0,40), allant de pair avec l'incorporation d'un adjuvant organique fluidifiant, dosé à saturation (généralement entre 0,8 et 2 % par rapport à la masse de ciment). Ce fluidifiant permet la défloculation des particules de ciment, ainsi que celle des additions minérales éventuellement utilisées. Une autre caractéristique fondamentale de la formulation des BHP est l'optimisation des proportions des différentes classes granulaires utilisées dans le mélange. En effet, sachant que l'objectif est de réduire la porosité et sachant que cette dernière est donnée par la relation (1), on en déduit aisément que l'on y parviendra en augmentant la dimension D des grains les plus gros (granulats) et/ou en diminuant la dimension d des grains les plus petits :

$$Porosité = p_0 \cdot \sqrt[5]{\frac{d}{D}}$$
(1)

Pour répondre à cette dernière exigence, notamment lorsque l'on veut atteindre  $R_{moy,28} \ge 80$  MPa, on incorpore souvent dans les BHP des ultrafines, qui sont la plupart du temps des fumées de silice (dont le dosage est généralement de l'ordre de 8 à 10 % par rapport à la masse de ciment). On incorpore éventuellement également d'autres additions minérales (souvent des fillers calcaires) inertes, hydrauliques ou pouzzolaniques.

Les fumées de silice (FS) permettent de diminuer la porosité par deux effets :

- <u>un\_effet physique (rôle de "filler")</u>: les microbilles de silice, de taille moyenne 0,10-0,15 µm, remplissent les vides initiaux entre les grains de ciment anhydres,
- <u>un effet chimique (réaction pouzzolanique)</u>: la fumée de silice (essentiellement composée de SiO<sub>2</sub>) réagit avec la portlandite Ca(OH)<sub>2</sub>, au fur et à mesure que cette dernière se forme par hydratation du ciment, pour produire des silicates de calcium hydratés C-S-H supplémentaires. La réaction pouzzolanique (acide-base) peut s'écrire de la façon simplifiée suivante (2):

 $Ca(OH)_2 + SiO_2 \rightarrow C-S-H$  (2)

Ces C-S-H viennent combler, au-moins partiellement, les vides résiduels.

Les fumées de silice, grâce à leur morphologie (microbilles), offrent en outre l'avantage d'améliorer la rhéologie du béton frais.

# I.3 - Le Projet National "BHP 2000"

Dans le cadre du Projet National "BHP 2000" [5], une expérimentation de grande envergure a été menée relativement aux propriétés de durabilité des BHP. Les différentes études s'inscrivant dans ce projet, qui ont apporté des données sur le sujet, sont décrites brièvement dans ce qui suit.

#### 1.3.1 - L'étude sur sites naturels de vieillissement

L'étude sur sites naturels de vieillissement a été menée sur une gamme de 15 bétons dont les résistances moyennes à la compression variaient de 20 à 125 MPa.

Le comportement de ces 15 bétons a été étudié sur la base d'un très large éventail de méthodes expérimentales, non seulement sur éprouvettes conservées dans l'eau en laboratoire, mais également sur des éléments de structure exposés à des conditions naturelles (*in situ*). Dans le cadre de cette étude, 43 corps d'épreuve en béton armé pré-fissurés ont donc été installés sur quatre sites naturels (Melun, La Rochelle, la Maurienne et le Canada [6-13]) et ont été étudiés à partir de prélèvements ou de mesures non destructives, à différentes échéances.

# 1.3.2 - L'étude sur ouvrage ancien : le Pont de l'Ile de Ré

L'étude sur ouvrage ancien a été réalisée à partir d'analyses et d'essais menés en laboratoire sur les prélèvements effectués à l'échéance de 14 ans sur le Pont de l'Île de Ré, plus précisément sur le tablier en B60 contenant des fumées de silice (B60FS) [14]. Cet ouvrage offre l'avantage d'être la première grande application de BHP avec fumées de silice en France dans le domaine des ouvrages d'art (il a été construit dans la période 1986-1987). Il présente également un intérêt spécifique pour l'évaluation de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures, étant donné que le tablier est exposé aux sels marins.

# 1.3.3 - L'étude sur les Ouvrages Jumeaux de Bourges

L'étude sur les Ouvrages Jumeaux concerne des ponts construits plus récemment, mais offrant l'opportunité d'une comparaison directe entre un béton ordinaire B30 et un BHP avec fumées de silice (B70FS) sur le même site. Les investigations *in situ* ont démarré à l'échéance de 2 ans [15], [16]. Ces investigations ont été complétées par une étude sur éprouvettes conservées dans l'eau en laboratoire pendant 28 et 90 jours [17], [18].

# 1.4 - L'étude sur les ouvrages de la ligne SNCF "TGV Méditerranée"

Parmi les autres études considérées ici, on peut citer en particulier celle relative aux ouvrages de la ligne SNCF *"TGV Méditerranée"*. Cette étude consistait à comparer la durabilité des trois bétons (B32, B60 et B80FS) utilisés lors de la réalisation des tabliers des ouvrages d'art d'une section de la ligne TGV. Cette comparaison a été organisée en 3 phases. La phase 1 a été réalisée sur des éprouvettes de contrôle confectionnées sur chantier lors de la construction de certaines parties des ouvrages [19]. Lors de la phase 2 ("bétons d'étude"), un programme complet d'investigations a été mené sur des éprouvettes fabriquées en laboratoire avec les mêmes matériaux que ceux utilisés pour la construction des ouvrages, suivant la formule nominale [20]. Le suivi des ouvrages à moyen et long terme, à partir de méthodes non destructives et de prélèvements effectués sur les ouvrages, constitue la phase 3 de l'étude [21].

# **II - DESCRIPTION DES BÉTONS, DES SITES ET DES OUVRAGES ÉTUDIÉS**

# II.1 - Les bétons

La formule de la plupart des bétons étudiés ici, ainsi que les caractéristiques des matériaux et de leurs constituants, sont détaillées dans les références indiquées au § I. Les rapports E/C et E/liant des formules, ainsi que les valeurs moyennes de résistance à la compression mesurée sur éprouvettes conservées dans l'eau en laboratoire pendant 28 jours ( $R_{moy.28}$ ) sont rappelées dans le tableau I (à l'exception du B60FS du tablier du Pont de l'Ile de Ré). Les formules contenant des cendres

volantes silico-alumineuses (respectivement des fumées de silice densifiées) sont référencées CV (respectivement FS). L'utilisation d'un agent entraîneur d'air est indiquée par la mention EA. La résistance caractéristique du béton B60FS (E/C = 0,38) du tablier du Pont de l'Ile de Ré requise à 28 jours était de 35 MPa. La résistance caractéristique obtenue était de 59,5 MPa (écart-type : 6,3 MPa).

#### II.2 - Les sites de vieillissement

Dans le cadre de l'étude sur sites naturels de vieillissement (cf. § I.3.1), quatre sites -Melun, La Rochelle, la Maurienne et le Canada - aux caractéristiques très différentes, ont été choisis pour y installer les corps d'épreuve pré-fissurés en béton armé. Ces corps d'épreuve n'ont pas subi de cure et ont été installés sur site à l'âge d'au moins 28 jours. Les caractéristiques des sites sont résumées dans ce qui suit :

• <u>Melun</u> (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de l'Est Parisien, cf. Figure 1) : il s'agit d'un site au climat tempéré situé en région parisienne, en zone péri-urbaine. Sur ce site, la température et l'humidité relative (HR) moyennes annuelles étaient relativement constantes sur la période étudiée. Celles-ci étaient comprises entre 11,3 et 11,9 °C, et 77 et 80 %, respectivement. Les corps d'épreuve sont installés dans une zone exposée aux intempéries.

• <u>La Rochelle</u> (au pied de la Tour Saint-Nicolas, cf. Figure 2) : il s'agit d'un site marin situé en zone de marnage. Les corps d'épreuve sont à sec à marée basse, et entièrement submergés à marée haute. L'humidité relative moyenne annuelle était également relativement constante sur ce site sur la période étudiée. Les valeurs, comprises entre 76 et 79 %, étaient similaires à celles enregistrées à Melun. Les températures moyennes annuelles étaient un peu plus élevées qu'à Melun. Elles étaient de l'ordre de 13,5 °C.

• <u>Maurienne</u> (entre Saint-Michel-de-Maurienne et la Pratz, en bordure de la RN6, cf. Figure 3) : il s'agit d'un site montagneux situé à 850 m d'altitude, soumis à des cycles de gel-dégel. Le site est classé en zone de gel sévère au sens des *Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel* [22]. Les températures moyennes annuelles y sont naturellement plus basses qu'à Melun et qu'à la Rochelle. Elles variaient entre 7,5 et 8,8 °C sur la période étudiée. Les corps d'épreuve sont recouverts de neige environ 30 jours dans l'année, entre les mois de novembre et d'avril (essentiellement en janvier et en février). Le salage de la chaussée a lieu sur une période de 6 mois, également entre les mois de novembre et d'avril. Les corps d'épreuve sont disposés le long de la route à 0,80 m en arrière de la glissière de sécurité.

• <u>Canada</u> (Campus de l'Université Laval, Québec) : il s'agit d'un site soumis à des conditions de gel sévères et exposé aux sels de déverglaçage. Les corps d'épreuve sont recouverts de neige plusieurs mois dans l'année. Ils sont installés entre les deux voies de circulation.

#### II.3 - Les ouvrages réels

En ce qui concerne les ouvrages réels étudiés, les caractéristiques des sites et des ouvrages sont précisées dans ce qui suit :

• Le Pont de l'Ile de Ré (Charente Maritime) (cf. Figure 4)

Il s'agit d'un pont de 3 km de long et de 15,50 m de large, dessinant une courbe de 5000 m de rayon et culminant à 42 m au-dessus de la mer. Le tablier en béton armé

est supporté par 28 piles de 5,50 m de diamètre, composant 24 travées de 110 m de long et 3 travées de rive. Il est situé en environnement marin (exposition aux embruns, sans immersion, ni marnage).

• Les Ouvrages Jumeaux de Bourges (Cher) (cf. Figure 5)

Il s'agit de deux ouvrages PIPO parallèles réalisés par la DDE du Cher à Bourges (échangeur RN151/RD107), l'un en B30 et l'autre en B70FS.

• Les ouvrages de la ligne SNCF "TGV Méditerranée" (cf. Figure 6)

Les ouvrages étudiés sont situés sur la section Montélimar-Pierrelatte de la ligne nouvelle du TGV Méditerranée. Il s'agit de ponts-dalle ou de ponts à poutres en béton armé.

# **III - CARACTÉRISTIQUES MICROSTRUCTURALES**

Le lecteur pourra se reporter notamment aux références [9], [10], [12], [13] et [17] pour des informations plus détaillées relativement aux procédures expérimentales appliquées ou à l'analyse des résultats présentés dans les sections suivantes.

# III.1 - Examen de la microstructure au MEB

III.1.1 - Préparation des échantillons et technique expérimentale

Des fractures fraîches de béton ont été examinées au microscope électronique à balayage (MEB) en mode électrons secondaires, afin de visualiser les détails de la microstructure, tels que la morphologie des phases hydratées (silicates de calcium hydratés C-S-H, portlandite Ca(OH)<sub>2</sub>, ettringite, ...), et en mode électrons rétrodiffusés (ERD) sur surfaces polies, afin d'évaluer notamment l'état d'hydratation ou encore la macroporosité. En effet, sur les images obtenues par MEB-ERD, la discrimination entre les composants repose sur le numéro atomique et donc sur le niveau de gris. Le numéro atomique moyen d'une phase de la pâte de ciment durcie résultant de ceux des éléments constitutifs, pondérés par leur proportion relative, il est ainsi possible d'observer en blanc (fort numéro atomique) les grains de ciment anhydres et en noir les vides (bulles d'air, pores et fissures). Les différents hydrates apparaissent quant à eux en différentes nuances de gris. La microanalyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie permet de connaître de façon semi-quantitative la composition chimique des régions observées sur l'échantillon.

Pour l'observation sur surfaces polies en mode ERD, les échantillons (surface sciée) ont été imprégnés d'une résine époxy, afin d'éviter une désagrégation au cours du polissage. Le polissage des échantillons a été réalisé à l'aide d'un abrasif diamanté jusqu'au micromètre, sous lubrifiant à base d'alcool pour éviter tout risque de réhydratation. Afin de rendre possible l'observation au MEB, les différents échantillons ont préalablement été séchés par séchage "standard" (cf. § III.2.1), puis ont été "métallisés" à l'or, c'est-à-dire recouverts d'un film conducteur d'environ 10 nm d'épaisseur.

Les échantillons prélevés dans la zone superficielle des structures ("peau") incluaient la surface exposée, tandis que les échantillons prélevés "à cœur" correspondaient à une distance de plus de 60 mm de la surface exposée.

On notera que la préparation, et surtout l'observation, sont pratiquées sous un vide poussé. Ceci peut expliquer la présence sur les images de nombreuses fissures.

#### III.1.2 - Résultats expérimentaux obtenus sur éprouvettes de laboratoire

Les fractographies de la figure 7, obtenues sur des échantillons prélevés à l'âge de 28 jours dans des cylindres Ø150 x 300 mm conservés dans l'eau en laboratoire, illustrent la compacité croissante des matériaux lorsque l'on passe du béton M25CV au béton M120FS. Les C-S-H, phase hydratée la plus abondante dans la matrice des matériaux cimentaires hydratés, se présentent sous la forme d'amas granuleux, d'aspect fibreux dans le M25CV (cf. Figure 7a) ou au contraire sous la forme d'une matrice particulièrement dense dans le M120FS (cf. Figure 7d). La variété des phases et des morphologies, ainsi que l'importante porosité présente dans le M25CV, contrastent nettement avec l'homogénéité, la compacité et la faible porosité du M75 et surtout du M120FS. Des cendres volantes (sphères de quelques micromètres de rayon) sont également clairement visibles dans le M25CV.

L'examen au MEB-ERD d'échantillons de pâtes de ciment durcies (fabriquées à partir d'un même ciment CEM I mais avec des E/C différents et conservées en laboratoire sans échange d'humidité avec le milieu environnant) montre qu'à une échéance donnée, lorsque E/C décroît, notamment au-dessous de la valeur 0.40. le degré d'hydratation du ciment devient très faible (cf. Figure 8). Ainsi, pour la pâte de ciment durcie avec E/C = 0,25, représentative de BHP, l'image à 28 jours met en évidence de nombreux grains de ciment anhydres, dans une matrice très homogène et peu poreuse, essentiellement composée de C-S-H et de grains anhydres. Dans ce matériau conservé sans échange d'humidité avec le milieu environnant, le degré d'hydratation du ciment mesuré par perte au feu [23] était de 0,50 (respectivement 0,57) à 28 jours (respectivement à 2 ans). Le degré d'hydratation évolue donc très peu au cours du temps, notamment après 28 jours. A contrario, dans la pâte à fort E/C (E/C = 0.60), à 28 jours on observe clairement différentes phases hydratées, par exemple des cristaux massifs de Ca(OH)<sub>2</sub> ou des couronnes de C-S-H autour des cœurs anhydres. De plus, le degré d'hydratation augmente nettement après 28 jours. Il passe de 0,70 à 28 jours à 0,91 à 2 ans (lorsque le matériau est conservé sans échange d'humidité avec le milieu environnant), indiquant que la pâte est quasiment complètement hydratée à cette dernière échéance.

# III.1.3 - Résultats expérimentaux obtenus sur carottes prélevées in situ

Les images de la figure 9, obtenues par MEB-ERD sur des échantillons prélevés sur ouvrages, illustrent que même à long terme, les BHP contiennent encore une forte proportion de grains de ciment anhydres résiduels, contrairement aux bétons ordinaires. Ceci est cohérent avec les résultats présentés au § III.1.2 et s'explique donc essentiellement par le faible E/C des BHP (E/C < 0,40). Le béton B30 des Ouvrages Jumeaux de Bourges à 3 ans semble complètement hydraté à cœur. En particulier, on distingue nettement les nombreuses empreintes des grains de ciment entièrement consommés qui ont laissé la place à des espaces poreux (grains de Hadley [24]), apparaissant en noir sur la figure 9a. A contrario, de nombreux grains de ciment anhydres résiduels apparaissent (en blanc) sur l'image du B70FS des Ouvrages Jumeaux de Bourges à cœur à la même échéance (cf. Figure 9b). La même constatation peut être faite à plus long terme (14 ans) sur le B60FS du tablier

du Pont de l'Ile de Ré, où de nombreux grains de ciment anhydres sont clairement visibles, aussi bien en "peau" (cf. Figure 9d) qu'à cœur (cf. Figure 9c). Ces observations ont été confirmées par la mesure du degré d'hydratation du ciment par perte au feu : une valeur de 0,75 a été obtenue pour le B60FS à 14 ans. La présence de grains anhydres de grandes dimensions à l'échéance de 14 ans dans ce béton résulte sans doute non seulement de la faible quantité d'eau de gâchage (E/C), mais également de la finesse modérée du ciment.

Ces anhydres résiduels ne constituent pas une zone de faiblesse dans la microstructure. Au contraire, ils contribuent à la haute résistance mécanique et physico-chimique de la matrice de par leur résistance mécanique intrinsèque, leur liaison "idéale" avec les C-S-H et leur réserve alcaline [3]. De plus, ces anhydres résiduels constituent une source potentielle d'hydrates supplémentaires, susceptibles de contribuer à la densification de la microstructure et à la cicatrisation des fissures. Il faut cependant souligner que les réactions chimiques sont de plus en plus lentes au cours du temps dans ce type de matériaux. Donc, seule une faible évolution de la microstructure est à prévoir après 14 ans, en l'absence d'apport d'eau localement au niveau des anhydres. Le faible degré d'hydratation des BHP présente un avantage supplémentaire : il n'y a pas de création de porosité notable (qui serait due à une forte proportion de grains de Hadley) à long terme dans ces bétons, contrairement à ce qui se produit dans les bétons ordinaires.

# III.1.4 - Conclusions

Les caractéristiques microstructurales particulières des matériaux à hautes performances résultent essentiellement de leur rapport E/C inférieur à 0,40. Il ressort de l'ensemble des examens réalisés au MEB, qu'à l'échelle de l'observation, la microstructure des BHP est très compacte et très faiblement poreuse, même à long terme, témoignant de l'excellente qualité de ces matériaux.

#### III.2 - Investigation de la structure poreuse par intrusion de mercure

Les mesures par intrusion de mercure permettent de caractériser la structure poreuse des matériaux. La porosité et la distribution des volumes poreux peuvent ainsi notamment être quantifiées, lorsque les rayons des pores sont inclus dans le domaine de mesure de l'appareil [23].

# III.2.1 - Préparation des échantillons

Des échantillons "représentatifs" (quelques morceaux d'environ 1 cm<sup>3</sup> pour chacun et de masse totale environ 20 g) ont été préparés, en excluant toutefois les plus gros morceaux de granulats. Ces échantillons étaient issus de tranches sciées sous eau, d'épaisseur environ 20 mm pour les cylindres conservés dans l'eau en laboratoire, et d'épaisseur 8 à 10 mm pour les carottes prélevées *in situ* (sauf indication contraire dans le texte). En ce qui concerne les carottes, de même que pour l'examen au MEB, les échantillons prélevés en "peau" incluaient la surface exposée, tandis que les échantillons prélevés à cœur correspondaient à une distance de plus de 60 mm de la surface exposée.

Les échantillons doivent être séchés préalablement à la mesure proprement dite, afin que l'ensemble du réseau poreux soit accessible au mercure. Le prétraitement des échantillons a été réalisé selon la procédure dite "standard" mise au point au LCPC

(sauf indication contraire dans le texte). Cette procédure consiste en un étuvage sous vide à T  $\approx$  45 °C en présence de gel de silice, pendant 14 jours [23]. Au cours de ce prétraitement, les échantillons ont été régulièrement pesés (au mg près), afin d'évaluer leur perte relative de masse en fonction du temps et de vérifier si la masse était stabilisée à l'issue du prétraitement.

Les porosimètres utilisés et la méthode d'essai sont décrits dans la référence [23].

# III.2.2 - Résultats généraux : comparaison de la structure poreuse des bétons ordinaires et des BHP

Pour les 15 formules de béton de l'étude sur sites naturels de vieillissement, la figure 10 compare les proportions de volume poreux correspondant à deux domaines de rayons de pores (3,7 nm <  $r_p$  < 0,1 µm et 0,1 µm <  $r_p$  < 60 µm), à l'âge de 28 jours après conservation dans l'eau. Cette figure met en évidence l'influence de chaque paramètre de formulation (E/C, entraîneur d'air et addition pouzzolanique) sur la contribution relative de chacune des deux familles de pores au volume poreux total pénétré par le mercure. On constate que pour les BHP sans entraîneur d'air, le domaine 3,7 nm <  $r_p$  < 0,1 µm est nettement prédominant. En présence d'air entraîné, le domaine 0,1 µm <  $r_p$  < 60 µm devient prépondérant pour les BHP.

La figure 11a présente les distributions des volumes poreux obtenues par intrusion de mercure à 28 jours après conservation dans l'eau pour différents bétons (sans entraîneur d'air) de l'étude sur sites naturels de vieillissement, incluant le plus poreux selon cette technique (M25CV avec une porosité égale à 15,0 %) et le moins poreux (M120FS avec une porosité égale à 4,8 %). Cette figure fait apparaître deux familles de courbes, l'une pour les bétons ordinaires, l'autre pour les BHP, qui correspondent chacune à des volumes poreux très différents.

Les figures 11b et 11c comparent plus précisément le béton ordinaire et le BHP avec fumées de silice, des ouvrages SNCF (à 90 jours) et des Ouvrages Jumeaux (à 28 et 90 jours en laboratoire et à 3 ans sur site), respectivement.

L'ensemble des résultats présentés dans les figures 10 et 11 montre que la distribution des volumes poreux est bimodale dans le cas d'un très fort rapport E/C (les M25), aux échéances considérées. Elle est monomodale dans le cas d'un rapport E/C moyen à faible, en absence d'air entraîné (à partir des M50). Dans le cas des distributions monomodales, le mode poreux se déplace vers les rayons plus petits quand E/C décroît, puis se stabilise aux environs de 20 nm à partir de E/C  $\approx$  0,35 (correspondant aux M75). On notera que la distribution est également monomodale dans le cas d'une forte quantité de cendres volantes [10], [12].

En plus d'une porosité capillaire plus faible, les BHP présentent donc un réseau poreux nettement plus fin ( $r_{p moy.} \approx 20 \text{ nm}$ ) que les bétons ordinaires ( $r_{p moy.} \approx 50 \text{ nm}$ ). Ils présentent une distribution très resserrée (tout le volume poreux correspond à des rayons de pores tels que  $r_{p moy.} \leq 30 \text{ nm}$ ). Ce résultat est la conséquence de leur faible rapport E/C (E/C < 0,40) et d'un squelette granulaire optimisé, notamment dans le cas de l'incorporation de fumées de silice (cf. § 1.2).

# III.2.3 - Effet du rapport E/C et de la teneur en fumées de silice

L'investigation de la structure poreuse d'échantillons de pâtes de ciment durcies âgées de 28 jours (fabriquées à partir d'un même ciment CEM I mais avec des E/C différents et conservées en laboratoire sans échange d'humidité avec le milieu environnant) montre que lorsque E/C décroît, la porosité capillaire diminue (cf. Figure 12a, où le prétraitement a été effectué par lyophilisation pendant 24 heures [25]). De plus, pour E/C  $\geq$  0,40, la distribution est bimodale, et pour E/C < 0,40, la distribution est monomodale à cette échéance. E/C = 0,40 apparaît donc comme une valeur seuil, séparant les réseaux poreux fortement et faiblement connectés [25], [26], [27].

La figure 12b a été obtenue avec des pâtes de ciment durcies âgées de 2 ans, fabriquées à partir d'un même ciment CEM I, avec E/C = 0.25 et avec différentes teneurs en fumées de silice. Ces pâtes ont été conservées en laboratoire sans échange d'humidité avec le milieu environnant, puis séchées par lyophilisation pendant 24 heures préalablement à la mesure par intrusion de mercure [25]. Cette figure montre que l'addition de fumées de silice, dans le cas d'un faible E/C, induit une diminution de la porosité capillaire et de la taille des pores. Lorsque la teneur en fumées de silice augmente de 5 à 10 % (par rapport à la masse de ciment), la porosité diminue. Par contre, peu de différences sont enregistrées entre 10 et 15 % de fumées de silice (par rapport à la masse de ciment). Ces résultats sont la conséquence de l'effet "filler" et de la réaction pouzzolanique, relatifs aux fumées de silice, explicités précédemment (cf. § 1.2).

Ces données, obtenues sur pâtes et en découplant les paramètres, permettent de confirmer que les résultats présentés en figure 11 s'expliquent principalement par l'effet du E/C et, dans une moindre mesure, par l'effet des fumées de silice.

#### III.2.4 - Effet de l'air entraîné sur la structure poreuse des BHP

Les formules M75 avec air entraîné de l'étude sur sites naturels de vieillissement, malgré un rapport E/C (légèrement) plus faible, présentent une résistance mécanique à la compression plus faible et une porosité mesurée par intrusion de mercure plus forte (8,7 % pour M75EA et 9,8 % pour M75FSEA) que les formules équivalentes sans air entraîné (6,6 % pour M75 et 5,8 % pour M75FS). Ceci résulte de la présence d'une macroporosité apparaissant clairement sous la forme d'un second mode poreux (autour de 10<sup>3</sup> nm) sur la distribution des volumes poreux des matériaux, qui devient alors bimodale (cf. Figures 10 et 13). Le reste du réseau poreux n'est pas modifié, notamment l'autre mode poreux existant dans ce type de bétons (centré autour de 10-20 nm). Ces résultats illustrent l'augmentation du degré de connectivité de l'ensemble du réseau des vides (pores, bulles, microfissures créées par le séchage, ...) dans le cas de l'incorporation d'un agent entraîneur d'air.

Il y a lieu de mentionner que la proportion de volume de macropores relatifs à la présence d'air entraîné est sous-estimée par intrusion de mercure, comparativement à ce que donnerait une quantification par analyse d'images [28], en particulier parce que ces macropores sont faiblement connectés au reste des vides.

Il est bien connu que l'air entraîné a des conséquences négatives sur les propriétés mécaniques des BHP (+1 % d'air implique -5 % pour  $R_{moy,28}$  [68]). Cet effet résulte des modifications de la microstructure mises en évidence ici et de la difficulté à

#### Les spécificités des bétons à hautes performances Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles

formuler et à gâcher des BHP respectant les teneurs en air classiquement recommandées pour la résistance au gel, en sus d'autres adjuvants, et en particulier lorsque des fumées de silice sont également incorporées au mélange (risques de ségrégation). On peut prévoir de plus que les modifications microstructurales mises en évidence vont avoir des conséquences négatives sur certains indicateurs de durabilité, comme par exemple la perméabilité aux gaz (cf. § IV). En effet, la perméabilité augmente notablement avec le degré de connectivité du réseau des vides dans la gamme de tailles concernée.

#### III.2.5 - Effet du vieillissement

La figure 11c illustre l'évolution de la structure poreuse du B30 et du B70FS des Ouvrages Jumeaux de Bourges au cours du temps.

On constate que la porosité du BHP diminue et que sa structure poreuse s'affine au cours du temps, lorsque ce dernier est conservé dans l'eau en laboratoire et également lorsqu'il est exposé aux conditions réelles *in situ* (l'échantillon correspondant à la figure 11c a été prélevé en zone intermédiaire, entre cœur et surface exposée). La microstructure des BHP se densifie donc avec l'âge, quelles que soient les conditions environnementales.

En ce qui concerne le béton ordinaire B30, l'effet bénéfique de la progression des réactions d'hydratation (cf. § III.1) se traduit par la diminution du volume poreux associé au mode principal et par le décalage de ce dernier vers les tailles les plus petites. Cependant, il apparaît en parallèle un mode poreux entre 10<sup>2</sup> et 10<sup>3</sup> nm. Ce mode poreux secondaire, nettement marqué à l'échéance de 3 ans, correspond certainement aux nombreux grains de Hadley identifiés au MEB (cf. § III.1.3).

Les caractéristiques microstructurales des BHP et l'effet bénéfique du vieillissement sur ces caractéristiques vont avoir une influence directe sur les propriétés de transport de ces matériaux, et donc sur leur durabilité (cf. § IV à VII). Il est toutefois prudent d'examiner au préalable si ces caractéristiques, examinées jusqu'ici en zone intermédiaire ou à cœur, sont conservées en "peau", c'est-à-dire dans la zone superficielle, la plus exposée aux agressions d'origine externe.

#### 111.2.6 - Effet de "peau" en conditions naturelles

Des gradients de propriétés entre le cœur et la zone superficielle ("peau"), d'amplitude variable en fonction des paramètres de formulation, peuvent être observés *in situ*. Ces gradients sont le résultat :

- d'un "effet de paroi" (moins de granulats en zone superficielle) et d'un "effet de coffrage" (rétentions d'eau et d'air constatées classiquement au voisinage de certains types de coffrages, ...),
- d'un séchage (évaporation d'eau) externe précoce, dans la zone superficielle,
- des cycles d'humidification (avec présence éventuelle de chlorures) séchage, au cours de la vie de l'ouvrage,
- de réactions chimiques, telles que celles intervenant lors de la carbonatation (formation de CaCO<sub>3</sub>) ou plus spécifiquement avec l'eau de mer (formation de brucite Mg(OH)<sub>2</sub>).

Les mesures réalisées par intrusion de mercure sur le B60FS du tablier du Pont de l'Ile de Ré montrent qu'à l'échéance de 14 ans la porosité est légèrement plus élevée en "peau" (9,5 %) qu'à cœur (8,5 %). On se situe toutefois à la limite de précision de l'essai [1]. Ce résultat est confirmé par la distribution des volumes poreux. En effet, l'échantillon prélevé à cœur présente un mode poreux principal situé aux environs de 10-20 nm, comme précédemment évoqué, alors que pour l'échantillon prélevé en "peau", le mode poreux est localisé aux environs de 40-50 nm (cf. Figure 14a). On met donc en évidence un gradient entre cœur et "peau" : la structure poreuse du BHP est plus grossière en "peau".

Cet effet de "peau" dépend naturellement des conditions environnementales. A titre d'exemple, une faible humidité relative extérieure, génératrice de dessiccation intense pour le béton, est susceptible d'être préjudiciable, alors que le contact avec l'eau de mer peut être bénéfique, grâce à un effet de "colmatage" des vides de la microstructure. De plus, il est moins marqué sur les BHP plus "performants". Ainsi, la figure 14b, obtenue par intrusion de mercure, montre seulement un élargissement du mode poreux (dont le "pic" est situé aux environs de 10-20 nm) dans le domaine des pores de plus grandes dimensions, sans décalage du "pic", pour le M100FS du site de La Rochelle à l'échéance de 4 ans. Une porosité de 5,7 % a été mesurée en "peau" et de 4,6 % à cœur pour ce corps d'épreuve. La différence est là encore à la limite de précision de l'essai.

In situ, on enregistre donc sur les BHP un gradient de propriétés en fonction de la profondeur. La porosité plus élevée et la structure poreuse plus grossière, observées en "peau", résultent certainement du séchage (évaporation d'eau) externe précoce dans cette zone et des effets de paroi et de coffrage précédemment mentionnés. On notera que la carbonatation contribuerait au contraire à réduire le volume poreux des BHP sans modifier de façon notable le positionnement des modes poreux, en zone superficielle. Ceci est illustré par exemple dans la figure 15, relative au B60FS du tablier du Pont de l'Ile de Ré. Dans cette figure, sont comparées les distributions des volumes poreux des zones carbonatée (porosité PHg = 5,9 %) et non carbonatée (PHg = 8,4 %) d'un même échantillon (vierge) prélevé à cœur dans une carotte et avant subi ensuite à l'âge de 15 ans un préconditionnement et un essai de carbonatation accélérée en laboratoire (CO<sub>2</sub> = 50 % et HR = 53,5 %) pendant 46 jours. Les zones analysées sont ici des tranches de 2-3 mm d'épaisseur. On constate que la carbonatation (accélérée) engendre une diminution significative de la porosité et une diminution du volume poreux essentiellement dans la zone correspondant à  $5 \le r_n \le$ 100 nm. Un autre exemple (B65) figure dans la référence [29].

Dans les BHP, l'effet de "peau" reste toutefois limité. Il semble peu préjudiciable visà-vis de la durabilité, dans la mesure où les modifications de la microstructure de la zone superficielle (fonction de la formulation, de la cure et des conditions environnementales) enregistrées sur ces bétons sont peu importantes (notamment pour ceux de la gamme  $R_{moy.28} > 90$  MPa, *i.e.* les BTHP) et où cet effet ne crée pas de macroporosité, comparativement à ce que l'on peut enregistrer sur les bétons ordinaires dans les mêmes conditions [13]. Les rayons de pores concernés sont en effet ici inférieurs à 100 nm.

# III.3 - Quantification de la microfissuration au microscope optique par analyse d'images

# III.3.1 - Technique mise en œuvre

Le réseau des microfissures (de la pâte) et les autres défauts de la microstructure des bétons (discontinuités d'interface pâte-granulat, zones microporeuses et bulles d'air) ont été mis en évidence par une technique d'imprégnation par une solution de colorant rouge [30] et ont été quantifiés par analyse d'images, sur des échantillons polis (disques). L'observation a été effectuée au microscope optique en lumière réfléchie. Des images obtenues sur deux des BHP étudiés (M75FS et M100FS) sont présentées dans les références [9] et [10]. Le système d'analyse d'images et la procédure qui ont été utilisés sont décrits dans les références [9], [10], [31] et [32] (méthode des projections totales automatisée). Le traitement d'images repose sur une reconnaissance des microfissures basée sur l'exploitation de l'information apportée par la couleur et sur une analyse individuelle de forme. A l'issue de l'analyse, les paramètres suivants ont été déterminés :

- la longueur spécifique (ou densité) de microfissures  $L_{\mu}$  (en mm/mm<sup>2</sup>),
- le degré d'orientation des microfissures (en %). Ce paramètre varie entre 0, pour une structure parfaitement isotrope, et 100 %, pour une structure parfaitement orientée,
- la proportion de surface saine (en %), calculée à partir du rapport entre le nombre de champs contenant des microfissures (densité non nulle) et le nombre de champs "sains" (densité nulle),
- la cartographie de microfissuration de l'ensemble de la surface traitée.

Des essais de répétabilité, effectués avec la technique décrite, ont conduit à un coefficient de variation sur  $L_{\mu}$  de l'ordre de 5 %, résultant des erreurs expérimentales. Concernant  $\mu$ , le coefficient de variation est de l'ordre de 15 % [31].

Une surface totale d'environ  $18,4 \text{ cm}^2$  située dans la zone centrale de chaque échantillon a été analysée. Elle a été découpée à cet effet en 2240 champs élémentaires jointifs de dimensions  $0,92 \times 0,92 \text{ mm}^2$ , au grossissement utilisé dans l'analyse (G = 80X). Les champs ont ensuite été recollés par un algorithme, après traitement de chacun d'entre eux.

#### III.3.2 - Longueurs spécifiques de microfissures (à l'état vierge)

Les longueurs spécifiques de microfissures obtenues pour les 15 bétons de l'étude sur sites naturels de vieillissement à l'âge de 28 jours après conservation dans l'eau (état vierge), sont présentées dans la figure 16 [10].

Les valeurs sont comprises entre 0,02 et 0,26 mm/mm<sup>2</sup>. Relativement à d'autres résultats obtenus avec la même technique, ces densités peuvent être considérées comme faibles et indicatives d'une microfissuration peu développée pour chacun des bétons testés. A titre d'illustration, une densité de l'ordre de 0,7 mm/mm<sup>2</sup> a été mesurée sur un béton de rapport E/C = 0,42 ayant subi un traitement thermique à T = 50 °C pendant 8 heures [31].

La figure 16 illustre en outre gu'il n'y a pas de relation directe entre la résistance moyenne à la compression à 28 jours ( $R_{moy,28}$ ) et la longueur spécifique de microfissures (L<sub>n</sub>). A titre d'exemple, le béton le moins microfissuré (M100FS) est un BHP et le béton le plus microfissuré (M75) est également un BHP. Le M25 est aussi "très" microfissuré et le M50CVEA présente très peu de microfissures. Les longueurs spécifiques de 0,26 mm/mm<sup>2</sup> et 0.21 mm/mm<sup>2</sup> mesurées respectivement sur le M75 et le M75FS, élevées par rapport aux autres valeurs, ne sont pas caractéristiques de cette gamme de bétons. Ces valeurs sont plutôt propres à ces formules particulières qui ont révélé certains problèmes rhéologiques et de stabilité à l'état frais, à l'origine de ressuage, d'hétérogénéités, d'une mauvaise qualité de parement et de la qualité très variable constatée sur les matériaux durcis suivant les gâchées [7]. La microfissuration initiale du béton M120FS est comparativement plus importante que celle du béton M100FS. Elle reste toutefois très limitée. En effet, une longueur spécifique de microfissures égale à  $L_{\mu} = 0.13 \text{ mm/mm}^2$  a été mesurée sur le béton M120FS, alors que pour le béton M100FS, on enregistre  $L_{tr} = 0.02 \text{ mm/mm}^2$ , qui est la valeur la plus basse mesurée sur l'ensemble des 15 formules (cf. Figure 16).

# III.3.3 - Cartographies de microfissuration (à l'état vierge)

L'ensemble des cartographies de microfissuration relatives aux 15 bétons indique une répartition spatiale plutôt homogène, avec toutefois dans la plupart des cas une concentration des défauts aux interfaces [9], [10]. Les valeurs de degré d'orientation obtenues, comprises entre 11 et 35 %, sont indicatives d'une microfissuration globalement peu orientée. Enfin, les proportions de surface saine, comprises entre 66 et 90 % confirment l'étendue limitée de la fissuration.

La figure 17 compare les cartographies de microfissuration du béton le plus microfissuré (M75 avec  $L_{\mu} = 0.26 \text{ mm/mm}^2$ ), du béton le moins microfissuré (M100FS avec  $L_{\mu} = 0.02 \text{ mm/mm}^2$ ) et d'un béton de densité de microfissures intermédiaire (M120FS avec  $L_{\mu} = 0.13 \text{ mm/mm}^2$ ). Il s'agit dans les trois cas de BHP. Sur le M75, on détecte nettement la présence de fissures aux interfaces pâte-granulat. Des fissures sont également présentes au sein de la pâte. Celles-ci sont toutefois très peu développées et elles apparaissent faiblement connectées dans le plan d'observation. Très peu de microfissures ont été détectées dans le béton M100FS, que ce soit aux interfaces pâte-granulat ou au sein de la pâte. La microfissuration du béton M120FS est bien répartie, mais très faiblement connectée. Elle se présente comme un micro-bullage.

#### III.3.4 - Remargues finales

Tous les résultats indiquent que, dans la gamme des BHP, la microfissuration (densité, orientation, répartition, connectivité, ...) à l'état vierge sera très dépendante des paramètres de formulation. La résistance moyenne à la compression à 28 jours aura peu d'influence.

Les bétons à hautes performances étudiés ici apparaissent très faiblement microfissurés à l'échéance considérée (28 jours), à l'état vierge (en l'absence de sollicitation), à l'échelle de l'observation et avec la technique employée. De plus, il semble que la microfissuration ne s'amplifie pas avec le temps. En effet, des prélèvements effectués à l'échéance de 2 ans sur les Ouvrages Jumeaux de Bourges ont montré que la microfissuration du B70FS était très faible ( $L_{\mu} = 0,01$ 

mm/mm<sup>2</sup>) par rapport à celle du B30 ( $L_{\mu} = 0,20 \text{ mm/mm}^2$ ) et ne présentait aucune orientation préférentielle [15]. Les fissures observées étaient très courtes et très fines et souvent liées aux interfaces pâte-granulat.

Néanmoins, il arrive de détecter la présence de microfissures dans des BHP âgés. On peut citer ici des observations réalisées par microscopie électronique à balayage environnementale, technique qui permet de détecter des microfissures non visibles par d'autres méthodes sans aucune altération du matériau [33]. Ces observations ont mis en évidence la présence de microfissures (d'ouverture inférieure à 0,3  $\mu$ m) dans des pâtes de ciment durcies à hautes performances (E/C = 0,25) âgées de 8-9 mois n'ayant subi aucun séchage exogène [33], [34]. Cette microfissuration (interne) est attribuable au retrait (endogène) d'autodessiccation, plus prononcé dans les matériaux à hautes performances (faible E/C, présence de fumées de silice, forte teneur en liant des bétons, ..., [35-38]) que dans les formules ordinaires.

En ce qui concerne les éventuelles microfissures superficielles d'origine externe (générées par retrait de dessiccation gêné [39]), leur ouverture va dépendre du potentiel de déformation du béton, lui-même fonction de la différence entre l'humidité relative du milieu environnant et l'humidité relative interne. Etant donné que les BHP sont très peu sensibles aux variations d'humidité relative dans une large plage [3], [37], [40], et qu'une hydratation différée (donc une cicatrisation des fissures) peut se produire aux très hautes HR ou au contact d'eau, on peut penser que la microfissuration superficielle n'aura pas un rôle préjudiciable vis-à-vis des propriétés de transport pour ces matériaux. En outre, la valeur de ces propriétés ne peut augmenter de façon notable que si les microfissures sont connectées dans la zone concernée. Ces aspects seront étudiés au § IV.

# IV - INDICATEURS DE DURABILITÉ

# IV.1 - Préambule

Les *indicateurs de durabilité* sont des paramètres, relatifs au matériau, fondamentaux pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité des ouvrages en béton [1].

Dans l'optique de la prévention de la corrosion des armatures du béton armé, les *indicateurs de durabilité généraux* porosité accessible à l'eau, perméabilité aux gaz, coefficient de diffusion apparent des ions chlorure et perméabilité à l'eau líquide, ainsi que *l'indicateur de substitution* coefficient d'absorption capillaire, ont été quantifiés sur une large gamme de bétons, dans le cadre de différentes études et recherches (cf. § I et II).

Le lecteur pourra se reporter notamment aux références [9], [10], [12], [17], [18] et [21] pour des informations plus détaillées relativement aux procédures expérimentales appliquées ou à l'analyse des résultats présentés dans les sections suivantes.

# IV.2 - Procédures expérimentales

#### IV.2.1 - Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau a été mesurée par pesée hydrostatique, suivant le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM [41], sur des rondelles ou des portions de rondelles de matériau, préalablement prélevées par sciage sous eau dans des cylindres. Les pesées ont été réalisées à la précision de 0,01 g.

#### IV.2.2 - Perméabilité apparente aux gaz

La perméabilité apparente aux gaz a été mesurée au moyen d'un dispositif à charge constante CEMBUREAU [42]. L'essai consiste à soumettre une éprouvette cylindrique, après préconditionnement, à une pression  $P_{entrée}$  constante de gaz (appliquée en entrée du système). La perméabilité apparente  $K_{app(gaz)}$  est déterminée à partir de la mesure en régime permanent du débit de gaz sortant à la pression atmosphérique. Les mesures ont été effectuées ici sur des disques de dimensions Ø150 x 50 mm, suivant le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM [23], [41]. Le gaz utilisé est l'oxygène, à  $P_{entrée} = 0,2$  MPa.

Les éprouvettes destinées aux mesures de perméabilité ont été préconditionnées de la façon suivante : saturation en eau sous vide, puis séchage en étuve ventilée à T =  $80 \pm 5$  °C pendant 28 jours, et enfin séchage en étuve ventilée à T =  $105 \pm 5$  °C jusqu'à stabilisation de la masse (*i.e.* écart inférieur à 0,05 % entre deux pesées espacées de 24 heures, à la précision de 0,01 g) [41]. Les valeurs de perméabilité apparente ainsi obtenues correspondent à un matériau "sec" (à l'issue de ce préconditionnement, le taux de saturation s sera supposé nul).

#### IV.2.3 - Coefficient de diffusion apparent des ions chlorure en conditions saturées

Le coefficient de diffusion apparent des ions chlorure en conditions saturées a été mesuré par un essai de migration sous champ électrique en régime non stationnaire. La procédure utilisée ici [12], [18] est celle proposée en 1992 par *Tang & Nilsson* [43], dont la reproductibilité a été démontrée [44], et qui fait désormais l'objet d'une procédure standardisée dans les pays Nordiques [45]. Cette méthode requiert notamment la détermination de la profondeur moyenne de pénétration des chlorures dans l'éprouvette testée, par une méthode colorimétrique [12], [46]. D'autres méthodes ont également été utilisées, selon l'étude concernée. L'essai a été réalisé sur des éprouvettes de dimensions Ø90 x 50 mm, étanchées sur leur pourtour par de la résine polyester.

#### IV.2.4 - Perméabilité à l'eau liquide

Dans le cas des bétons perméables et très perméables, la perméabilité à l'eau liquide peut être déterminée expérimentalement à partir d'un essai de perméabilité à l'eau sous pression, en s'inspirant par exemple des modalités définies dans la norme P 18-555 [47] relative aux produits spéciaux destinés aux réparations de surface du béton durci.

Par contre, dans le cas des bétons faiblement à très faiblement perméables (bétons ordinaires de bonne qualité et bétons à hautes et à très hautes performances), la mesure directe de la perméabilité à l'eau liquide est délicate et difficile à effectuer, voire impossible sans un dispositif expérimental sophistiqué. En outre, il ne semble pas y avoir de corrélation évidente entre perméabilité aux gaz et perméabilité à l'eau

liquide, valable sur une large gamme de bétons, qui permettrait de déduire une valeur de perméabilité à l'eau liquide à partir de la mesure de la perméabilité aux gaz, plus facile à réaliser. Il est donc nécessaire, dans le cas de ces bétons, d'avoir recours à des méthodes indirectes, analytiques ou numériques, faisant appel à d'autres expériences que l'essai au perméamètre [1].

La formule de Katz-Thompson (qui requiert des mesures par intrusion de mercure et de coefficient de diffusion [48]) et la méthode mixte combinant modèle et expérience, décrite dans les références [26] et [49] (qui requiert notamment des mesures de sorption), ont été utilisées ici, afin d'évaluer la perméabilité à l'eau liquide de différents bétons.

#### IV.2.5 - Coefficient d'absorption capillaire

L'essai permettant de déterminer le coefficient d'absorption capillaire consiste à mesurer par pesée, à des échéances déterminées, la masse d'eau absorbée par une éprouvette préalablement séchée en étuve (à T =  $80 \pm 5$  °C) et mise en contact avec de l'eau par une face. L'essai a été réalisé ici suivant le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM [41] sur des éprouvettes de dimensions Ø110 x 100 mm, sciées à partir de cylindres Ø110 x 220 mm à l'issue de la cure de 28 jours dans l'eau.

# IV.3 - Résultats expérimentaux obtenus sur éprouvettes conservées en laboratoire

### IV.3.1 - Porosité accessible à l'eau

Les valeurs moyennes de porosité accessible à l'eau ( $P_{eau}$ ) mesurées aux échéances de 28 et 45 jours après conservation dans l'eau en laboratoire sur différents bétons sont présentées dans la figure 18 en fonction de  $R_{moy.28}$ . Parmi ces données, celles correspondant aux bétons analysés dans le cadre du Projet National "*BHP 2000*" et de l'étude sur les ouvrages de la ligne SNCF *"TGV Méditerranée"* sont également reportées dans le tableau I. En outre, dans ce tableau, lorsque la valeur de l'indicateur de durabilité général  $P_{eau}$  faisait défaut pour certaines formules", la valeur de l'indicateur de substitution porosité accessible au mercure ( $P_{Hg}$ ) [1] a été fournie.

Les résultats présentés dans le tableau I et la figure 18 montrent que, dans le cas des formules sans agent entraîneur d'air, lorsque l'on passe des bétons bas de gamme ( $R_{moy.28}$  de l'ordre de 20-25 MPa) aux bétons ordinaires de bonne qualité, puis aux BHP, la porosité accessible à l'eau diminue. Plus précisément, pour les formules sans addition, quand le rapport E/C décroît, la porosité diminue. Avec un E/C moyen ou faible, lorsque l'on ajoute des cendres volantes ou des fumées de silice, la porosité diminue par rapport à une formule de résistance mécanique équivalente sans addition (même avec un E/C légèrement plus élevé). La porosité des BHP contenant des fumées de silice tels que  $R_{moy.28} > 90$  MPa (BTHP) est très faible. Celle-ci est strictement inférieure à 10 %.

On notera que l'effet de l'air entraîné, mis en évidence par les mesures par intrusion de mercure (cf. § III.2.4), n'est pas détecté par pesée hydrostatique. Ceci résulte probablement du fait que cette technique est trop globale (peu sensible au degré de

connectivité) et du fait que les bulles d'air (difficiles à saturer d'eau) ne sont pas prises en compte.

Il est possible de comparer les valeurs de  $P_{eau}$ , mesurées à 28 ou 45 jours sur l'échantillon de formules de bétons testé ici, aux classes de durabilité "potentielle" (très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée) proposées dans la référence [1] relativement à l'indicateur de durabilité général  $P_{eau}$  (mesuré à 90 jours). On constate alors que les BHP ont dans la plupart des cas une durabilité "potentielle" élevée, voire très élevée, sur la base de cet indicateur (cf. Tableau I et figure 18).

#### IV.3.2 - Perméabilité apparente aux gaz

Les valeurs moyennes de perméabilité apparente aux gaz  $K_{app(gaz)}$  (à s = 0), obtenues après conservation dans l'eau en laboratoire pendant 28 jours et préconditionnement (étuvage à T = 105 ± 5 °C, cf. § IV.2.2), sur les bétons analysés dans le cadre du Projet National *"BHP 2000"* et de l'étude sur les ouvrages de la ligne SNCF *"TGV Méditerranée"*, sont présentées dans la figure 19 en fonction de R<sub>mov.28</sub> et dans le tableau l.

La perméabilité apparente aux gaz (à s = 0) décroît de façon très marquée lorsque l'on passe des bétons bas de gamme aux bétons ordinaires de bonne qualité, puis aux BHP avec fumées de silice. On enregistre un écart de quasiment deux ordres de grandeur entre la perméabilité la plus élevée 978  $\cdot$  10<sup>-18</sup> m<sup>2</sup> (correspondant au béton M25) et la perméabilité la plus faible 17  $\cdot$  10<sup>-18</sup> m<sup>2</sup> (correspondant au béton M100FS). Cependant, la figure 19 montre que les résultats sont dispersés. Cette dispersion a au moins deux origines : la présence d'air entraîné et la microfissuration.

Le tableau I et la figure 19 mettent en évidence l'influence négative de la présence de bulles d'air entraîné sur la perméabilité aux gaz pour les BHP. Ainsi, les bétons M75EA et M75FSEA apparaissent particulièrement mal classés sur la base de la perméabilité apparente aux gaz (durabilité "potentielle" faible). L'effet de l'air entraîné est illustré par la présence du second mode poreux détecté autour de 10<sup>3</sup> nm sur la distribution des volumes poreux (cf. § III.2.4). En effet, la perméabilité apparente aux gaz augmente avec le degré de connectivité du réseau des vides. Or, celui-ci augmente en présence d'air entraîné de façon notable, et d'autant plus que le préconditionnement inhérent à la mesure de perméabilité est susceptible de générer des fissures. La ségrégation constatée sur M75EA et M75FSEA [12] peut aussi contribuer à expliquer les très fortes perméabilités enregistrées sur ces bétons.

Les microfissures présentes dans les échantillons de matériau (cf. § III.3), initialement non connectées, peuvent être amplifiées par le préconditionnement inhérent aux mesures de perméabilité aux gaz (lors du séchage à  $T = 80 \pm 5$  °C et surtout à  $T = 105 \pm 5$  °C). Elles peuvent ainsi créer un cheminement préférentiel pour l'oxygène, susceptible de contrôler le transfert du gaz sous gradient de pression totale. La première conclusion à tirer de cela est que les valeurs de perméabilité aux gaz mesurées pour un degré de saturation nul (*i.e.* après étuvage à  $T = 105 \pm 5$  °C), et présentées dans le tableau I et la figure 19, sont représentatives de matériaux microfissurés. Ensuite, le classement des bétons en fonction de leur densité de microfissuration à l'état initial (vierge) (cf. § III.3.2) et le possible accroissement de la microfissuration lors du préconditionnement peuvent expliquer que la perméabilité du

#### Les spécificités des bétons à hautes performances Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles

béton M100FS soit légèrement inférieure à celle du M120FS, alors que ce dernier a une résistance mécanique plus élevée, résultant notamment d'un rapport E/C plus faible et d'une teneur en ciment et en fumées de silice plus grande. Ceci peut également expliquer les "fortes" valeurs de perméabilité enregistrées sur les bétons M75 et M75FS et leur moins bon classement (durabilité "potentielle" moyenne), comparativement à celui établi sur la base de la résistance mécanique. Tous ces résultats mettent en évidence l'effet négatif de la microfissuration sur la perméabilité apparente aux gaz, mesurée selon le mode opératoire AFPC-AFREM. Ces déductions sont corroborées par la littérature. Différents auteurs ont en effet montré que la perméabilité aux gaz mesurée sous chargement mécanique était sensible à l'apparition et à l'ouverture des microfissures (voir par exemple les travaux réalisés sur des mortiers et rapportés dans la référence [50], ou encore l'état de l'art figurant dans les références [1], [51] ou [52]). Néanmoins, il s'avère que les valeurs de perméabilité aux gaz obtenues ici sur les BHP avec fumées de silice (sans air entraîné) avec Rmov.28 > 90 MPa sont particulièrement faibles (durabilité "potentielle" élevée ou très élevée, cf. Tableau I et figure 19), indiguant que la microfissuration de ces matériaux reste certainement faiblement connectée, y compris après le préconditionnement. Ce dernier point est en accord avec les travaux déjà publiés sur les BHP [4], [53].

IV.3.3 - Coefficient de diffusion apparent des ions chlorure en conditions saturées

Les valeurs moyennes de coefficient de diffusion apparent des chlorures mesuré par un essai de migration sous champ électrique en régime non stationnaire ( $D_{ns(mig)}$ ), à l'échéance de 28 jours après conservation dans l'eau en laboratoire, sur les bétons analysés dans le cadre du Projet National *"BHP 2000"* et de l'étude sur les ouvrages de la ligne SNCF *"TGV Méditerranée"*, sont présentées dans la figure 20 en fonction de R<sub>moy.28</sub> et dans le tableau I. En outre, dans ce tableau, lorsque la valeur du coefficient de diffusion  $D_{ns(mig)}$  mesuré par essai de migration à 28 jours faisait défaut pour certaines formules, la valeur de  $D_{ns(dif)}$ , obtenue par essai de diffusion en régime non stationnaire à l'échéance de 90 jours a été fournie [21].

On enregistre une diminution du coefficient de diffusion de deux ordres de grandeur, lorsque l'on passe des bétons bas de gamme aux BHP avec fumées de silice. Les valeurs extrêmes sont ici  $30,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  pour le M25 et  $0,04 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  pour le M120FS. Dans le cas du coefficient de diffusion, on observe une meilleure corrélation entre ce paramètre et la résistance à la compression, comparativement aux résultats obtenus avec la perméabilité aux gaz. En particulier, on mesure un coefficient de diffusion plus faible pour le M120FS, comparativement au M100FS (contrairement à la perméabilité aux gaz), mais la différence d'environ un ordre de grandeur enregistrée entre ces deux bétons n'est sans doute pas significative, vu les très faibles valeurs enregistrées. Le coefficient de diffusion apparent des chlorures est nettement réduit quand des fumées de silice sont incorporées dans la formule avec un faible E/C (cf. Tableau I). Cet effet a déjà largement été reporté dans la littérature (voir par exemple [54] ou [55]) et résulte de l'effet "filler" et de la réaction pouzzolanique (cf. § I.2 et [12]).

L'air entraîné ne semble pas avoir d'influence systématique sur le coefficient de diffusion (cf. Tableau I et figure 20). Ce résultat est conforme à la littérature, bien que les résultats disponibles où les bétons ont été comparés à résistance mécanique

équivalente soient rares. Par exemple, *Nilsson et al.* ont également constaté que l'air entraîné avait peu d'influence sur le coefficient de diffusion des chlorures calculé à partir de profils mesurés *in situ* [56]. Le processus de diffusion en conditions saturées est en effet limité par les pores les plus fins présents dans la microstructure, même si un réseau macroporeux co-existe (généré par l'entraîneur d'air, cf. § III.2.4, ou correspondant à une microfissuration, cf. § III.3.2), ce dernier étant en outre difficile à saturer par la phase liquide à température ambiante.

La comparaison des valeurs de coefficient de diffusion, obtenues à 28 jours sur l'échantillon de formules de béton étudié ici, avec les classes de durabilité "potentielle" proposées dans la référence [1] montre que les BHP ont dans la plupart des cas une durabilité "potentielle" élevée voire très élevée, sur la base de cet indicateur (cf. Tableau I et figure 20).

# IV.3.4 - Perméabilité à l'eau liquide

L'application de la formule de *Katz-Thompson* donne les valeurs de perméabilité intrinsèque à l'eau liquide suivantes, pour des bétons conservés 3 à 6 mois sans échange hydrique avec le milieu environnant avant les mesures [26] :

- de l'ordre de 90 · 10<sup>-20</sup> m<sup>2</sup> pour des bétons de type B20 (dont le M25),
- de 0,8 · 10<sup>-20</sup> m<sup>2</sup> (0,3 · 10<sup>-20</sup> m<sup>2</sup> par la méthode mixte décrite dans la référence [49]) pour un béton de type B40 référencé BO (CEM I 52,5 ; E/C=0,49 ; R<sub>moy.28</sub> = 49,4 MPa et P<sub>eau</sub> = 12,2 %),
- de 0,003  $\cdot$  10<sup>-20</sup> m<sup>2</sup> (0,05  $\cdot$  10<sup>-20</sup> m<sup>2</sup> par la méthode mixte) pour un BHP avec fumées de silice référencé BHFS (CEM I 52,5 ; E/C=0,27 ; FS/C=0,10 ; R<sub>moy.28</sub> = 115,5 MPa et P<sub>eau</sub> = 8,2 %).

Des résultats sur pâtes de ciment durcies à hautes performances figurent en outre dans les références [3], [25] et [26]. Les valeurs de perméabilité intrinsèque à l'eau liquide sont comprises entre :

- 0,06 et  $0.5 \cdot 10^{-20}$  m<sup>2</sup>, pour E/C = 0,30,
- 0,003 et  $0,02 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ , pour E/C = 0,20 (et avec FS/C = 0,10).

Ces résultats illustrent que la perméabilité à l'eau liquide des BHP est très faible, et nettement plus faible que celle des bétons ordinaires, quelle que soit la méthode de détermination. Sur la base de l'indicateur perméabilité à l'eau liquide, ces matériaux ont donc une durabilité "potentielle" très élevée [1].

# IV.3.5 - Coefficient d'absorption capillaire

Les valeurs moyennes de coefficient d'absorption capillaire (après 24 heures d'essai), mesuré à l'âge de 28 jours après conservation dans l'eau en laboratoire, sur les bétons étudiés dans le cadre du Projet National *"BHP 2000"*, sont présentées dans la figure 21 en fonction de R<sub>moy.28</sub>.

Il apparaît que l'incorporation d'agent entraîneur d'air ou d'additions pouzzolaniques réduit le coefficient d'absorption capillaire, à résistance mécanique équivalente. L'effet de l'air entraîné sur le coefficient d'absorption capillaire peut s'expliquer par le fait que les bulles d'air, difficiles à saturer, gênent la progression d'une phase liquide

continue dans le matériau initialement "sec", et donc la progression du front d'absorption capillaire. L'incorporation d'additions minérales pouzzolaniques, quant à elle, augmente la tortuosité du réseau des pores (cf. § I.2 et [12]) et rend donc les transferts liquides plus difficiles.

# IV.4 - Effet du vieillissement

Il a été mentionné au § III.2.5 que la microstructure des BHP se densifiait au cours du temps, après conservation dans l'eau ou *in situ*. Il paraît utile d'examiner maintenant l'effet du vieillissement sur les indicateurs de durabilité mesurés sur les BHP.

Pour le béton M75FS, une porosité accessible à l'eau de 10,0 % a été mesurée après 45 jours de conservation dans l'eau et une valeur de 8,4 % a été mesurée après 4 ans d'exposition sur les sites de Melun et de Maurienne, par la même méthode, sur une carotte incluant le parement (cf. Tableau II). Cette évolution est en accord avec la tendance enregistrée sur les résistances mécaniques. Il a en effet été constaté que les résistances mécaniques sur sites étaient nettement supérieures à celles mesurées en laboratoire à 28 et 90 jours pour ce béton [7], [13]. Une diminution moins nette de la porosité a été enregistrée sur le béton ordinaire M50 (14,7 % à 45 jours et 14,1 % après 4 ans d'exposition sur le site de Melun, cf. Tableau II).

A l'échéance de 2 ans, des perméabilités aux gaz égales à 800 · 10<sup>-18</sup> m<sup>2</sup> et à 48 · 10<sup>-18</sup> m<sup>2</sup> ont été mesurées pour les bétons B30 et B70FS, respectivement, des Ouvrages Jumeaux de Bourges (carottes incluant le parement). En ce qui concerne le coefficient de diffusion des chlorures (D<sub>ns(mig)</sub>), les valeurs 3,1-3,5 · 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> et 0,77-1,2 · 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> ont été enregistrées pour les bétons B30 et B70FS, respectivement, à la même échéance (échantillons prélevés à cœur) (cf. Tableau II) [15]. On constate que, pour le B70FS, les valeurs in situ de perméabilité aux gaz et de coefficient de diffusion des chlorures sont plus faibles que les résultats obtenus sur éprouvettes en laboratoire, après 28 ou 90 jours de conservation dans l'eau (cf. Tableau II). La perméabilité du béton ordinaire B30 a par contre augmenté. L'évolution de la microstructure (par exemple, grains de Hadley, cf. § III) et de la microfissuration (cf. § III.3.4), au cours du temps, de même que l'influence de la mise en œuvre du béton in situ, peuvent être à l'origine de ces résultats. De même que pour les résultats figurant dans la référence [53] et obtenus en conditions de laboratoire, il semble donc que la forte autodessiccation (et la microfissuration résultante éventuelle) des BHP n'engendre pas d'augmentation de la perméabilité aux gaz au cours du temps en conditions naturelles.

On déduit de ces résultats que le vieillissement des matériaux, qui se traduit majoritairement par une augmentation de la compacité, est bénéfique pour les BHP vis-à-vis des indicateurs de durabilité, y compris *in situ*, excepté éventuellement dans la zone très superficielle ayant subi un séchage précoce. Cette dernière est en effet susceptible de présenter de légèrement moins bonnes caractéristiques (cf. § III.2.6).

#### IV.5 - Synthèse : durabilité "potentielle" globale des bétons étudiés

La durabilité "potentielle" globale des différents bétons étudiés dans le cadre du Projet National "BHP 2000" et de l'étude sur les ouvrages de la ligne SNCF "TGV *Méditerranée*", évaluée sur la base de la combinaison (avec poids équivalent) des indicateurs de durabilité généraux porosité, perméabilité apparente aux gaz et coefficient de diffusion apparent des chlorures, mesurés à 28 ou 45 jours, est indiquée dans le tableau I (voir aussi les autres exemples de combinaison figurant dans les références [8], [11] ou [12]). On met en évidence, d'après cette qualification, l'excellente qualité des BHP, dont la plupart présente une durabilité "potentielle" élevée. Certains B60 ont une durabilité "potentielle" moyenne, tandis que les BHP avec fumées de silice tels que  $R_{moy.28} > 90$  MPa (BTHP) ont plutôt une durabilité "potentielle" très élevée.

Les 15 bétons de l'étude sur sites naturels de vieillissement (cf. § I et II) ont été classés dans le tableau III sur la base de différentes propriétés, mesurées sur éprouvettes en laboratoire après 28 ou 45 jours de conservation dans l'eau :

- R<sub>moy.28</sub>,
- indicateurs de durabilité généraux (porosité accessible à l'eau, perméabilité apparente aux gaz à s = 0 et coefficient de diffusion apparent des chlorures), indicateur de substitution coefficient d'absorption capillaire (après 24 heures d'essai),

ou mesurées de façon non destructive après un an d'exposition *in situ* (sur le site de Melun) :

- "perméabilité" de surface, par le dispositif BT CRIS.

On observe, pour chaque propriété, un bon classement des BHP, y compris *in situ*. Le fait que l'on observe un classement différent pour chaque propriété met en évidence la complémentarité des indicateurs, permettant d'aboutir à une qualification globale des formules de béton vis-à-vis de la protection des armatures, par exemple (voir également [1], [8], [11], [12]).

Les tableaux I et III synthétisent l'effet du E/C, de l'agent entraîneur d'air, des cendres volantes, de la fumée de silice, de la teneur en liant et de la microfissuration.

Par exemple, si l'on examine l'ensemble des résultats dans le détail, il ressort que l'influence (négative) de la présence d'air entraîné, vis-à-vis de la perméabilité, est prépondérante devant l'influence du rapport E/C (ou des additions minérales pouzzolaniques), et l'effet négatif se manifeste également *in situ* : les BHP M75EA et M75FSEA sont mal classés sur la base de  $K_{app(gaz)}$  et de la "perméabilité" de surface. L'augmentation du degré de connectivité du réseau des vides et son impact sur la perméabilité (à l'eau liquide ou aux gaz) est l'une des fonctions que l'on recherche en générant un réseau de bulles d'air dans le béton, pour le prémunir contre les effets néfastes des cycles de gel-dégel (cf. § VI). Cependant, on déduit des résultats expérimentaux présentés ici que cet effet peut s'avérer préjudiciable pour la durabilité relative à d'autres processus que le gel.

L'effet (négatif) de la microfissuration, vis-à-vis de la perméabilité aux gaz, est prépondérant devant l'effet du rapport E/C (ou des additions minérales pouzzolaniques). Cependant, l'effet enregistré ici semble bien résulter en grande partie du préconditionnement inhérent à la mesure en laboratoire (étuvage à T = 105  $\pm$  5 °C, selon les recommandations AFPC-AFREM), dans la mesure où le mauvais

classement des bétons M75 et M75FS observé en laboratoire n'est pas reproduit *in situ* (cf. Tableau III). Par ailleurs, il a été évoqué précédemment que le séchage exogène accentuait l'ouverture des microfissures dans la zone superficielle (cf. § III.3.4). Cependant, dans le cas des BHP, la fissuration superficielle ne concerne qu'une très faible profondeur (voir par exemple l'épaisseur concernée par le séchage en figure 22). Donc, on peut penser que dans la pratique, les conséquences de la fissuration superficielle du béton d'enrobage sur la perméabilité aux gaz resteront limitées.

Les conséquences de la fissuration superficielle du béton d'enrobage sur la perméabilité à l'eau liquide seront a fortiori limitées, en raison de la fermeture des fissures et de possibles phénomènes de cicatrisation (liés à une poursuite de l'hydratation, à la dissolution et à la re-précipitation d'hydrates tels que Ca(OH)<sub>2</sub>, à la formation de CaCO<sub>3</sub>, ...) aux très hautes humidités relatives ou en présence d'eau liquide [33], [34], [85-87].

Vis-à-vis du coefficient de diffusion des chlorures, l'influence (bénéfique) des additions minérales pouzzolaniques est prépondérante devant celle du rapport E/C et de la présence d'air entraîné. Les additions pouzzolaniques telles que les fumées de silice apparaissent par conséquent bénéfiques pour la protection des armatures visà-vis de la corrosion induite par les chlorures, en tout cas en conditions saturées. L'influence d'une microfissuration superficielle vis-à-vis du coefficient de diffusion des chlorures restera très limitée dans le cas des BHP pour la même raison que celle qui vient d'être évoquée pour la perméabilité aux gaz. De plus, d'après la littérature, le coefficient de diffusion n'est pas une propriété très sensible à l'ouverture des (micro)fissures (sensibilité d'ordre 1, contre 3 environ pour la perméabilité, cf. l'état de l'art figurant dans la référence [1]). Par exemple, Tognazzi et al. [57] ont montré que le coefficient de diffusion de l'eau tritiée ne variait pas lorsque les microfissures, provoquées par un chargement mécanique en compression, devenaient nombreuses mais restaient déconnectées. Ce coefficient augmentait d'un facteur 2, dans le cas de fissures connectées d'ouverture 100 µm. De même, d'après la référence [58], il apparaît que lorsque la microfissuration (provoquée par un chargement mécanique en compression) reste limitée, celle-ci n'a pas d'influence sur le transfert des chlorures (quantifié au moyen de la quantité d'électricité mesurée au cours d'un essai de migration sous champ électrique en conditions saturées). On notera toutefois que dans la référence [85], l'influence de l'état de microfissuration (générée ici par des cycles de gel-dégel) sur le comportement de bétons (E/C = 0,40) soumis à un essai de migration sous champ électrique en conditions saturées peut devenir significative.

L'effet des additions pouzzolaniques sur le coefficient d'absorption capillaire semble prépondérant devant celui du rapport E/C.

Au total, on retiendra en particulier que l'incorporation d'un agent entraîneur d'air dans la composition des BHP accroît de façon notable la connectivité du réseau des vides. Cependant, seule la perméabilité aux gaz est augmentée par cet effet. L'effet négligeable observé sur le coefficient de diffusion des chlorures et l'effet bénéfique enregistré sur le coefficient d'absorption capillaire (ce dernier décroît) semblent indiquer que la présence de bulles d'air entraîné ne sera pas préjudiciable vis-à-vis de la protection des armatures. La carbonatation et la pénétration des chlorures ou de l'oxygène dans le béton sont en effet régis par des processus de diffusion (ou d'absorption capillaire en conditions non saturées, dans le cas des chlorures).

# <u>V - TÉMOINS DE DURÉE DE VIE VIS-A-VIS DE LA CORROSION DES</u> ARMATURES DU BÉTON ARMÉ

# V.1 - Préambule

La corrosion des armatures du béton armé peut être initiée par la carbonatation du béton (entraînant une baisse du pH) ou par la pénétration des chlorures (voir par exemple l'état de l'art figurant dans la référence [1]).

La réaction de carbonatation de Ca(OH)<sub>2</sub> peut s'écrire de la façon simplifiée suivante (3) :

 $\begin{array}{rrrr} Ca(OH)_2 & + & CO_2 & \rightarrow & CaCO_3 & + & H_2O \end{array} \tag{3} \\ (béton "sain") & (environnement) & (béton carbonaté) \\ pH = 12,6 \rightarrow 13,5 & pH \leq 9 \end{array}$ 

De plus, des transferts hydriques interviennent de façon concomitante avec les transferts de CO<sub>2</sub> et/ou d'ions chlorure au sein du béton.

Les témoins de durée de vie, tels que profils hydriques, de carbonatation, de concentration en chlorures, ..., constituent donc les données pertinentes indispensables pour le suivi *in situ* des structures en béton armé et l'évaluation de leur durabilité (résiduelle) [1].

Dans l'optique de la prévention de la corrosion des armatures du béton armé, ces témoins de durée de vie ont été mesurés sur des prélèvements effectués in situ à des échéances données, dans le cadre de différentes études (cf. § I et II).

Le lecteur pourra se reporter notamment aux références [7] et [13] pour des informations plus détaillées relativement aux procédures expérimentales appliquées ou à l'analyse des résultats présentés dans les sections suivantes.

# V.2 - Procédures expérimentales

# V.2.1 - Profils hydriques déterminés par gammadensimétrie

Des mesures par gammadensimétrie ont été effectuées sur des carottes incluant la surface exposée, afin de déterminer le profil hydrique régnant *in situ* au moment du prélèvement (que l'on supposera semblable à celui mesurable à réception des carottes). Le principe et le mode opératoire de cet essai non destructif sont décrits dans la référence [23].

# V.2.2 - Profondeur et profils de carbonatation

# V.2.2.1 - Profondeur carbonatée mesurée par phénolphtaléine

La profondeur carbonatée a été mesurée par une méthode dérivée du mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM [41]. A cet effet, des carottes (Ø 50 mm) ont été prélevées sur les corps d'épreuve ou sur les ouvrages et ont été coupées en deux par fendage, perpendiculairement à la surface exposée. Une solution de phénolphtaléine diluée à 1 % dans l'alcool a été pulvérisée sur les fractures fraîches

ainsi obtenues, après humidification. La zone de virage de cet indicateur incolore est 9 < pH < 10. On obtient une coloration rose lorsque pH > 10 (béton non carbonaté) et la surface reste incolore quand pH < 9 (béton carbonaté). Ceci permet de révéler la limite entre ces deux zones ("front" de carbonatation), lorsqu'elle existe, et d'en déduire la profondeur carbonatée de la carotte.

## V.2.2.2 - Profils de teneurs en Ca(OH)<sub>2</sub> résiduelle et en CO<sub>2</sub> de carbonatation déterminés par ATG

Les profils de teneurs en portlandite Ca(OH)<sub>2</sub> résiduelle et en CO<sub>2</sub> de carbonatation ont été déterminés par analyses thermogravimétriques (ATG) [59]. Le dispositif expérimental utilisé, la méthode d'essai et le mode d'exploitation des résultats sont décrits dans la référence [23]. Les échantillons destinés aux analyses thermogravimétriques ont été préparés, à partir de tranches sciées à différentes profondeurs dans les carottes, en privilégiant les morceaux contenant une forte proportion de pâte de ciment. Ces morceaux ont ensuite été broyés manuellement. La prise d'essai est de l'ordre de 200 mg.

# V.2.3 - Profils de concentration en chlorures déterminés par analyse chimique

Des prélèvements destinés à la détermination des profils de concentration en chlorures ont été effectués, selon la méthode décrite dans la référence [41], sur les sites soumis au marnage (La Rochelle), aux embruns (Pont de l'Ile de Ré) ou aux sels de déverglaçage (Maurienne et Canada, par exemple). Le dosage des chlorures dans les échantillons de béton prélevés a été réalisé par analyse chimique (potentiométrie), selon les modes opératoires décrits dans les références [23], [60] ou [61].

# V.3 - Résultats expérimentaux obtenus sur prélèvements effectués in situ

# V.3.1 - Profils hydriques

Les profils de taux de saturation obtenus par gammadensimétrie sur des carottes prélevées sur les corps d'épreuve après 4 ans d'exposition sur le site de Melun sont présentés en figure 22a pour différentes formules de béton. Les profils obtenus sur des BHP (M75FS de Melun et de Maurienne après 4 ans, et B60FS du tablier du Pont de l'Ile de Ré après 14 ans) sont présentés en figure 22b. Les "accidents" ponctuels apparaissant sur les profils peuvent être attribués aux hétérogénéités des carottes.

Le séchage naturel du béton à partir de la surface exposée aux conditions environnementales (parement), ainsi que les caractéristiques microstructurales résultantes et leur gradient en fonction de la profondeur (cf. § III.2.6), expliquent la diminution du taux de saturation en zone superficielle sur une épaisseur variable selon la formule. Plus un matériau est poreux, plus il est sensible aux conditions environnementales (notamment aux cycles d'humidification-séchage) et est influencé par ces cycles sur une épaisseur importante et plus son état de saturation va donc dépendre du site. Ainsi, les BHP tels que, par exemple, les bétons M75FS (porosité accessible à l'eau *in situ* égale à 8,4 %) et B60FS (porosité de 10,8 %) sont très peu sensibles aux conditions environnementales : à une profondeur donnée, les valeurs de taux de saturation, obtenues dans différents environnements (sites de Melun et de Maurienne, et Pont de l'Ile de Ré) et à différentes échéances, sont très proches.

Les BHP conservent au cours du temps un taux de saturation très élevé même en zone superficielle (0,80-0,85 en "peau" et 0,95-1 à cœur), y compris sur le site de Melun (HR<sub>moy.</sub>ext. = 77-80 %) (cf. Figure 22b).

## V.3.2 - Profondeur et profils de carbonatation

# V.3.2.1 - Profondeur carbonatée

La figure 23 compare les valeurs moyennes (assorties de barres d'erreur) de profondeur carbonatée mesurée par phénolphtaléine, obtenues après 4 ans d'exposition sur les sites de Melun, La Rochelle et de Maurienne (côté chaussée et côté talus). Seules les formules sans air entraîné sont communes à ces trois sites.

La figure 23 montre que la profondeur carbonatée  $X_{carbo.}$  est globalement bien classée suivant la résistance moyenne à la compression mesurée en laboratoire à 28 jours :  $X_{carbo.}$  décroît lorsque  $R_{moy.28}$  augmente. On n'enregistre qu'une très faible carbonatation sur les BHP, quelles que soient les conditions d'environnement, après 4 ans d'exposition ( $X_{carbo.} \leq 1 \text{ mm}$ ), à l'exception du M75FSEA de Maurienne qui se carbonate légèrement dès la première échéance de mesure ( $X_{carbo.} \approx 2 \text{ mm}$ ). La profondeur carbonatée "notable" du M75FSEA est cohérente avec la résistance mécanique mesurée sur ce corps d'épreuve (64,6 MPa à l'âge d'un an [13]). Cette résistance est inférieure à celle escomptée (et mesurée sur éprouvettes de laboratoire, cf. Tableau I) et place le matériau de ce corps d'épreuve en limite basse des BHP.

Les bétons M75 et M100FS restent exempts de carbonatation sur les 3 sites. De même, aucune carbonatation n'a été décelée, avec les mesures par phénolphtaléine, sur les BHP des autres environnements aux différentes échéances considérées : les bétons B60 et B80FS des ouvrages SNCF à 2 ans, le B70FS des Ouvrages Jumeaux à 3 ans, les bétons M75, M75FS et M100FS des corps d'épreuve installés sur le site du Canada à 4 ans.

En ce qui concerne le B60FS du tablier du Pont de l'Ile de Ré à l'échéance de 14 ans, aucun "front" de carbonatation n'a également été décelé. En poussant plus loin l'analyse, seules quelques franges carbonatées, très localisées et très superficielles, ont pu être observées par test colorimétrique (phénolphtaléine ou AqNO<sub>3</sub> + K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> [14]) (cf. Figures 24a et 24c). Ces franges ont certainement été générées par des microfissures superficielles, visibles au microscope optique et dont la profondeur ne dépasse pas 10 mm [14] (cf. Figures 24b et 24d). On peut déduire de ces observations que la microfissuration superficielle est susceptible de jouer le rôle de chemin préférentiel pour le gaz CO<sub>2</sub>. Ces résultats expérimentaux sont en accord avec ceux obtenus sur un B60 en laboratoire (essai de carbonatation accélérée) et présentés dans la référence [62]. Ces derniers résultats montraient l'existence d'un seuil de densité de microfissures, au-dessous duquel Xcarbo. = 0 et au-dessus duquel X<sub>carbo</sub>, était une fonction linéaire de la densité de microfissures. Néanmoins, étant donné que ce phénomène reste très local et très superficiel dans le béton B60FS étudié ici, il ne sera pas préjudiciable vis-à-vis de la protection des armatures. La durabilité de l'ouvrage à long terme n'est pas remise en guestion.

#### Les spécificités des bétons à hautes performances Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles

# V.3.2.2 - Profils de teneurs en Ca(OH)<sub>2</sub> résiduelle et en CO<sub>2</sub> de carbonatation

Les profils de carbonatation (teneurs en portlandite  $Ca(OH)_2$  résiduelle et en  $CO_2$  de carbonatation), mesurés par ATG sur une carotte de béton B60FS prélevée après 14 ans d'exposition *in situ* sur le tablier du Pont de l'Ile de Ré, sont présentés en figure 25a. Les résultats sont normalisés par rapport à la teneur en  $CO_2$  des granulats de l'échantillon prélevé à cœur (2,27 %).

La détermination du profil est importante car elle permet une quantification plus précise de l'état de carbonatation, et pas seulement l'estimation d'un "front", dont la traduction en terme de teneur en Ca(OH)<sub>2</sub> peut varier d'un matériau à un autre [13]. Le profil permet en particulier la quantification d'une carbonatation partielle. Cette détermination est d'autant plus utile pour prévoir la durabilité des BHP que, comme nous venons de le voir, dans la plupart des cas, une profondeur carbonatée nulle est déduite des mesures par l'indicateur pH-métrique (phénolphtaléine).

Un gradient de carbonatation en fonction de la profondeur est mis en évidence sur la figure 25a : une teneur en Ca(OH)<sub>2</sub> résiduelle de 1,25 % et de 2,07 % (par rapport à la masse de béton sec) est mesurée en "peau" (moyenne enregistrée entre 0 et 5 mm) et à cœur, respectivement, alors qu'aucun front n'avait été détecté par phénolphtaléine (cf. § V.3.2.1).

Une très faible carbonatation est donc mise en évidence sur ce BHP âgé de 14 ans. Tout d'abord, la teneur en  $CO_2$  diminue en fonction de la profondeur et on n'enregistre quasiment plus de carbonatation au-delà de 10 mm. De plus, la portlandite est consommée à moins de 50 % en zone superficielle (sur les 5 premiers millimètres). A titre de comparaison, la portlandite est complètement consommée sur une profondeur de 8 mm sur le M25 du site de Melun, à l'échéance de 4 ans (cf. Figure 25b). En outre, l'aspect très superficiel des franges carbonatées observées (cf. § V.3.2.1) laisse penser qu'aucune corrosion initiée par carbonatation n'est à craindre pour l'ouvrage (enrobage minimum des armatures : 40 mm).

#### V.3.2.3 - Synthèse

Les résultats présentés confirment à moyen ou long terme la très bonne résistance à la pénétration du  $CO_2$  des BHP et montrent que les bétons avec fumées de silice conservent au cours du temps une réserve basique suffisante, y compris en "peau", malgré la réaction pouzzolanique entre  $Ca(OH)_2$  et les fumées de silice et contrairement à certains bétons ordinaires.

Trois caractéristiques, spécifiques aux BHP, sont à l'origine de ces résultats :

- la portlandite se présente majoritairement sous forme de petits cristaux disséminés dans la microstructure, difficilement accessibles [2], [3],
- le matériau est très dense (et les effets de "peau" sont limités),
- le taux de saturation est très élevé (cf. § V.3.1).

Les deux derniers points limitent la progression du CO<sub>2</sub> au sein du matériau [1], [13]. De plus, le processus de carbonatation lui-même est particulièrement auto-protecteur dans le cas des BHP. En particulier, lorsque le béton est carbonaté, le volume des pores capillaires est significativement plus faible (cf. § III.2.6).

#### V.3.3 - Profils de concentration en chlorures

Les profils de concentration en chlorures totaux, mesurés sur les corps d'épreuve après 4 ans d'exposition sur le site de La Rochelle (zone de marnage), sont présentées en figure 26. Les concentrations sont exprimées en g pour 100 g d'échantillon de béton sec.

On constate que tous les bétons à hautes performances présentent un profil monotone décroissant (du type "diffusion pure"), indiquant notamment que la zone d'influence des cycles d'humidification-séchage a une très faible épaisseur (< 5 mm) dans ces bétons et que par conséquent cette influence n'est pas détectable sur les profils mesurés. Dans les BHP, le séchage ne concerne en effet qu'une très faible épaisseur (cf. Figure 22), vu la faible porosité et la finesse du réseau poreux (cf. Figures 11 et 14). Les profils des autres bétons présentent un maximum témoignant de l'influence des cycles d'humidification-séchage jusqu'à cette profondeur.

Malgré une concentration élevée en surface, les profils obtenus mettent en évidence la plus faible pénétration *in situ* des ions chlorure dans les bétons à hautes performances, en particulier dans les bétons M100FS et M120FS. Ces deux derniers bétons se distinguent en effet par une profondeur de pénétration très faible et par des concentrations très faibles à une profondeur donnée dans la zone où les chlorures ont pénétré. Par exemple, la concentration en chlorures totaux est inférieure à 0,005 g, pour 100 g de béton sec, pour M100FS et M120FS au-delà de 15-20 mm sur ce site de la Rochelle.

De même, des concentrations en chlorures très faibles ont été mesurées dans les BHP sur les autres sites. Ainsi, sur le site de vieillissement du Canada à l'échéance de 4 ans, la concentration en chlorures totaux était inférieure à 0,005 g (pour 100 g de béton sec) au-delà d'une profondeur de 12 mm, à l'exception des deux corps d'épreuve en béton M75 en zone fissurée (où les valeurs 0,029 et 0,044 g ont été enregistrées). Au-delà d'une profondeur de 25 mm, la concentration était inférieure à 0,005 g (pour 100 g de béton sec) pour tous les corps d'épreuve (M75, M75FS et M100FS). De façon analogue, après 14 ans, sur le tablier en B60FS du Pont de l'Ile de Ré, les chlorures n'ont pénétré que sur une profondeur inférieure à 10 mm. Dans cette zone superficielle (0-10 mm), la concentration en chlorures "libres" était inférieure à 0,005 g, pour 100 g de béton sec. Au droit du premier lit d'armatures (profondeur : 40 mm), la concentration en chlorures "libres" était inférieure à 0,005 g, pour 100 g de béton sec.

L'influence de la fissuration sur la pénétration des chlorures *in situ* dépend naturellement des caractéristiques du béton, des fissures et de l'environnement. On trouve ainsi dans la littérature que la présence de fissures peut ne pas modifier le processus de pénétration des chlorures (concentration à une profondeur et à une échéance données). C'est le cas des résultats publiés par *Relling & Sellevold* [88] et obtenus à partir d'analyses au MEB sur des échantillons de béton prélevés sur un ouvrage en zone de marnage. Dans une autre référence [89], et de façon similaire aux résultats expérimentaux relatifs à la carbonatation présentés dans ce document (cf. § V.3.2), une pénétration très localisée des chlorures par absorption capillaire en laboratoire a été observée dans un béton avec E/C = 0,25 (au moyen d'une microsonde électronique et par colorimétrie) le long de fissures, sans que toutefois le
profil de concentration en chlorures ne soit modifié. L'influence de la fissuration sur la pénétration des chlorures dans les bétons de plus fort E/C était par contre beaucoup plus importante [89]. Ces données sont en accord avec les résultats expérimentaux obtenus sur le site de vieillissement du Canada qui semblent indiquer une influence de la fissuration limitée à la zone superficielle pour le profil du M75, et aucune influence de la fissuration pour les bétons M75FS et M100FS.

Les résultats expérimentaux présentés ici confirment *in situ* (zones de marnage ou exposées aux projections de sels) que les BHP ont une meilleure aptitude que les bétons ordinaires à limiter la pénétration des chlorures. De manière analogue à la carbonatation, aucune corrosion induite par les chlorures n'est à craindre dans un avenir proche pour les structures en BHP considérées. En effet, au droit du premier lit d'armatures (l'enrobage des armatures est de 40 mm pour le tablier du Pont de l'Ille de Ré, et l'enrobage réglementaire est de 50 mm pour les corps d'épreuve des sites de La Rochelle, de Maurienne et du Canada), la concentration en chlorures est inférieure à la concentration "critique" généralement admise pour dépassiver l'acier ([Cl<sub>libres</sub>]<sub>crit.</sub> = 0,4 % par rapport à la masse de ciment, soit 0,06-0,08 % par rapport à la masse de béton, pour les BHP considérés).

Les synthèses bibliographiques figurant dans les références [4] et [6] illustrent en outre le bon comportement des BHP vis-à-vis de la pénétration des chlorures *in situ*, dans d'autres types d'environnement marin (notamment dans les pays Nordiques et au Japon).

# VI - COMPORTEMENT SOUS CYCLES DE GEL-DÉGEL AVEC OU SANS SELS

Le lecteur pourra se reporter notamment aux références [12] et [13] pour des informations plus détaillées relativement aux procédures expérimentales appliquées ou à l'analyse des résultats présentés dans les sections suivantes.

# VI.1 - Procédures expérimentales

# VI.1.1 - Facteur d'espacement des bulles d'air

Le facteur d'espacement des bulles d'air  $L_{barre}$  (µm), demi-distance moyenne séparant deux bulles d'air voisines, a été évalué selon la norme *ASTM C 457* [63] par la méthode modifiée de comptage de points, sur des plaques polies, au microscope à binoculaire (grossissement = 100X). Les diamètres de bulles à partir de 10 µm sont pris en considération avec cette technique.

Les spécifications, relatives à ce paramètre, permettant d'assurer la résistance au gel des bétons (d'étude ou de convenance) formulés avec agent entraîneur d'air, sont données dans les *Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel* [22] : L<sub>barre</sub>  $\leq 200 \ \mu m$  en présence de sels et L<sub>barre</sub>  $\leq 250 \ \mu m$  pour les environnements sans sels.

# VI.1.2 - Évaluation de la résistance aux cycles de gel-dégel sans sels (gel interne) en laboratoire

La résistance aux cycles de gel-dégel sans sels a été évaluée en laboratoire à partir de la mesure de l'allongement relatif et de la fréquence de résonance de prismes soumis à un essai de gel-dégel. Cet essai (300 cycles de 6 heures) se déroule en enceinte climatique, selon la norme française *P 18-424* [64] (gel dans l'eau à -18 ± 2 °C et dégel dans l'eau à +10 ± 2 °C), après conservation dans l'eau des éprouvettes pendant 28 jours.

Un béton d'étude (ou de convenance) est dit résistant aux cycles de gel-dégel sans sels (gel interne), sur la base de l'essai réalisé selon la norme P 18-424, si les conditions suivantes sont simultanément remplies [22] :

- (f<sup>2</sup><sub>1</sub>/f<sup>2</sup><sub>0</sub>) x 100 ≥ 75, où f<sub>0</sub> est la fréquence de résonance initiale (avant cycles) et f<sub>1</sub> est la fréquence de résonance mesurée à l'issue des 300 cycles,
- $\Delta\lambda\lambda \leq 400 \ \mu m/m$ , où  $\Delta\lambda\lambda$  est l'allongement relatif à l'issue des 300 cycles.

# VI.1.3 - Évaluation de la résistance aux cycles de gel-dégel avec sels (écaillage) en laboratoire

La résistance à l'écaillage a été évaluée en laboratoire à partir de la mesure de la masse cumulée d'écaillage (en g.m<sup>-2</sup>) d'éprouvettes soumises à un essai de geldégel (56 cycles consécutifs de gel-dégel de 24 heures entre +20 et -20 °C) au contact d'une solution de NaCI (dosée à 30 g.L<sup>-1</sup>), en enceinte climatique (essai d'écaillage). Le préconditionnement des éprouvettes et l'essai d'écaillage ont été effectués selon la norme française *XP P 18-420* [65] (les éprouvettes étant initialement âgées de 28 jours).

Un béton d'étude (ou de convenance) est dit résistant à l'écaillage (sur la base de l'essai réalisé selon la norme *XP P 18-420*), si la masse cumulée d'écaillage à l'issue des 56 cycles est inférieure ou égale à 600 g par  $m^2$  de surface exposée, selon [22].

# VI.2 - Résultats expérimentaux obtenus en laboratoire et in situ

<u>VI.2.1 - Résistance aux cycles de gel-dégel sans sels (gel interne) en laboratoire</u> L'allongement relatif (valeurs moyennes sur 3 éprouvettes) mesuré après 300 cycles de gel-dégel en laboratoire, selon la procédure décrite au § VI.1.2, est présenté en fonction du facteur d'espacement des bulles d'air en figure 27, pour différents bétons.

L'effet bénéfique de l'incorporation d'air entraîné est clairement mis en évidence ici sur toute la gamme des bétons testés (cf. Figure 27, zone ① du graphique), confirmant une fois de plus le rôle fondamental des caractéristiques du système de bulles d'air sur le comportement au gel. En particulier, des valeurs négatives d'allongement relatif (retrait) ont été enregistrées avec les bétons M50EA, M50CVEA et M75EA [12].

Tous les BHP sans air entraîné étudiés ici, excepté les bétons BG60FS et M100FS (cf. Figure 27, zone ③ du graphique), résistent à l'essai de gel selon la norme *P* 18-424 (cf. Figure 27, zone ② du graphique). On retrouve ici que, dans la plupart des cas, les BHP ne nécessitent pas le recours à un agent entraîneur d'air pour présenter

un bon comportement vis-à-vis des cycles de gel-dégel selon la norme *P 18-424*. On observe cependant des exceptions, notamment quand les bétons contiennent des fumées de silice. On pourra se reporter également aux résultats expérimentaux obtenus dans le cadre d'une étude spécifique au comportement au gel des BHP du Projet National *"BHP 2000"* [66]. La série de BHP avec fumées de silice étudiée dans cette dernière étude résistait néanmoins systématiquement aux cycles de gel-dégel selon la norme *P 18-425* (gel dans l'air - dégel dans l'eau [67]). Cet essai correspond à des conditions moins sévères que celles relatives à la norme *P 18-424*.

#### VI.2.2 - Résistance aux cycles de gel-dégel avec sels (écaillage) en laboratoire

La masse cumulée d'écaillage de bétons à hautes performances sans air entraîné (avec ou sans fumées de silice), déterminée conformément à la procédure décrite au § VI.1.3, est présentée en figure 28, en fonction du nombre de cycles de l'essai accéléré normalisé d'écaillage (cycles de gel-dégel en présence de sels réalisés selon la norme *XP P 18-420*) (voir également les courbes relatives aux autres BHP étudiés, données dans la référence [12]). Les valeurs correspondent à la médiane, c'est-à-dire à la moyenne des deux valeurs restant après avoir éliminé les deux valeurs extrêmes obtenues pour les quatre éprouvettes testées. La masse cumulée d'écaillage de différents bétons étudiés, obtenue à l'issue des 56 cycles, est reportée dans la figure 29, en fonction du facteur d'espacement des bulles d'air.

Sur les six bétons formulés avec agent entraîneur d'air et vérifiant  $L_{barre} \leq 200 \ \mu$ m, la masse cumulée d'écaillage obtenue au terme des 56 cycles est conforme aux spécifications (inférieure à 600 g.m<sup>-2</sup> [22]) pour quatre d'entre eux seulement (cf. Figure 29, zone <sup>①</sup> du graphique). Toutefois, la valeur obtenue sur les deux autres bétons concernés (M25EA et M75EA) ne dépasse le seuil de masse cumulée d'écaillage que légèrement (cf. Figure 29).

La résistance, sur la base de l'essai accéléré normalisé d'écaillage, des BHP sans air entraîné peut être très bonne (voir par exemple les synthèses bibliographiques figurant dans les références [4], [66], [68], [69], [70] ou [71]). C'est le cas par exemple ici des bétons BG60FS, BM80, M120FS et BHFS (présentés dans la figure 29, zone <sup>(2)</sup> du graphique) et des bétons BD60 et BD80 (présentés dans la figure 28). Cependant, la résistance n'est pas systématique. Ainsi, les bétons M75, BD60FS et BM80FS sont en limite supérieure, le béton M100FS présente un comportement variable suivant les gâchées (voir l'analyse proposée dans la référence [12]), et les valeurs particulièrement élevées obtenues pour les bétons M75FS et BD70FS (2189 et 1848 g.m<sup>-2</sup>, respectivement) témoignent que l'on peut même enregistrer un mauvais comportement pour certains BHP (cf. Figure 28 et figure 29, zone <sup>(3)</sup> du graphique).

Ces résultats illustrent que lorsque E/liant  $\geq 0,30$ , le comportement des BHP sans air entraîné est très dépendant de la formulation. Des conclusions similaires ont été rapportées dans la littérature (voir par exemple [4], [66], [68], [71], [72] ou [73]). On note par exemple un effet négatif des fumées de silice. En effet, lorsque l'on compare des formules de BHP sans air entraîné (dans la gamme B60-B80 et vérifiant E/C  $\geq$ 0,30), avec et sans fumées de silice, on constate dans la plupart des cas que la résistance aux cycles de gel-dégel (notamment en présence de sels) chute de façon notable en présence de fumées de silice, pour un même niveau de résistance

mécanique (cf. Figure 28). Le même type de résultat a été rapporté dans la littérature dans le cas de fortes teneurs en fumées de silice [74]. De même qu'avec les cendres volantes [12], mais à un degré moindre vu les guantités concernées, les tailles des particules et la haute réactivité des fumées de silice, l'influence négative des fumées de silice vis-à-vis du comportement au gel (avec sels) des B60 et B80 sans air entraîné peut s'expliquer tout d'abord par le fait que les particules de fumées de silice aui n'ont pas encore réaci sont susceptibles de constituer par exemple des défauts qui facilitent l'amorce de fissures (et qui accroissent la dispersion des résultats d'essai). De plus, la formation d'agglomérats de particules de fumées de silice dans certains cas [75], [76], notamment lorsque les particules ont été mal dispersées lors du malaxage du mélange, peut accroître cet effet. surtout lorsque la teneur en fumées de silice est importante. En outre, des produits du type gel d'alcali-réaction sont susceptibles de se développer à partir de ces acqlomérats, ces produits étant eux-même une source potentielle de gonflement et de fissuration (comme illustré sur les images obtenues au MEB, figurant dans les références [3], [25], [26], [38] et [76]). Il a d'ailleurs été rapporté dans la littérature que la densité de microfissures de pâtes à hautes performances, observées par MEB environnementale, augmentait quand la teneur en fumées de silice substituée à une partie du ciment augmentait [34]. Outre l'influence des fumées de silice. les nombreuses hétérogénéités, constatées sur la série des bétons M75, peuvent avoir contribué au mauvais comportement à l'écaillage enregistré ici pour le béton M75FS. De facon plus générale, la (faible) auantité des vides de grandes dimensions (bulles, micro-bulles, microfissuration) et leur répartition peuvent fortement varier d'une éprouvette à l'autre. Cette variabilité est à même de conduire à des résultats d'essais dispersés. On peut ajouter que les pores de la gamme de tailles existant majoritairement dans ces BHP, de même que les zones poreuses que sont les interfaces pâte-granulat, peuvent induire ou non la formation de glace à -10 °C (par germination hétérogène suivie d'une propagation d'un front de glace [69]) en quantité suffisante pour conduire à des dégradations au cours des tests normalisés (voir les températures imposées lors des cycles aux § VI.1.2 et VI.1.3). Cela dépendra de la formulation du béton, ainsi que des propriétés physiques et de la composition chimique des constituants.

Les bétons à (très) hautes performances sans air entraîné, vérifiant R<sub>mov 28</sub> > 90 MPa et E/liant < 0,30 (ici M120FS, BHFS et BM80), ont guant à eux systématiguement un bon comportement lors de l'essai accéléré normalisé d'écaillage, malgré un fort Lbarre (cf. Figure 29, zone 2 du graphique). Les résultats sont là encore cohérents avec la littérature. Ce bon comportement peut s'expliquer notamment par la très faible teneur en eau gelable de ces bétons [3], [4], [66], Ces matériaux ont en effet un volume poreux dans le domaine des capillaires très réduit, un réseau de pores très fin (cf. Figure 11 et [3]) et une humidité relative interne inférieure à 100 % (voir [3], [37] et § VII.2.1). Ce demier point résulte non seulement de l'autodessiccation [37], mais également du fait qu'il est très difficile de saturer des éprouvettes de ces bétons après une phase de séchage telle que celle appliquée lors du préconditionnement relatif à l'essai accéléré normalisé d'écaillage (cf. § VI.1.3). La compacité du matériau et la faible perméabilité à l'eau résultante réduisent en effet la pénétration d'eau à une couche très superficielle. Le caractère fondamental de l'influence du taux de saturation sur le comportement au gel est connu de longue date [72], [77], [78]. Par ailleurs, dans cette gamme de bétons, la présence de fumées de silice n'est plus préjudiciable vis-à-vis de la résistance aux cycles de gel-dégel. En effet, quand E/C

devient très faible, les hétérogénéités locales deviennent négligeables devant la compacité et l'homogénéité globales de la matrice [3], [10], [12].

#### VI.2.3 - Synthèse du comportement au gel des BHP évalué en laboratoire

L'efficacité de l'incorporation d'air entraîné dans le matériau est moins systématique en présence de sels (cf. § VI.2.2). Donc, parmi les six bétons avec agent entraîneur d'air vérifiant les spécifications sur le paramètre  $L_{barre}$  [22], seuls les quatre bétons M25CVEA, M50EA, M50CVEA et M75FSEA résistent à la fois aux cycles de geldégel selon la norme *XP P 18-420* et selon la norme *P 18-424*. On notera cependant que le béton M25CVEA est résistant malgré un rapport E/liant > 0,45 et l'incorporation de 26 % de cendres volantes (par unité de masse de ciment), mettant par-là en évidence l'influence prépondérante du paramètre agent entraîneur d'air (et  $L_{barre}$ ) par rapport au paramètre E/C (ou E/liant) et à la présence de cendres volantes (à la teneur considérée : environ 25 %), vis-à-vis de la résistance aux cycles de geldégel en présence ou non de sels.

Parmi les sept BHP sans air entraîné testés à la fois à l'essai de gel-dégel selon la norme *XP P 18-420* et selon la norme *P 18-424*, seules les formules vérifiant R<sub>moy.28</sub> > 90 MPa et E/liant < 0,30 résistent à ces deux essais, gel interne et écaillage (il s'agit de BM80 et M120FS, le béton BHFS n'ayant pas été testé au gel interne, cf. Figures 27 et 29, zone @ des graphiques et tableau IV).

# VI.2.4 - Dégradations dues au gel et aux projections de sels de déverglaçage sur le site de Maurienne - Comparaison avec les résultats de l'essai accéléré normalisé d'écaillage réalisé en laboratoire

Le classement des 15 bétons de l'étude sur sites naturels de vieillissement établi sur la base de l'écaillage des parements constaté *de visu* sur le site de Maurienne (côté chaussée), aux échéances de 3, 4 et 6 ans, est donné dans le tableau V [13]. A l'échéance de 6 ans, un certain nombre de corps d'épreuve présents sur le site sont écaillés. Certains le sont déjà moyennement ou fortement ; c'est le cas de la série des M25 sans air entraîné et du M30CV. Vient ensuite la série des M50 et celle des M25 avec air entraîné, notamment les bétons contenant des cendres volantes. Les bétons à hautes performances ne sont pas écaillés jusqu'à l'échéance de 4 ans, mais à l'échéance de 6 ans, on constate que le béton M75FS commence légèrement à se dégrader. Les bétons M75 et M100FS, qui se situaient à la limite lors de l'essai accéléré normalisé d'écaillage réalisé en laboratoire (cf. § VI.2.2 et [12]), ne sont pas dégradés *in situ* aux échéances considérées.

La comparaison des classements des bétons basés sur l'écaillage observé, d'une part, en laboratoire lors de l'essai accéléré normalisé, et d'autre part, *in situ*, semble montrer une bonne cohérence (cf. Tableau V). Il semble qu'*in fine*, ce soient bien les mêmes formules qui se dégradent dans les deux cas. Néanmoins, seules les formules qui se sont révélées les plus sensibles à l'issue des mesures en laboratoire se dégradent *in situ* aux échéances considérées (jusqu'à 6 ans). Ainsi, par exemple, comme évoqué précédemment, la plupart des BHP ne se dégrade pas. Toutefois, étant donné que les bétons M75EA et M75FS évoluent respectivement de 2 et 3 classes de dégradation entre 7 et 56 cycles d'essai accéléré, on peut s'attendre à ce que le M75EA commence à se dégrader dans peu de temps, comme l'a fait le M75FS au bout de 6 ans. On constate de plus que le classement après quelques cycles d'essai accéléré normalisé correspond plutôt bien à celui obtenu après environ 5 ans *in situ*. L'essai accéléré normalisé semble donc bien jouer son rôle : le classement qu'il fournit est pertinent et il permet de discriminer rapidement les bétons.

## VII - COMPORTEMENT VIS-A-VIS D'AUTRES AGRESSIONS - EXEMPLES POUR L'ATTAQUE ACIDE ET L'ALCALI-RÉACTION

# VII.1 - Comportement vis-à-vis de l'attaque acide

Une solution acide est un liquide chimiquement agressif vis-à-vis du béton durci (pH de la phase interstitielle ≈ 13,5). Au cours d'une attaque acide, l'acide réagit avec la portlandite qui est dissoute, puis avec les autres hydrates (notamment les C-S-H) qui sont décalcifiés [2], [79]. La nocivité de l'attaque acide dépend essentiellement de la solubilité du sel formé par réaction avec la portlandite. Dans le cas de l'acide acétique, on peut écrire la réaction chimique simplifiée suivante (4) :

$$2 CH_3 COOH + Ca(OH)_2 \rightarrow Ca(CH_3 COO)_2 + 2 H_2 O$$
(4)

Du fait que le sel formé dans ce cas (acétate de calcium) est très soluble dans l'eau, la porosité augmente alors et l'on observe une altération des propriétés du béton. La variation de porosité dépend notamment de la quantité de portlandite initialement présente dans le béton. L'acide lactique, issu par exemple de l'industrie agroalimentaire, fonctionne également sur ce modèle.

De nombreuses études, et en particulier les données rassemblées et les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre du Projet National *"BHP 2000"* [4], [5], illustrent que les BHP ont une meilleure résistance à l'attaque acide que les bétons ordinaires. Dans le cadre du Projet National *"BHP 2000"*, la résistance a été évaluée sur la base d'un essai accéléré réalisé avec une solution simulant les liquides qui peuvent être rencontrés dans le milieu agricole. Ce "jus agricole" était une solution de pH = 4 composée d'acide lactique et d'acide acétique [80]. Après 175 jours d'immersion dans cette solution, la perte relative de masse de bétons B80 (CEM I 52,5 ; E/C = 0,36 ; FS/C = 0,06 et R<sub>c28</sub> = 68 MPa) et (CEM V 42,5 ; E/C = 0,28 et R<sub>c28</sub> = 79 MPa) n'excédait pas 0,5 % (résultats comparables pour les deux B80), alors qu'elle était supérieure à 1,0 % pour un B25 (E/C = 0,77 et R<sub>c28</sub> = 21 MPa) et qu'elle était de l'ordre de 0,8 % pour un B40 (E/C = 0,48 et R<sub>c28</sub> = 53 MPa) [80].

L'altération qui a lieu au cours de l'attaque acide est la conjonction de deux processus [79] :

- un transport de matière par diffusion, engendré par les gradients de concentration entre la solution interstitielle du béton et la solution agressive,
- des réactions chimiques de dissolution-précipitation, provoquées par les variations de concentration résultant de la diffusion.

La meilleure résistance des BHP testés s'explique donc essentiellement par l'effet combiné, en premier lieu du faible E/C (induisant une forte compacité et donc un faible coefficient de diffusion ionique), et ensuite de l'incorporation de fumées de silice (accroissant encore la compacité et induisant une très faible quantité de

portlandite résiduelle) ou de l'utilisation d'un ciment CEM V dont l'hydratation ne produit pas de portlandite.

#### VII.2 - Comportement vis-à-vis de l'alcali-réaction

Deux effets vont impliquer un bon comportement des BHP vis-à-vis de réactions différées délétères d'origine interne telles que l'alcali-réaction : l'effet "protecteur" d'une faible teneur en eau initiale et l'effet "inhibiteur" ou "ralentisseur" des fumées de silice.

#### VII.2.1 - L'effet "protecteur" d'une faible teneur en eau initiale

D'après la littérature (voir par exemple les synthèses figurant dans [1] et [81]), l'alcaliréaction est clairement favorisée par la présence d'eau : les apports d'eau, sous forme liquide ou vapeur, déterminent très directement la gravité des manifestations macroscopiques de l'alcali-réaction. En effet, la présence d'une phase liquide favorise la mobilité des ions impliqués dans l'alcali-réaction et le gonflement est d'autant plus grand que la quantité d'eau au moment de la formation des produits de réaction est importante.

Or, tout d'abord les BHP sont formulés avec un faible E/C (*i.e.* une faible teneur en eau initiale). Ensuite, les processus d'hydratation consomment une part importante de cette phase liquide initiale. De plus, ceux-ci se produisant dans des conditions de déficit en eau (du fait de la faible teneur en eau initiale), ils génèrent une autodessiccation qui conduit à court terme à une humidité relative interne (HR<sub>int.</sub>) strictement inférieure à 100 % au sein du matériau. Par exemple, pour le béton BHFS (cf. § IV.3.4) conservé sans échange hydrique avec l'environnement, HR<sub>int.</sub>  $\approx$  80 % (respectivement, HR<sub>int.</sub>  $\approx$  70 %) au bout de 28 jours (respectivement, au bout d'un 1 an) [3], [37] (voir également [90]). En outre, il a été montré au § IV que les valeurs des indicateurs de durabilité (K<sub>liq</sub>, C<sub>a</sub>, …) relatives aux BHP étaient faibles et décroissaient au cours du temps, quelles que soient les conditions environnementales. Les éventuelles pénétrations d'eau seront donc restreintes à une zone très superficielle dans ces matériaux.

Tous ces éléments indiquent qu'il y a peu de risques de développement d'alcaliréaction dans les BHP.

#### VII.2.2 - L'effet "inhibiteur" ou "ralentisseur" des fumées de silice

Il a été mentionné au § VI.2.2 que des produits de type gel d'alcali-réaction étaient susceptibles de se développer à partir d'agglomérats de fumées de silice. Cependant, ces zones restent très localisées et ne présentent donc pas de risque de dégradation du matériau à l'échelle macroscopique et encore moins de la structure.

Par contre, l'effet "inhibiteur" ou "ralentisseur" des fumées de silice vis-à-vis de l'alcali-réaction, notamment lorsqu'elles sont bien dispersées, a été mis en évidence à l'échelle macroscopique (mesure de l'expansion longitudinale en laboratoire) à de nombreuses reprises sur différents types de formules, même si cet effet n'est pas systématiquement très marqué (voir par exemple la synthèse bibliographique figurant dans [4], ou les résultats expérimentaux figurant dans [1]). Parmi les résultats récents, on peut citer ici l'exemple d'un béton ordinaire très expansif (teneur en alcalins de 4 kg.m<sup>-3</sup> [82]). L'incorporation de 10 % (respectivement 20%) de fumées de silice dans cette formule a fait chuter l'expansion longitudinale mesurée en

laboratoire selon la norme *NF P 18-454* [1], [83] de 96 % (respectivement 98 %) à l'échéance de 6 mois. De même, l'incorporation de 10 % (respectivement 20%) de fumées de silice a fait chuter l'expansion longitudinale de 91 % (respectivement 94 %) à l'échéance d'un an.

On déduit donc de ces éléments qu'une alcali-réaction a peu de chances de se développer, ou qu'elle sera au moins ralentie, dans des bétons contenant des furnées de silice.

### VII.2.3 - Conclusions

Au total, les formules de BHP contenant des fumées de silice, qui cumulent les deux facteurs favorables qui viennent d'être décrits, présentent des risques très réduits de développer une alcali-réaction (ou une autre réaction d'origine interne). Ces formules garantissent donc une bonne prévention vis-à-vis de ces réactions différées délétères.

Un exemple est présenté en figure 30. Il s'agit de l'expansion longitudinale mesurée en fonction du temps en laboratoire au cours de l'essai selon la norme *NF P 18-454* [83], pour les formules B65 (CEM I 52,5 et E/C = 0,33) et B65FS (CEM I 52,5; E/C = 0,36 et FS/C = 0,10) du Pont sur le Rhin [91], contenant des granulats réactifs du Rhin et une faible teneur en alcalins (2 kg.m<sup>-3</sup>) [84]. Le béton étant toutefois peu réactif, peu de différences sont enregistrées dans ce cas entre les déformations finales obtenues avec et sans fumées de silice.

# VIII - SYNTHÈSE ET CONCLUSION GÉNÉRALE

# VIII.1 - Synthèse des principaux résultats relatifs à la protection des armatures contre la corrosion assurée par les BHP

Les résultats expérimentaux exposés dans ce document mettent en évidence que les bétons à hautes performances ont une microstructure particulièrement dense. Ils présentent une porosité faible et un réseau poreux très fin (l'essentiel du volume poreux correspond à des rayons de pores inférieurs à 30 nm à cœur et à 100 nm en "peau"). Ces caractéristiques sont le résultat notamment d'un faible E/C et de l'incorporation éventuelle de fumées de silice dans la formule de ces bétons. De plus, tous les BHP étudiés présentaient, après 28 jours de conservation dans l'eau, une microfissuration limitée.

Ces caractéristiques confèrent aux BHP une plus grande aptitude (que les bétons ordinaires) à limiter la carbonatation et la pénétration des chlorures. Dans les structures en béton armé, l'enrobage en BHP sera donc particulièrement efficace pour protéger sur une longue période les armatures contre la corrosion (barrière physique et chimique).

Les résultats relatifs aux indicateurs de durabilité mesurés sur éprouvettes conservées dans l'eau en laboratoire ou *in situ* et ceux relatifs aux témoins de durée de vie (profils) mesurés *in situ* à moyen ou long terme sur des corps d'épreuve ou sur des ouvrages de différents âges et dans différents environnements, confirment les propriétés améliorées et le meilleur comportement des bétons à hautes

performances. Tous les résultats indiquent pour les BHP une durabilité "potentielle" élevée et en particulier une très bonne résistance aux agents agressifs d'origine externe : la pénétration des chlorures et la carbonatation sont limités à une zone très superficielle. Cette durabilité a également été confirmée par les mesures non destructives qui ont été réalisées sur le parement des corps d'épreuve ou des ouvrages. Celles-ci ont en particulier montré que les armatures étaient passivées (mesures de potentiel d'électrodes), avec un faible risque de corrosion (mesure de densité de courant instantané de corrosion ou de vitesse de corrosion et de résistivité du béton d'enrobage) et que la "perméabilité" à l'air de surface (méthode BT CRIS) des BHP était pratiquement nulle.

Sur les BHP, les gradients de propriétés entre le cœur et la zone superficielle ("peau"), ainsi que la microfissuration superficielle (due notamment au retrait de dessiccation gêné), ne concernent qu'une très faible profondeur (< 10 mm). Aucun effet négatif, aux échéances considérées ici, n'a été observé sur les propriétés relatives à la durabilité. Ces gradients et cette microfissuration ne seront donc pas préjudiciables vis-à-vis de la protection des armatures. Les données obtenues pourront toutefois contribuer à l'optimisation des procédures de cure, en fonction de la formulation du béton et des conditions environnementales.

De plus, il a été montré que le vieillissement était bénéfique, quelles que soient les conditions environnementales, étant donné que la compacité des BHP augmentait au cours du temps, mais pas la microfissuration. On retiendra en outre que les BHP avec fumées de silice conservent au cours du temps une réserve basique suffisante (y compris en "peau").

# VIII.2 - Synthèse du comportement des BHP sous cycles de gel-dégel avec ou sans sels

Pour les formules de BHP avec agent entraîneur d'air et avec E/liant  $\geq$  0,30 (B60-B80) (avec ou sans fumées de silice), la durabilité aux cycles de gel-dégel, au-moins sans sels, semble assurée avec un réseau de bulles d'air approprié (cf. Tableau IV).

Pour les formules de BHP sans agent entraîneur d'air et avec E/liant  $\ge 0,30$  (B60-B80), les résultats expérimentaux présentés dans ce document, de même que la littérature, montrent qu'il est difficile de prévoir de façon générale le comportement à l'écaillage. Celui-ci semble être très dépendant de la composition du béton. En particulier, l'incorporation de fumées de silice semble accroître les risques de dégradation. Dans l'état actuel des connaissances, et tant que les indicateurs de durabilité spécifiques au gel et les critères correspondant n'ont pas été clairement définis (voir les suggestions figurant dans [8] et [12]), il est donc nécessaire de vérifier la résistance au cas par cas (au moyen de l'essai accéléré normalisé d'écaillage).

Les formules de BHP vérifiant  $R_{moy.28} > 90$  MPa et E/liant < 0,30 (BTHP) ont une très faible teneur en eau gelable. Pour ces formules, l'incorporation d'un agent entraîneur d'air apparaît inutile et la durabilité aux cycles de gel-dégel avec ou sans sels est assurée. Le recours à ces formules de béton constitue donc une solution pertinente pour assurer la durabilité aux cycles de gel-dégel sans et avec sels, tout en évitant un ajout d'entraîneur d'air.

# VIII.3 - Conclusion générale

En conclusion, les différentes études et recherches relatives à la durabilité, rapportées dans ce document, contribuent à une connaissance précise du comportement des bétons à hautes performances.

Les BHP (avec fumées de silice) vérifiant  $R_{moy.28} > 90$  MPa et E/liant < 0,30 (BTHP) présentent la meilleure aptitude, en conditions de laboratoire, ainsi qu'à moyen ou long terme dans les différents types d'environnement étudiés, à limiter les transferts de gaz, de liquides ou d'ions potentiellement agressifs pour le béton ou l'acier, ou à résister au gel et aux sels, comparativement aux bétons ordinaires ou aux bétons à hautes performances de catégorie inférieure. Néanmoins, les B60 et les B80 présentent également de très bonnes propriétés qui garantiront une bonne durabilité aux ouvrages dans des conditions normales de fonctionnement. Ainsi, le choix d'un B60, B80, B90, ..., pour la construction d'un ouvrage, dépendra notamment de la durée de vie spécifiée et du type d'environnement [1].

Le meilleur comportement des BHP, mis en évidence en laboratoire et *in situ* par rapport à des formules plus classiques, fournit des arguments solides pour prescrire des BHP en vue d'assurer une durée de vie plus longue aux ouvrages en béton armé (ou précontraint) et/ou en vue d'éviter bon nombre de pathologies (alcali-réaction, lixiviation par les liquides chimiquement agressifs, ...).

# **IX - RÉFÉRENCES**

- [1] Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction - Etat de l'art et guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, Documents Scientifiques et Techniques de l'Association Française de Génie Civil (sous la direction de V. Baroghel-Bouny, AFGC, juin 2004), 252 p.
- [2] Les Bétons à Hautes Performances, vol. 2 : Caractérisation, durabilité, applications, (sous la direction d'Y. Malier, Presses de l'ENPC, Paris, 1992).
- [3] BAROGHEL-BOUNY (V.), Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, Analyse, Interprétations (LCPC, Paris, 1994), 468 p.
- [4] Synthèse des connaissances sur la durabilité des Bétons Hautes Performances, Rapport du Projet National BHP 2000, oct. 1997, 128 p.
- [5] Les bétons à hautes performances Bilan du Projet National BHP 2000, La Collection de l'IREX, à paraître.
- [6] De LARRARD (F.), BAROGHEL-BOUNY (V.), Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI<sup>e</sup> siècle. I - Généralités et caractéristiques mécaniques initiales des bétons, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 225, mars-avril 2000, pp 51-65.
- [7] BAROGHEL-BOUNY (V.), Etude expérimentale sur sites de vieillissement -Programme de suivi des corps d'épreuve en béton armé - Résultats obtenus sur prélèvements aux premières échéances de mesure - Comparaison avec les résultats obtenus sur éprouvettes, Projet National BHP 2000 - Thème 1 : Durabilité, Rapport LCPC, janv. 1999, 47 p.
- [8] BAROGHEL-BOUNY (V.), CARCASSES (M.), QUENARD (D.), ARNAUD (S.), Durability of concretes ranging from 20 to 120 MPa - Mix-parameter influence, Proceedings of 5<sup>th</sup> International Symposium on Utilization of High Strength / High Performance Concrete, june 20-24, 1999, Sandefjord, Norway, (Ed. by I. Holand & E.J. Sellevold, 1999), vol. 2, pp 1377-1386.
- [9] BAROGHEL-BOUNY (V.), GAWSEWITCH (J.), AMMOUCHE (A.), HORNAIN (H.), Etude expérimentale sur sites de vieillissement - Caractérisation microstructurale sur éprouvettes en laboratoire des bétons M25 à M120FS, à l'âge de 28 jours, Projet National BHP 2000 - Thème 1 : Durabilité, Sous-thème : Etude expérimentale sur sites de vieillissement - Rapport LCPC/LERM, avril 1999, 37 p.
- BAROGHEL-BOUNY (V.), AMMOUCHE (A.), HORNAIN (H.), GAWSEWITCH (J.), Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI<sup>e</sup> siècle.
   II - Caractérisation microstructurale sur éprouvettes de bétons de résistance 25 à 120 MPa, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 228, sept.-oct. 2000, pp 71-86.
- [11] BAROGHEL-BOUNY (V.), De LARRARD (F.), In place durability assessment for the next millenium - Long-term study, Proceedings of the 5<sup>th</sup> CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, june 4-9, 2000, Barcelona, Spain, SP-192 (Ed. by V.M. Malhotra, ACI, 2000), vol. I, SP 192-20, pp 319-338.
- [12] BAROGHEL-BOUNY (V.), ARNAUD (S.), HENRY (D.), CARCASSES (M.), QUENARD (D.), Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI° siècle. III - Propriétés de durabilité des bétons mesurées sur éprouvettes

conservées en laboratoire, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 241, nov.-déc. 2002, pp 13-59.

- [13] BAROGHEL-BOUNY (V.), GAWSEWITCH (J.), BELIN (P.), OUNOUGHI (K.), ARNAUD (S.), OLIVIER (G.), BISSONNETTE (B.), Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI° siècle. IV - Résultats issus des prélèvements effectués sur les corps d'épreuve de différents sites aux premières échéances de mesure, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 249, mars-avril 2004, pp 49-100.
- [14] BAROGHEL-BOUNY (V.), GAWSEWITCH (J.), BELIN (P.), CHAUSSADENT (T.), PLATRET (G.), Etude expérimentale sur le Pont de l'Ile de Ré - Caractérisation du béton du tablier à 14 ans, Projet National BHP 2000 - Thème 1 : Durabilité - Sousthème : Etude expérimentale sur ouvrages anciens, Rapport LCPC, juin 2002, 56 p.
- [15] MARY-DIPPE (C.), HASNI (L.), Etude comparative de la durabilité d'Ouvrages Jumeaux de la DDE du Cher - Caractérisation des Bétons B30 et B80 à 2 ans, Projet National BHP 2000 - Thème 1 : Durabilité - Sous-thème : Etude expérimentale sur Ouvrages Jumeaux, Rapport CEBTP, mars 1999.
- [16] BAROGHEL-BOUNY (V.), GAWSEWITCH (J.), VILLAIN (G.), ROUSSEL (P.), Etude expérimentale sur les Ouvrages Jumeaux de Bourges - Caractérisation des bétons B30 et B80 des ouvrages à 3 ans, Projet National BHP 2000 - Thème 1 : Durabilité -Sous-thème : Etude expérimentale sur Ouvrages Jumeaux, Rapport LCPC, nov. 2000, 28 p.
- [17] BAROGHEL-BOUNY (V.), ROUGEAU (P.), CARE (S.), GAWSEWITCH (J.), Etude comparative de la durabilité des bétons B30 et B80 des Ouvrages Jumeaux de Bourges - Partie I : Microstructure, propriétés de durabilité et retrait, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 217, sept.-oct. 1998, pp 61-73.
- [18] BAROGHEL-BOUNY (V.), ROUGEAU (P.), CHAUSSADENT (T.), CROQUETTE (G.), Etude 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, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 217, sept.-oct. 1998, pp 75-84.
- [19] BAROGHEL-BOUNY (V.), GAWSEWITCH (J.), ROUSSEL (P.), Etude "SNCF Ligne nouvelle TGV Méditerranée" - Phase 1 : Résultats des essais comparatifs de durabilité des bétons B32 et B60 sur éprouvettes de contrôle - Rapport de synthèse, Contrat LCPC/SNCF, Rapport LCPC, déc. 1998, 12 p.
- [20] BAROGHEL-BOUNY (V.), GAWSEWITCH (J.), ROUSSEL (P.), VILLAIN (G.), Etude "SNCF - Ligne nouvelle TGV Méditerranée" - Phase 2 : Résultats des essais comparatifs de durabilité sur bétons d'étude B32, B60 et B80 - Rapport de synthèse n° 1, Contrat LCPC/SNCF, Rapport LCPC, janvier 2000, 47 p.
- [21] BAROGHEL-BOUNY (V.), BELIN (P.), HENRY (D.), Etude "SNCF Ligne nouvelle TGV Méditerranée" - Phase 2 : Résultats des essais comparatifs de durabilité sur bétons d'étude B32, B60 et B80 - Phase 3 : Suivi des ouvrages à 2 ans - Rapport de synthèse, Contrat LCPC/SNCF, Rapport LCPC, juin 2001, 34 p.
- [22] Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel Guide Technique, Techniques et Méthodes des LPC, déc. 2003, 167 p.
- [23] BAROGHEL-BOUNY (V.), CHAUSSADENT (T.), CROQUETTE (G.), DIVET (L.), GAWSEWITCH (J.), GODIN (J.), HENRY (D.), PLATRET (G.), VILLAIN (G.), Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons -Méthodes de mesure et d'essais de laboratoire, Techniques et Méthodes des LPC, Méthodes n° 58 (LCPC, Paris, 2002), 88 p.

- [24] HADLEY (D.W.), DOLCH (W.L.), DIAMOND (S.), On the occurrence of holiow-shell hydration grains in hydrated cement paste, Cement and Concrete Research, vol. 30, n° 1, 2000, pp 1-6.
- [25] BAROGHEL-BOUNY (V.), AMMOUCHE (A.), HORNAIN (H.), Matrices cimentaires : analyse de la microstructure et propriétés de transfert, in "Transferts dans les bétons et durabilité", Numéro spécial de la Revue Française de Génie Civil, vol. 5, n° 2-3 (Ed. by V. Baroghel-Bouny, Hermès Science Publications, Paris, 2001), pp 149-177.
- [26] BAROGHEL-BOUNY (V.), CHAUSSADENT (T.), COUSSY (O.), Microstructure characterization and moisture properties determination as tools for concrete durability assessment, Proceedings of 20<sup>emes</sup> Journées des Matériaux "Microstructure and micro-macro-modelling of concrete and cementitious composites", oct. 8-9, 2001, EPFL, Lausanne, Switzerland.
- [27] BAROGHEL-BOUNY (V.), MOUNANGA (P.), LOUKILI (A.), KHELIDJ (A.), From chemical and microstructural evolution of cement pastes to the development of autogenous deformations, Proceedings of the ACI Fall 2002 Convention, Session "Autogenous deformation of concrete", oct. 27 - nov. 1, 2002, Phoenix, Arizona, USA, SP-220 (Ed. by O.M. Jensen, D.P. Bentz & P. Lura, ACI, 2004), mars 2004, pp 1-21.
- [28] DIAMOND (S.), LEEMAN (M.E.), Pore size distribution in hardened cement paste by SEM image analysis, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., vol. 370, 1995, pp 217-226.
- [29] MIRAGLIOTTA (R.), ROUGEAU (P.), AIT MOKHTAR (K.), Carbonatation des bétons -Optimisation de l'enrobage des armatures, Rapport CERIB DDE 31, 2003, 82 p.
- [30] HORNAIN (H.), MARCHAND (J.), AMMOUCHE (A.), COMMENE (J.P.), MORANVILLE (M.), Microscopic observation of cracks in concrete - A new sample preparation technique using dye impregnation, Cement and concrete research, vol. 26, n° 4, 1996, pp 573-583.
- [31] AMMOUCHE (A.), Caractérisation automatique de la microfissuration des bétons par traitement d'images. Application à l'étude de différents faciès de dégradation, Thèse de l'Université de Bordeaux I / Université Laval Québec, 1999.
- [32] AMMOUCHE (A.), RISS (J.), BREYSSE (D.), MARCHAND (J.), Image analysis for the automated study of microcracks in concrete, Cement and Concrete Composites, vol. 23, 2001, pp 267-278.
- [33] KJELLSEN (K.O.), JENNINGS (H.M.), Observation of microcracking in cement paste upon drying and rewetting by environmental scanning electron microscopy, Adv. Cem. Bas. Mat., 3, 1996, pp 14-19.
- [34] KJELLSEN (K.O.), JENNINGS (H.M.), Microcracking of high-performance concrete binders due to self-desiccation, Proceedings of Nordic Concrete Research meeting, august 21-23, 1996, Espoo, Finland, pp 77-78.
- [35] LE ROY (R.), De LARRARD (F.), Creep and shrinkage of high-performance concrete: the LCPC experience, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International RILEM Symposium "RILEM 93", Barcelona, Spain (E. & F.N. SPON, London, 1993), pp 500-508.
- [36] PERSSON (B.), Early basic creep of high-performance concrete, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance concrete BHP 96, 29-31 may 1996, Paris, France (LCPC, Presses de l'ENPC, 1996), pp 405-414.
- [37] BAROGHEL-BOUNY (V.), Experimental investigation of self-desiccation in highperformance 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, 1997), pp 72-87.

- [38] BAROGHEL-BOUNY (V.), KHEIRBEK (A.), Effect of mix-parameters on autogenous deformations of cement pastes Microstructural interpretations, Concrete Science and Engineering, vol. 3, n° 9, march 2001, pp 23-38.
- [39] BAZANT (Z.P.), Mathematical models for creep and shrinkage in concrete, in Creep and shrinkage in concrete structures (Ed. by Z.P. Bazant & F.H. Wittmann, Wiley, 1982), pp 163-256.
- [40] BAROGHEL-BOUNY (V.), MAINGUY (M.), LASSABATERE (T.), COUSSY (O.), Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials, Cement and concrete research, vol. 29, n° 8, 1999, pp 1225-1238.
- [41] Modes opératoires recommandés par l'AFPC-AFREM, Compte rendu des Journées Techniques AFPC-AFREM "Durabilité des bétons", 11-12 déc. 1997, Toulouse, France (LMDC, Toulouse, 1998), 283 p.
- [42] KOLLEK (J.J.), The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method, a Recommendation, Materials and Structures, vol. 22, 1989, pp 225-230.
- [43] TANG (L.), NILSSON (L.O.), Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field, ACI Materials Journal, vol. 89, n° 1, 1992, pp 49-53.
- [44] TANG (L.), SORENSEN (H.E.), Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion / migration coefficients of concrete, Materials and Structures, vol. 34, n° 242, oct. 2001, pp 479-485.
- [45] NT Build 492 Nordtest method, Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Espoo, Finland, 1999.
- [46] COLLEPARDI (M.), Quick method to determine free and bound chlorides in concrete, Proceedings of the International RILEM Workshop "Chloride penetration into concrete", oct. 15-18, 1995, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, France (Ed. by L.O. Nilsson & J.P. Ollivier, RILEM, Paris, 1997), pp 10-16.
- [47] NF P 18-855, Norme : Essai de perméabilité aux liquides sur éprouvettes à surface sciée (Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique - Produits ou systèmes de produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques destinés aux réparations de surface du béton durci), AFNOR, nov. 1992.
- [48] GARBOCZI (E.J.), Permeability, diffusivity and microstructural parameters: a critical review, Cement and concrete research, vol. 20, n° 4, 1990, pp 591-601.
- [49] COUSSY (O.), BAROGHEL-BOUNY (V.), DANGLA (P.), MAINGUY (M.), Evaluation de la perméabilité à l'eau liquide des bétons à partir de leur perte de masse durant le séchage, dans "Transferts dans les bétons et durabilité", Numéro spécial de la Revue Française de Génie Civil, vol. 5, n° 2-3 (Ed. by V. Baroghel-Bouny, Hermès Science Publications, Paris, 2001), pp 271-286.
- [50] MEZIANI (H.), SKOCZYLAS (F.), An experimental study of the mechanical behaviour of a mortar and of its permeability under deviatoric loading, Materials and Structures, vol. 32, n° 220, july 1999, pp 403-409.

- [51] PICANDET (V.), Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons, Thèse de doctorat de l'Univ. de Nantes, déc. 2001, 229 p.
- [52] YURTDAS (I.), Couplage comportement mécanique et dessiccation des matériaux à matrice cimentaire : étude expérimentale sur mortiers, Thèse de doctorat de l'Univ. des Sciences et Technologies de Lille, oct. 2003, 227 p.
- [53] YSSORCHE-CUBAYNES (M.P.), OLLIVIER (J.P.), La microfissuration d'autodessiccation et la durabilité des BHP et BTHP, Materials and Structures, vol. 32, n° 215, jan.-feb., 1999, pp 14-21.
- [54] ZHANG (M.H.), GJORV (O.E.), Effect of silica fume on pore structure and chloride diffusivity of low porosity cement pastes, Cement and Concrete Research, vol. 21, n° 6, 1991, pp 1006-1014.
- [55] PAPADAKIS (V.G.), Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress, Cement and Concrete Research, vol. 30, n° 10, 2000, pp 291-299.
- [56] NILSSON (L.O.), ANDERSEN (A.), LUPING TANG, UTGENANNT (P.), Chloride ingress data from field exposure in a swedish road environment, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> RILEM Workshop "Testing and modelling chloride ingress into concrete", 2000, Paris, France (Ed. by C. Andrade & J. Kropp, RILEM, Paris, 2000), pp 69-83.
- [57] TOGNAZZI (C.), TORRENTI (J.M.), CARCASSES (M.), OLLIVIER (J.P.), Coupling between diffusivity and cracks in cement-based systems, Concrete Science and Engineering, vol. 2, dec. 2000, pp 176-181.
- [58] SAITO (M.), ISHIMORI (H.), Chloride permeability of concrete under static and repeated loading, Cement and Concrete Research, vol. 25, n° 4, 1995, pp 803-808.
- [59] PLATRET (G.), DELOYE (F.X.), Thermogravimétrie et carbonatation des ciments et des bétons, Actes des Journées des Sciences de l'Ingénieur du Réseau des LPC, 4-7 oct. 1994, Giens, France, vol. I, pp 237-243.
- [60] Dosage des chlorures par potentiométrie. Analyse des ciments, bétons, sols et roches, Mode opératoire n° 7, LCPC.
- [61] CHAUSSADENT (T.), ARLIGUIE (G.), AFREM test procedures concerning chlorides in concrete: extraction and titration methods, Materials and structures, vol. 32, n° 217, april 1999, pp 230-234.
- [62] CASTEL (A.), ARLIGUIE (G.), CHAUSSADENT (T.), BAROGHEL-BOUNY (V.), La microfissuration superficielle a-t-elle une influence sur la profondeur de carbonatation des bétons ?, in "Transferts dans les bétons et durabilité", numéro spécial de la Revue Française de Génie Civil, vol. 5, n° 2-3 (Ed. by V. Baroghel-Bouny, Hermès Science Publications, Paris, 2001), pp 231-248.
- [63] ASTM C 457 Standard practice for microscopical determination of air-void content and parameters of the air-void system in hardened concrete, nov. 1982.
- [64] Norme P 18-424 Bétons Essai de gel sur béton durci. Gel dans l'eau Dégel dans l'eau, AFNOR, oct. 1994.
- [65] Norme XP P 18-420 Bétons Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline, AFNOR, juin 95.

- [66] ROUGEAU (P.), BOURNAZEL (J.P.), HORNAIN (H.), BAROGHEL-BOUNY (V.), LAMOTTE (H.), Comportement des BHP vis-à-vis du gel avec ou sans sels de déverglaçage, Projet National BHP 2000 - Thème 1 : Durabilité, Rapport CERIB/LERM/LCPC/CEA, 2001, 75 p.
- [67] Norme P 18-425 Bétons Essai de gel sur béton durci. Gel dans l'air Dégel dans l'eau, AFNOR, oct. 1994.
- [68] GAGNÉ (R.), MARCHAND (J.), The deicing salt scaling resistance of highperformance concretes: an overview, Proceedings of the International Workshop on the resistance of concrete to scaling due to freezing in the presence of deicing salts, Sainte Foy (Québec), Canada, August 30-31, 1993, pp 21-48.
- [69] BEJAOUI (S.), Etude de la formation de la glace au sein de la texture poreuse des matériaux à base de liant hydraulique, Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, sept. 2001, 304 p.
- [70] HENRY (D.), Comportement du béton soumis au gel en présence de sels de déverglaçage, Rapport LCPC, sept. 2001, 141 p.
- [71] GAGNÉ (R.), PIGEON (M.), AITCIN (P.C.), Deicer salt scaling resistance of high strength concretes made with different cements, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal (Québec), Canada, August 1991, SP 126-10 (Ed. by V.M. Malhotra, ACI, 1991), pp 185-199.
- [72] LINDMARK (S.), Mechanisms of salt frost scaling of Portland cement-bound materials: studies and hypothesis, Ph. D. Thesis, Report TVBM 1017, Lund Institute of Technology, 1998, 270 p.
- [73] AITCIN (P.C.), PIGEON (M.), PLEAU (R.), GAGNE (R.), Freezing and thawing durability of high performance concrete, Proceedings of the International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes SHERBROOKE' 98, August 16-20, 1998, Sherbrooke (Québec), Canada, (Ed. by P.C. Aïtcin & Y. Delagrave, 1998), vol. 4, pp 383-391.
- [74] GALEOTA (D.), GIAMMATTEO (M.M.), MARINO (R.), VOLTA (V.), Freezing and thawing resistance of non air-entrained and air-entrained concretes containing a high percentage of condensed silica fume, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal (Québec), Canada, August 1991, SP 126-13, vol. I, (Ed. by V.M. Malhotra, ACI, 1991), pp 249-261.
- [75] BONEN (D.), DIAMOND (S.), Occurrence of large silica fume derived particles in hydrated cement paste, Cement and Concrete Research, vol. 22, nº 6, 1992, pp 1059-1066.
- [76] DIAMOND (S.), Silica fume agglomerates and alkali silica reaction, Proceedings of the international RILEM conference "Concrete: from material to structure", sept. 11-12, 1996, Artes, France (Ed. by J.P. Bournazel and Y. Malier, RILEM, 1998), pp 98-106.
- [77] FAGERLUND (G.), Degré critique de saturation. Un outil pour l'estimation de la résistance au gel des matériaux de construction, Matériaux et constructions, vol. 4, n° 23, 1971, pp 271-285.
- [78] LITVAN (G.G.), Frost action in cement paste, Matériaux et Constructions, vol. 6, nº 34, 1973, pp 293-298.
- [79] BAROGHEL-BOUNY (V.), TORRENTI (J.M.), Durabilité des bétons, in "Construire en béton - L'essentiel sur les matériaux" (sous la Direction de F. de Larrard, Presses de l'ENPC, Collection du LCPC, Paris, 2002), chap. 5, pp 71-93.

- [80] HASNI (L), Durabilité des bétons hautes performances en milieu acide type "jus agricole", Projet National BHP 2000, Rapport CEBTP, mai 2001, 26 p.
- [81] LARIVE (C.), Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques, Etudes et recherches des LPC, OA 28, déc. 1998, 395 p.
- [82] FASSEU (P.), Essais de performance de bétons vis-à-vis de l'alcali-réaction. Phase 1
   Essais de cendres volantes et de fumées de silice, Rapport LRPC de Lille, janv. 2002.
- [83] Pr NF P 18-454, Norme Française homologuée : Béton Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction. Essai de performance, avril 2001.
- [84] FASSEU (P.), Pont sur le Rhin Essais de performance de bétons vis-à-vis de l'alcaliréaction, Rapport LRPC de Lille, déc. 1997.
- [85] JACOBSEN (J.), MARCHAND (J.), BOISVERT (L.), Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete, Cement and concrete research, vol. 26, n° 6, 1996, pp 869-881.
- [86] HEARN (N.), Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference?, Materials and Structures, vol. 31, n° 212, oct. 1998, pp 563-567.
- [87] EDVARDSEN (C.), Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete, ACI Materials Journal, vol. 96, n° 4, july-aug. 1999, pp 448-454.
- [88] RELLING (R.H.), SELLEVOLD (E.J.), Scanning electron microscope: intrusion of chlorides along cracks in concrete, Proceedings of Nordic Concrete Research meeting, august 21-23, 1996, Espoo, Finland, pp 300-301.
- [89] WIN (P.P.), WATANABE (M.), MACHIDA (A.), Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete, Cement and concrete research, vol. 34, n° 7, july 2004, pp 1073-1079.
- [90] De LARRARD (F.), LARIVE (C.), BHP et alcali-réaction : deux concepts incompatibles ?, Notes et informations techniques du Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 190, mars-avril 1994, pp 107-109.
- [91] DEMARE (A.), TREFFOT (G.), Second pont sur le Rhin au sud de Strasbourg, Ouvrages d'Art, n° 37, mars 2001, pp 16-21.

<u>Tableau I</u> : Valeurs moyennes de porosité accessible à l'eau (P<sub>eau</sub>), de perméabilité apparente aux gaz (K<sub>app(gaz)</sub>) à s = 0 et de coefficient de diffusion apparent des chlorures obtenu par essai de migration en régime non stationnaire (D<sub>ns(mig)</sub>), déterminées sur éprouvettes après une cure de <u>28 ou 45 jours</u> dans l'eau pour différents bétons. Durabilité "potentielle" globale des bétons, évaluée sur la base de ces indicateurs de durabilité généraux

(s : taux de saturation)

	Béton	E/C	E/liant	R <sub>moy.28</sub> (MPa)	P <sub>eau</sub> (ou P <sub>Hg</sub> ) (%)	$K_{app(gaz)}$ (à s = 0) (10 <sup>-18</sup> m <sup>2</sup> )	D <sub>ns(mig)</sub> (ou D <sub>ns(dif)</sub> ) (10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	Durabilité "potentielle" globale
4	M25CVEA	0,84	0,67	20,5	16,4	390	5,8	F
	M25CV	0,96	0,77	23,5	15,7	206	9,5	Μ
	M25	0,84	0,84	24,5	16,1	978	30,0	F
	M25EA	0,70	0,70	26,8	13,7	148	22,4	M
	B30	0,43	0,43	39,0	10,7 (P <sub>Hg</sub> )	270	17,5	M
ВО	B32	0,44	0,44	39,3	11,8	217	8,6 (D <sub>ns(dif)</sub> )	M
croissante	M30CV	0,74	0,52	48,5	12,8	54	1,7	E
	M50CVEA	0,45	0,36	49,0	14,3	271	1,5	M
	M50EA	0,39	0,39	49,5	13,3	272	5,5	M
	M50CV	0,56	0,45	53,0	15,0	89	1,8	Μ
	M50	0,48	0,48	55,5	14,7	69	8,7	М
h noy2	M75FSEA	0,34	0,32	67,0	10,3	347	0,7	М
œ	M75EA	0,27	0,27	68,5	10,7	782	3,5	M
↓	B60	0,34	0,34	68,8	10,1	196	1,2 (D <sub>ns(dif)</sub> )	E
	M75	0,32	0,32	75,0	11,4	106	5,6	M
BHP	B70FS	0,37	0,35	84,0	7,6 (P <sub>Hg</sub> )	240	4,8	E
	M75FS	0,38	0,36	85,5	10,0	167	0,8	E
	B80FS	0,30	0,28	97,9	9,3	30	0,68 (D <sub>ns(dif)</sub> )	TE
	M100FS	0,33	0,30	109,0	8,4	17	0,3	TE
4	M120FS	0,26	0,23	127,5	7,4	43	0,04	TE

P<sub>Hg</sub> : porosité accessible au mercure (mesurée à 28 jours)

*D<sub>ns(dil)</sub>* : coef. de dif. apparent des chlorures obtenu par essai de diffusion en régime non stationnaire (mesuré à 90 jours)

F : (durabilité "potentielle") faible

M : (durabilité "potentielle") moyenne

E : (durabilité "potentielle") élevée

TE : (durabilité "potentielle") très élevée

<u>Cases grisées</u> : formules avec agent entraîneur d'air <u>En italique</u> : valeurs à 90 jours Tableau II : Valeurs moyennes de porosité accessible à l'eau (Peau), de perméabilité apparente aux gaz ( $K_{app(gaz)}$ ) à s = 0 et de coefficient de diffusion apparent des chlorures obtenu par essai de migration en régime non stationnaire (D<sub>ns(mig)</sub>), mesurées sur éprouvettes conservées dans l'eau et sur carottes prélevées in situ. Comparaison entre bétons ordinaires et BHP

	Béton	28 ou 45 j (labo)	90 j (labo)		. <u> </u>	in situ
<b>D</b> (9/)	M50	14,7	14,5	14,1 <sup>(1)</sup>	4 000	Site de Melun
Feau (70)	M75FS	10,0	-	8,4(1)	4 ans	Sites de Melun & Maurienne
K <sub>app(gaz)</sub> (10 <sup>-18</sup> m <sup>2</sup> )	B30	270	220	800(1)		
(à s = 0)	B70FS	240	210	48(1)	2 000	Ouvrages Jumeaux de
<b>D</b> $(10.12 \text{ m}^2 \text{ s}.1)$	B30	15-20	15-20	3,1-13,5 <sup>(2)</sup>	2 0115	Bourges
Uns(mig) (1012 III2.S1)	B70FS	3,7-5,8	0,4-2,3	0,77-1,2(2)	1	2 1 1

(1) : mesure incluant le parement
 (2) : mesure effectuée à cœur

<u>Tableau III</u> : Classement des 15 bétons de l'étude sur sites naturels de vieillissement sur la base de différentes propriétés : résistance moyenne à la compression ( $R_{moy.28}$ ), porosité accessible à l'eau ( $P_{eau}$ ), perméabilité apparente aux gaz ( $K_{app(gaz)}$ ) à s = 0, coefficient de diffusion apparent des chlorures ( $D_{ns(mig)}$ ) et coefficient d'absorption capillaire ( $C_a$ ) après 24 heures d'essai, déterminées sur éprouvettes après une cure de <u>28 ou 45 jours</u> dans l'eau, et "perméabilité" de surface mesurée *in situ* après <u>un an</u> d'exposition sur le site de Melun

#### (s : taux de saturation)

	R <sub>moy.28</sub>	P <sub>eau</sub>	$K_{app(gaz)}$ (à s = 0)	D <sub>ns(mig)</sub>	C <sub>a</sub> (24 heures)	"Perméabilité" de surface (in situ)
1	M25CVEA	M25CVEA	M25	M25EA	M25	M25CVEA
	M25CV	M25	M75EA	M25	M25CV	M25
	M25	M25CV	M25CVEA	M25CV	M50	M25CV
	M25EA	M50	M75FSEA	M50	M25CVEA	M25EA
- and a second	M30CV	M50CVEA	M50EA	M25CVEA	M50EA	M75FSEA
croissante	M50CVEA	M50CV	M50CVEA	M75	M50CV	M50
	M50EA	M25EA	M25CV	M50EA	M25EA	M75EA
	M50CV	M50EA	M75FS	M75EA	M50CVEA	M50CVEA
	M50	M30CV	M25EA	M50CV	M30CV	M30CV
	M75FSEA	M75	M75	M30CV	M75EA	M50CV
	M75EA	M75EA	M50CV	M50CVEA	M75	M50EA
	M75	M75 FSEA	M50	M75FS	M75FSEA	M75FS
	M75FS	M75FS	M30CV	M75FSEA	M75FS	M100FS
•	M100FS	M100FS	M120FS	M100FS	M100FS	M75
	M120FS	M120FS	M100FS	M120FS	M120FS	M120FS

Cases bleues : BHP

<u>Tableau IV</u> : Synthèse du comportement au gel évalué en <u>laboratoire</u>, pour les BHP avec ou sans air entraîné testés à la fois à l'essai de gel-dégel selon la norme *XP P 18-420* et selon la norme *P 18-424* 

	Béton	BM80FS	M75FS	BG60FS	M75FSEA	M75	M100FS	BM80	M75EA	M120FS
	E/liant	0,38	0,36	0,35	0,32	0,32	0,30	0,29	0,29	0,23
	E/C	0,42	0,38	0,38	0,34	0,32	0,33	0,29	0,29	0,26
	R <sub>moy.28</sub> (MPa)		85,5	75,3	67,0	75,0	109,0		68,5	127,5
	L <sub>barre</sub> (µm) [ASTM C457]	1012	586	1030	200	560	506 608	757	140	701 550
"Essai d'écaillage" [XP P 18-420]	Masse d'écaillage (g.m <sup>-2</sup> )	642	2189	117	172	682	946 360 390	387	646	89 50
"Essai de gel sévère" [P 18-424]	Allongement relatif (µm/m)	41,7	98		53	31	857	27,5	- 48	25
	Rap. des fréq. de résonance f <sub>0</sub> <sup>2</sup> /f <sub>1</sub> <sup>2</sup>	95	99,0		97,0	100,0	63,9	98,0	100,0	97,0
	Résultat global	NR	NR	NR	ОК	NR	NR	ОК	NR	ОК

OK : résistant

NR : non résistant

Cases grisées : seuil dépassé, selon [22]

<u>Tableau V</u> : Classement des 15 bétons de l'étude sur sites naturels de vieillissement établi sur la base des dégradations (écaillage) constatées *de visu* sur le site de <u>Maurienne</u> (côté chaussée) à différentes échéances. Comparaison avec celui établi sur la base des résultats de l'essai accéléré normalisé d'écaillage réalisé en <u>laboratoire</u>

Classe de	Laboratoire	(XP P 18-420)	Site de Maurienne				
dégradations ↓	7 cycles	56 cycles	3 ans	4 ans	6 ans		
<b>0</b> : aucune dégradation	M50EA		M50CVEA M50EA M50	M50EA	M50EA		
	M75FSEA M75EA M75FS M100FS M120FS		M75FSEA M75EA M75 M75FS M100FS M120FS	M75FSEA M75EA M75 M75FS M100FS M120FS	M75FSEA M75EA M75 M100FS M120FS		
1 : un ou quelques petits éclatements ou 2 : écaillage léger	M25CVEA M25CV M25EA M50CVEA M50	M50CVEA M50EA	M25CVEA M25CV M25EA M50CV	M25CVEA M25EA M50CVEA M50CV M50	M25CVEA M25EA M50CVEA M50CV M50		
	M75	M75FSEA M100FS M120ES			M75FS		
3 : écaillage moyen (quelques granulats apparents)	M25	M25CVEA M25EA	M30CV	M25CV M30CV	M25CV M30CV		
	M50CV	M50 M75EA M75					
4 : écaillage assez important	M30CV	M25CV M25 M50CV M75FS	M25	M25	M25		
5 : écaillage sévère (gros granulats apparents sur toute la surface)		M30CV					

Cases bleues : BHP



Figure 1 : Vue générale du site de Melun (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de l'Est Parisien) et de ses 9 corps d'épreuve (octobre 1998).



Figure 2 : Vue générale du site de La Rochelle à marée basse avec ses 15 corps d'épreuve (janvier 1998).



Figure 3 : Vue des 16 corps d'épreuve et des éprouvettes installés sur le site de Maurienne (avril 1998).



Figure 4 : Vue du Pont de l'Ile de Ré (Charente Maritime).



Figure 5 : Vue des Ouvrages Jumeaux de Bourges (Cher).



a) Pont (rails) à poutres en béton armé réalisé en B60

b) Pont-dalle (route) en béton armé réalisé en B80FS

<u>Figure 6</u> : Vue des ouvrages SNCF de la ligne nouvelle du TGV Méditerranée (section Montélimar-Pierrelatte).



c) Béton M75 (E/C=0,32 ; Rmoy.28=75,0 MPa)



b) Béton M50 (E/C=0,48 ; R<sub>moy.28</sub>=55,5 MPa)



d) Béton M120FS (E/C=0,26 ; FS/C=0,12 ; Rmoy.28=127,5 MPa)

Figure 7 : Images obtenues au MEB (G = 1000X) par électrons secondaires sur des fractures d'échantillons de béton âgé de 28 jours, après conservation dans l'eau.



Figure 8 : Images obtenues au MEB (G = 250X) par électrons rétrodiffusés sur la surface polie d'échantillons de pâtes de ciment durcies âgées de 28 jours, après conservation sans échange d'humidité avec le milieu environnant.



Figure 9 : Images obtenues au MEB (G = 250X) par électrons rétrodiffusés sur la surface polie d'échantillons de béton issus de carottes prélevées sur ouvrages (in situ).

Les spécificités des bétons à hautes performances



(\*) : les domaines considérés dans ce cas sont 3,7 nm < $r_p$  <0,06  $\mu$ m et 0,06  $\mu$ m <  $r_p$  < 60  $\mu$ m

<u>Figure 10</u> : Répartition du volume poreux mesuré par intrusion de mercure, selon deux domaines de rayons de pores, pour les 15 bétons de l'étude sur sites naturels de vieillissement, après conservation dans l'eau pendant <u>**28 jours**</u>. *Porosimètre permettant l'investigation des pores tels que 3,7 nm < r<sub>p</sub> < 60 µm.* 



a) Sites naturels de vieillissement - 28 jours (conservation dans l'eau)



b) Ouvrages SNCF - 90 jours (conservation dans l'eau)



c) Ouvrages Jumeaux de Bourges

<u>Figure 11</u> : Distributions des volumes poreux obtenues par intrusion de mercure pour différents bétons. Les prélèvements sur sites correspondent à une zone intermédiaire entre cœur et "peau".

Appareil permettant l'investigation des pores tels que 3,7 nm < rp < 60 µm.



<u>Figure 12</u> : Distributions des volumes poreux obtenues par intrusion de mercure pour différentes pâtes de ciment durcies, après conservation sans échange d'humidité avec le milieu environnant.

Appareil permettant l'investigation des pores tels que 3,7 nm <  $r_p$  < 60  $\mu$ m.



<u>Figure 13</u> : Distributions des volumes poreux obtenues par intrusion de mercure pour les BHP de l'étude sur sites naturels de vieillissement du type M75 (formulés avec ou sans fumées de silice) avec ou sans air entraîné, après conservation dans l'eau pendant <u>28</u> jours.

Appareil permettant l'investigation des pores tels que 3,7 nm  $< r_p < 60 \ \mu m$ .



a) Carotte prélevée sur le tablier du Pont de l'Ile de Ré - B60FS - 14 ans



b) Carotte prélevée sur le corps d'épreuve M100FS situé en zone de marnage à La Rochelle - 4 ans

Figure 14 : Comparaison des distributions des volumes poreux obtenues par intrusion de mercure dans les zones situées en "peau" et à cœur de carottes de BHP prélevées <u>in</u> situ.

Appareil permettant l'investigation des pores tels que 2 nm <  $r_p$  < 60  $\mu$ m.



<u>Figure 15</u> : Distributions des volumes poreux obtenues par intrusion de mercure dans les zones carbonatée et non carbonatée d'un même échantillon de B60FS prélevé à cœur dans une carotte du tablier du Pont de l'Ile de Ré et ayant subi ensuite à l'âge de 15 ans un préconditionnement et un essai de carbonatation accélérée ( $CO_2 = 50$  % et HR = 53,5 %) en laboratoire pendant 46 jours.

Appareil permettant l'investigation des pores tels que 2 nm < rp < 60 µm.



<u>Figure 16</u> : Longueur spécifique de microfissures déterminée au microscope optique par analyse d'images, pour les 15 bétons de l'étude sur sites naturels de vieillissement, après conservation dans l'eau pendant <u>28 jours</u>.

Les spécificités des bétons à hautes performances Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles



a) béton **M75** ( $L_{\mu} = 0,26 \text{ mm/mm}^2$ )



b) béton **M100FS** ( $L_{\mu} = 0.02 \text{ mm/mm}^2$ )



c) béton M120FS (L<sub>µ</sub> = 0,13 mm/mm<sup>2</sup>)

<u>Figure 17</u> : Cartographie de microfissuration déterminée au microscope optique par analyse d'images pour différents bétons de l'étude sur sites naturels de vieillissement, après conservation dans l'eau pendant <u>28 jours</u>.



Figure 18 : Classes de durabilité "potentielle" (selon [1]) et valeurs expérimentales (moyennes) de porosité accessible à l'eau mesurée par pesée hydrostatique sur éprouvettes de béton conservées dans l'eau en laboratoire, en fonction de la résistance moyenne à la compression mesurée à 28 jours.

- TF : (durabilité "potentielle") très faible
- F
- М
- Ε
- : (durabilité "potentielle") faible : (durabilité "potentielle") moyenne : (durabilité "potentielle") moyenne : (durabilité "potentielle") très élevée TE



<u>Figure 19</u> : Classes de durabilité "potentielle" (selon [1]<sup>(<sup>1</sup>)</sup>) et valeurs expérimentales (moyennes) de <u>perméabilité apparente aux gaz</u> (à s = 0), mesurée (à P<sub>entrée</sub> = 0,2 MPa) sur éprouvettes de béton après 28 jours de conservation dans l'eau en laboratoire et étuvage à T = 105 ± 5 °C selon le protocole AFPC-AFREM [41], en fonction de la résistance moyenne à la compression mesurée à 28 jours.

- F : (durabilité "potentielle") faible
- M : (durabilité "potentielle") moyenne
- E : (durabilité "potentielle") élevée
- TE : (durabilité "potentielle") très élevée

(\*) : on notera que la frontière entre E et TE est prise ici égale à  $30 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ , alors qu'elle est égale à  $10 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  pour l'indicateur perméabilité apparente aux gaz mesuré à 90 jours dans la référence [1].


<u>Figure 20</u> : Classes de durabilité "potentielle" (selon [1]) et valeurs expérimentales (moyennes) de <u>coefficient de diffusion apparent des chlorures</u>, obtenu à partir d'un essai de migration en régime non stationnaire sur éprouvettes de béton conservées 28 jours dans l'eau en laboratoire, en fonction de la résistance moyenne à la compression mesurée à 28 jours.

- F : (durabilité "potentielle") faible
- M : (durabilité "potentielle") moyenne
- E : (durabilité "potentielle") élevée
- TE : (durabilité "potentielle") très élevée



<u>Figure 21</u> : Valeurs expérimentales (moyennes) de <u>coefficient d'absorption capillaire</u> (après 24 heures d'essai) mesuré sur éprouvettes de béton conservées 28 jours dans l'eau en laboratoire, en fonction de la résistance moyenne à la compression mesurée à 28 jours.



a) Site de Melun - Différents bétons - 4 ans

b) BHP - Différents environnements

<u>Figure 22</u> : Profils de taux de saturation obtenus par gammadensimétrie sur des carottes issues des corps d'épreuve des sites de Melun et de Maurienne, et du tablier du Pont de l'Ile de Ré.



<u>Figure 23</u> : Comparaison des profondeurs carbonatées (valeurs moyennes assorties de barres d'erreur) mesurées par phénolphtaléine sur des carottes issues des corps d'épreuve des sites de Melun, La Rochelle et de Maurienne, à l'âge de <u>4 ans</u>.



a) franges carbonatées mises en évidence par test colorimétrique (phénolphtaléine)



b) microfissure mise en évidence par imprégnation de colorant rouge et observée au microscope optique (G=10X)



c) franges carbonatées mises en évidence par test colorimétrique (AgNO\_3 +  $K_2CrO_4$ )



 d) microfissure mise en évidence par imprégnation de colorant rouge et observée au microscope optique (G=10X)

<u>Figure 24</u> : Observation de la microfissuration (b) et (d) dans une zone carbonatée (franges), après sciage à une profondeur de moins de 5 mm (a) et d'environ 10 mm (c) de la surface fendue ayant subi le test colorimétrique, pour le béton B60FS du tablier du Pont de l'Ile de Ré, à l'âge de <u>14 ans</u>.



<u>Figure 25</u> : Profils de carbonatation (teneurs en Ca(OH)<sub>2</sub> résiduelle et en CO<sub>2</sub> de carbonatation) déterminés par ATG sur carottes prélevées *in situ.* Les valeurs sont normalisées par rapport à la teneur en CO<sub>2</sub> des granulats à cœur.



<u>Figure 26</u> : Profils de concentration en chlorures totaux obtenus sur les prélèvements issus des corps d'épreuve du site de <u>La Rochelle</u> (zone de marnage) à l'âge de <u>4 ans</u>. Comparaison avec les profondeurs carbonatées.

Ne sont reportés sur ce graphique que les résultats obtenus sur un seul corps d'épreuve par formule.



- Les bétons M50EA, M50CVEA et M75EA, ayant un allongement relatif négatif (retrait), ne figurent pas sur le graphique, mais sont inclus dans la zone Ø
- Les bétons M25 et BG60FS, dont les éprouvettes ont été entièrement dégradées au cours de l'essai, ne figurent pas sur le graphique, mais sont inclus dans la zone 2

<u>Figure 27</u> : Allongement relatif obtenu à l'issue des 300 cycles de l'essai de gel-dégel (sans sels) réalisé en laboratoire selon la norme *P 18-424*, en fonction du facteur d'espacement des bulles d'air, pour différents bétons. Comparaison avec les seuils indiqués dans les *Recommandations* [22].

Ecritures bleues : BHP



<u>Figure 28</u> : Masse cumulée d'écaillage de BHP sans air entraîné (avec et sans fumées de silice), en fonction du nombre de cycles de l'essai mené en laboratoire selon la norme XP *P* 18-420. Comparaison avec le seuil indiqué dans les *Recommandations* [22].



<u>Figure 29</u> : Masse cumulée d'écaillage obtenue à l'issue des 56 cycles de l'essai de geldégel en présence de NaCl réalisé en laboratoire selon la norme *XP P 18-420*, en fonction du facteur d'espacement des bulles d'air, pour différents bétons. Comparaison avec les seuils indiqués dans les *Recommandations* [22].

Ecritures bleues : BHP



<u>Figure 30</u> : Expansion longitudinale des formules B65 et B65FS du Pont sur le Rhin, mesurée en laboratoire selon la norme *NF P 18-454*, en fonction du temps. Comparaison avec le seuil indiqué dans [1].

Document publié par le LCPC sous le N° J1050377 Dépôt légal – 3<sup>e</sup> trimestre 2004 ISBN 2-7208-0377-4 Impression JOUVE



## Véronique Baroghel-Bouny

## Les spécificités des bétons à hautes performances Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles

Ce document offre une synthèse des principaux résultats concernant les caractéristiques microstructurales et les propriétés relatives à la durabilité des bétons à hautes performances (BHP), acquis dans le cadre de différentes études et recherches, en particulier dans celui du projet national " BHP 2000 " et de projets de recherche dirigés par le LCPC. La durabilité concernée dans ce document a trait essentiellement à la prévention de la corrosion des armatures du béton armé et des dégradations du béton dues aux cycles de gel-dégel en présence ou non de sels. Quelques exemples sont en outre donnés relativement au comportement en laboratoire vis-àvis d'autres agressions (attaque acide et alcali-réaction).

La durabilité a été étudiée sur des échantillons de matériaux issus d'éprouvettes testées en conditions de laboratoire, d'éléments de structure, ou encore d'ouvrages réels exposés à des conditions naturelles variées.

Tous les résultats indiquent pour les BHP une durabilité " potentielle " élevée et, en particulier, une très bonne résistance aux agents agressifs d'origine externe (la pénétration des chlorures et la carbonatation sont limitées à une zone très superficielle) et interne. Le meilleur comportement des BHP, mis en évidence en laboratoire et *in situ* par rapport à des formules plus classiques, fournit des arguments solides pour prescrire des BHP en vue d'assurer une durée de vie plus longue aux ouvrages en béton armé (ou précontraint) et/ou éviter bon nombre de pathologies (alcali-réaction, lixiviation par les liquides chimiquement agressifs, etc).

This document provides a summary of the primary set of results on the microstructural characteristics and properties related to the durability of high performance concretes (HPCs), as obtained within the scope of various studies and research projects and in particular from the "BHP 2000" National Project and the array of LCPC-sponsored projects. The durability addressed herein basically concerns preventing not only the corrosion of rebars in reinforced concrete, but also degradations in concrete due to freeze-thaw cycles regardless of the presence of salts. This document also displays some examples with respect to laboratory behavior identified when concrete is submitted to other types of aggression (acid attack and the alkali-reaction).

Durability was studied on material samples derived from specimens tested under laboratory conditions, as well as from structural elements or even actual structures exposed to a range of natural conditions.

All results tend to indicate for the HPC specimens a high "potential" durability and especially an extremely high level of resistance to aggressive agents from both external sources (chloride penetration and carbonation are confined to a zone very close to the surface) and internal sources. This improved behavior found in HPCs, as evidenced both in the laboratory and in situ, in comparison with more conventional concrete mix designs lends considerable credence to including HPC in project specifications for the purpose of ensuring a longer life cycle for reinforced (or prestressed) concrete structures and/or avoiding a sizable number of pathologies (e.g. the alkali-reaction, leaching by chemically-aggressive liquids).



Réf : OA44 20 € HT

N° 9915173 pour les sites de Paris et de Nantes