

Vieillissement des bétons en milieu naturel Une expérimentation pour le XXI^e siècle

II – Caractérisation microstructurale sur éprouvettes de bétons de résistance 25 à 120 MPa

RÉSUMÉ

Le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées, en liaison avec le projet national BHP 2000, a lancé en 1996 un programme expérimental sur plusieurs années, afin de caractériser, notamment du point de vue de la durabilité, une gamme de quinze bétons dont les résistances en compression visées variaient de 25 à 120 MPa. L'objectif de cette étude est de fournir des éléments permettant de spécifier les bétons à employer dans les structures, à partir de critères relatifs à la durabilité et sur la base d'essais de performance en laboratoire. Les propriétés des quinze bétons ont été étudiées sur éprouvettes en laboratoire. Leur évolution à long terme est également suivie sur des corps d'épreuve en béton armé pré-fissurés, installés sur différents sites de vieillissement naturel.

Le présent article rassemble les résultats relatifs à la caractérisation microstructurale des bétons, menée sur éprouvettes en laboratoire, à l'âge de vingt-huit jours après conservation dans l'eau. Des mesures de porosité accessible à l'eau et une investigation de la structure poreuse par intrusion de mercure ont été réalisées. L'examen de la microstructure a été effectué au microscope électronique à balayage (MEB) et la microfissuration des matériaux a été quantifiée par analyse d'images couplée à la microscopie optique. L'influence des paramètres de formulation sur ces caractéristiques a notamment été étudiée.

Les résultats ont mis en évidence que les bétons à hautes performances sont particulièrement peu poreux et présentent un réseau poreux très fin. L'incorporation d'un entraîneur d'air dans la formulation de ces bétons augmente toutefois de façon notable la connectivité du réseau poreux. Ceci est susceptible de modifier de façon drastique les propriétés, notamment de transport, du matériau. Tous les bétons testés présentaient à l'échéance considérée une microfissuration limitée.

Cet article est le deuxième d'une série intitulée « Vieillissement des bétons en milieu naturel. Une expérimentation pour le XX^e siècle ». Les articles suivants de la série présenteront les propriétés de durabilité mesurées sur éprouvettes en laboratoire pour les quinze formules de béton, ainsi que les premiers résultats obtenus sur les corps d'épreuve installés sur les sites de vieillissement.

MOTS CLÉS : 32 - Béton hydraulique - Éprouvette - Résistance (mater.) - Durabilité - Laboratoire - Essai - Porosité - Mesure - Fissuration - Micro - Vieillissement - Béton hautes performances.

Véronique BAROGHEL-BOUNY

Ingénieur des Travaux publics de l'État
Docteur de l'École nationale des Ponts et Chaussées
Chef de la section Microstructure et durabilité des bétons
Division Bétons et composites cimentaires

Abdelkrim AMMOUCHE

Docteur en génie civil
Ingénieur d'étude et recherche

Hugues HORNAIN

Conseiller scientifique

Laboratoire d'Études et de recherches sur les matériaux (Arles)

Josette GAWSEWITCH

Contrôleur des Travaux publics de l'État
Section Microstructure et durabilité des bétons
Division Bétons et composites cimentaires
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Introduction

Le choix des formules de béton et la conception des ouvrages doivent désormais prendre en compte la durée de vie escomptée pour l'ouvrage, qui peut être très variable suivant le type de structure à construire, l'environnement considéré et naturellement le type de sollicitations que devra subir l'ouvrage. Cependant, la durabilité des structures en béton armé ou précontraint est difficile à quantifier et donc à prévoir. En effet, celle-ci est déterminée par l'action couplée, évoluant au cours du temps et souvent à long terme, de différents processus physico-chimiques complexes. Parmi toutes les dégradations potentielles, on peut citer la corrosion des armatures, qui est la cause principale de dégradation des structures en béton armé sous nos climats. Les détériorations du béton liées aux cycles de gel-dégel sont également fréquentes dans les régions montagneuses en France, et intensifiées par la présence de sels de dé verglaçage qui provoquent un écaillage des surfaces exposées.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de démarche générale, notamment performante, visant à prévenir les ouvrages vis-à-vis de ces dégradations, lorsque l'on sort du champ des matériaux couverts – par le biais de spécifications de moyens – par les documents réglementaires ou normatifs. Nous manquons de ce fait d'éléments quantitatifs pour guider l'ingénieur dans ses

choix. Nous ne disposons en effet dans de nombreux cas que de résultats d'essais accélérés de laboratoire, dont il est difficile d'évaluer correctement la représentativité. En outre, le suivi du comportement au cours du temps d'ouvrages réels n'a fourni jusqu'à présent que des résultats partiels pour quelques types de béton seulement.

Dans le but de fournir des éléments permettant de spécifier des bétons sur la base d'essais de performance effectués en laboratoire, le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées, en liaison avec le Projet National BHP 2000, a lancé en 1996 un programme expérimental sur plusieurs années, afin de caractériser, notamment du point de vue de la durabilité, une gamme de quinze bétons dont les résistances en compression visées variaient de 25 à 120 MPa. Les propriétés de ces bétons ont été étudiées sur éprouvettes en laboratoire. Leur évolution à long terme est également suivie sur des corps d'épreuve en béton armé pré-fissurés, installés sur différents sites de vieillissement naturel [1].

Les objectifs de ce programme ont été présentés dans un premier article [2], ainsi que les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons testés. Dans ce premier article sont notamment détaillés les résultats expérimentaux relatifs à l'effet de la cure et des paramètres de formulation sur le développement des résistances en compression et en traction par fendage en fonction du temps.

La microstructure des bétons, et en particulier leur structure poreuse, conditionne non seulement les propriétés mécaniques, mais également celles liées à la durabilité du béton armé. En effet, les caractéristiques du réseau poreux déterminent les propriétés de transport – perméabilité et diffusivité – c'est-à-dire l'aptitude du matériau à laisser pénétrer, sous forme liquide ou gazeuse, des agents potentiellement agressifs pour le béton ou les armatures (ions chlorures ou sulfates, gaz carbonique, etc.). En outre, les propriétés de transport du béton de la couche d'enrobage des armatures

sont susceptibles d'être modifiées par la présence d'une fissuration de peau. Il apparaît donc indispensable de caractériser de la façon la plus exacte possible la microstructure des bétons, afin de pouvoir expliquer et éventuellement prédire leur comportement à long terme.

Cet article rassemble les résultats relatifs à la caractérisation microstructurale de quinze bétons, menée sur éprouvettes (démoulées à l'âge de 48 heures) en laboratoire, à l'âge de vingt-huit jours après conservation dans l'eau (à $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$). Des mesures de porosité accessible à l'eau et une investigation de la structure poreuse par intrusion de mercure ont été réalisées. L'examen de la microstructure a été effectué au microscope électronique à balayage (MEB) et la microfissuration des matériaux a été quantifiée au microscope optique par analyse d'images. L'influence des paramètres de formulation sur ces caractéristiques a notamment été étudiée. Une attention particulière a été portée aux bétons à hautes performances (BHP) et à très hautes performances (BTHP).

Ce programme expérimental de caractérisation microstructurale à vingt-huit jours sera complété par des mesures à long terme, suivant les résultats obtenus sur les corps d'épreuve des différents sites de vieillissement.

Formulation et caractéristiques des bétons étudiés

Les constituants utilisés étaient identiques pour les quinze formules de béton : ciment CPA-CEM I 52,5 PM ES CP2 de Saint-Vigor (Le Havre), cendre volante silico-alumineuse (CV), fumée de silice densifiée de l'usine d'Anglefort (FS), gravillons calcaires concassés du Boulonnais 0/5-5/12,5-12,5/20, sable silico-calcaire de Seine 0/4, superplastifiant (SP), retardateur et agent entraîneur d'air (AEA). Seuls les dosages variaient (tableau I). La composition chimique du

TABLEAU I
Formulation des bétons

Formulation	Boulonnais 12,5/20 kg/m ³	Boulonnais 5/12,5 kg/m ³	Boulonnais 0/5 kg/m ³	Sable de Seine kg/m ³	Ciment kg/m ³	CV kg/m ³	FS kg/m ³	Eau d'ajout l/m ³	AEA (e.s.) kg/m ³	SP (e.s.) kg/m ³	Retardateur (e.s.) kg/m ³	E/C	E/ifiant
M 25 CV EA	586	454	411	405	189	49	0	159	0,54	0,0	0,0	0,84	0,67
M 25 CV	623	369	456	449	195	48	0	187	0	0,0	0,0	0,96	0,77
M 25	619	388	453	446	230	0	0	193	0	0,0	0,0	0,84	0,84
M 25 EA	574	454	433	427	230	0	0	160	0,31	0,0	0,0	0,70	0,70
M 30 CV	565	421	443	436	223	95	0	166	0	1,1	1,4	0,74	0,52
M 50 CV EA	452	422	322	317	428	107	0	192	1,44	0,0	0,0	0,45	0,36
M 50 EA	477	390	368	364	483	0	0	188	1,32	0,0	0,0	0,39	0,39
M 50 CV	503	453	408	401	325	79	0	181	0	0,0	0,0	0,56	0,45
M 50	509	428	406	400	410	0	0	197	0	0,0	0,0	0,48	0,48
M 75 FS EA	550	437	414	408	387	0	23	132	0,58	12,9	2,7	0,34	0,32
M 75 EA	489	443	338	332	557	0	0	151	0,98	14,8	3,9	0,27	0,27
M 75	550	475	407	401	461	0	0	146	0	12,4	3,3	0,32	0,32
M 75 FS	579	465	442	435	360	0	22	136	0	12,0	2,5	0,38	0,36
M 100 FS	561	488	439	432	377	0	38	124	0	12,5	2,6	0,33	0,30
M 120 FS	554	437	413	407	470	0	57	124	0	15,6	3,3	0,26	0,23

(e.s.) Extrait sec

ciment, des cendres volantes et de la fumée de silice utilisés, ainsi que la composition minéralogique du ciment, sont données dans la référence [2]. D'autres caractéristiques des constituants sont données dans la référence [3].

Les principes de formulation de ces bétons sont expliqués dans la référence [2]. Les propriétés du béton frais sont également données dans cette référence. Les formules choisies prennent en considération les variables suivantes :

- la résistance moyenne à la compression à vingt-huit jours du béton (« M » pour résistance moyenne visée de 25, 30, 50, 75, 100 et 120 MPa),
- l'influence d'une addition pouzzolanique (des formules avec cendres volantes, notées CV, ou avec fumée de silice, notées FS, ont été étudiées),
- l'ajout d'un agent entraîneur d'air (six formules avec entraîneur d'air, notées EA, ont été étudiées).

Le rapport eau sur ciment (E/C) des formules varie de 0,26 (M 120 FS) à 0,96 (M 25 CV).

Les valeurs d'affaissement déterminées au cône d'Abraim immédiatement après le malaxage sont comprises entre 70 mm (M 50 CV EA) et 270 mm (M 75). Ces valeurs sont toutes supérieures ou égales à 100 mm, à l'exception de certains bétons des gammes M 25 et M 50. Les teneurs en air sont comprises entre 0,4 % (M 75 et M 75 FS) et 7,6 % (M 75 EA). Les plus fortes teneurs en air ($\geq 3,2 \%$) correspondent naturellement aux formules avec entraîneur d'air. Les teneurs en air mesurées sur les formules sans entraîneur d'air sont inférieures ou égales à 1,1 %. Ces dernières sont donc particulièrement faibles.

Les M 25 étudiés correspondent aux bétons bas de gamme couramment utilisés en France ($\approx 80 \%$ du marché). Tester de tels matériaux dans le cadre de ce programme permettra de quantifier le gain de durabilité que sont susceptibles d'offrir les BHP par rapport à ces bétons.

Le béton M 30 CV correspond aux valeurs plancher de la norme P 18-305, mais avec une teneur élevée en cendres volantes (43 % par rapport à la masse de ciment).

Les M 50 correspondent à de bons bétons d'ouvrages d'art.

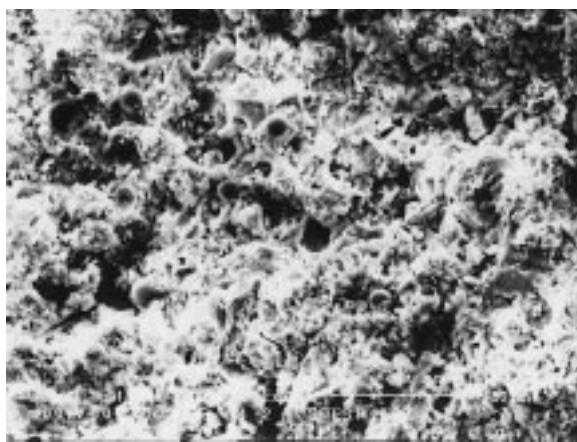
Les M 75 et le M 100 FS peuvent être considérés comme des BHP « standard ».

Le M 120 FS correspond à un BHP que l'on sera capable de réaliser sur chantier dans les années qui viennent.

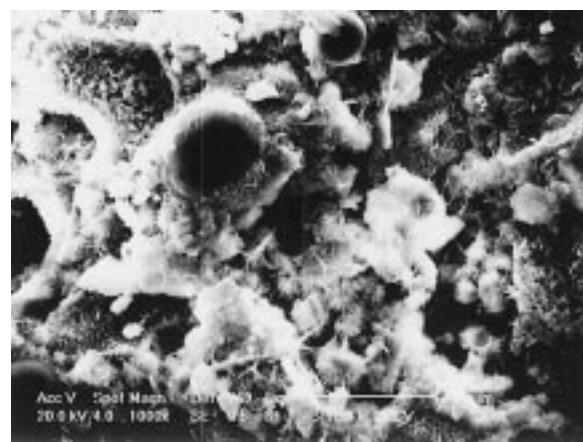
Examen au microscope électronique à balayage de la microstructure des bétons

Des fractures fraîches des quinze bétons étudiés (prélevées dans des cylindres $\varnothing 150 \times 300$ mm) 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, ettringite, etc.). La microanalyse élémentaire par spectrométrie X à dispersion d'énergie est associée au microscope. Elle permet de connaître de façon qualitative la composition chimique des régions observées de l'échantillon. Afin de rendre possible l'observation au MEB, les échantillons ont préalablement été séchés (cf. « Mesures par intrusion de mercure - Préparation des échantillons et mesure ») à l'âge de vingt-huit jours, puis ont été métallisés à l'or, c'est-à-dire recouverts d'un film conducteur d'environ 10 nm d'épaisseur.

Les figures 1 à 4 illustrent la compacité croissante des matériaux lorsque l'on passe du béton M 25 CV au béton M 120 FS. Il est à noter que l'observation est pratiquée sous un vide poussé. Cela peut expliquer la présence de fissures sur les fractographies. Les hydrates présents dans la microstructure sont essentiellement des silicates de calcium hydratés C-S-H. Ils se présentent sous forme d'amas granuleux, voire fibreux dans le

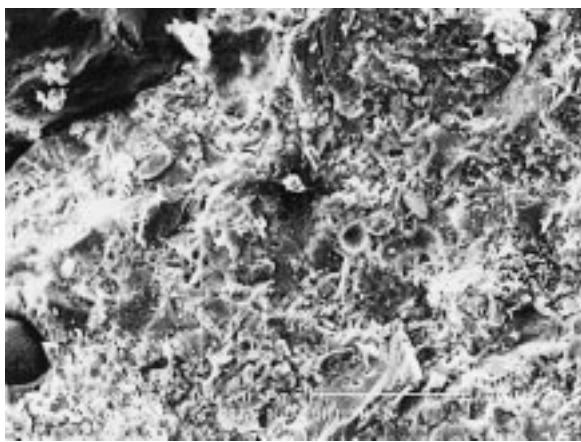


a. - Grossissement 250x.



b. - Grossissement 1 000x.

Fig. 1 - Images obtenues au MEB par électrons secondaires sur la fracture d'un échantillon de béton M 25 CV.

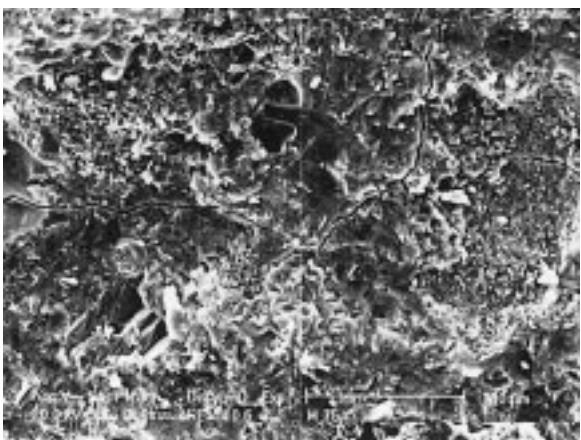


a. - Grossissement 250x.

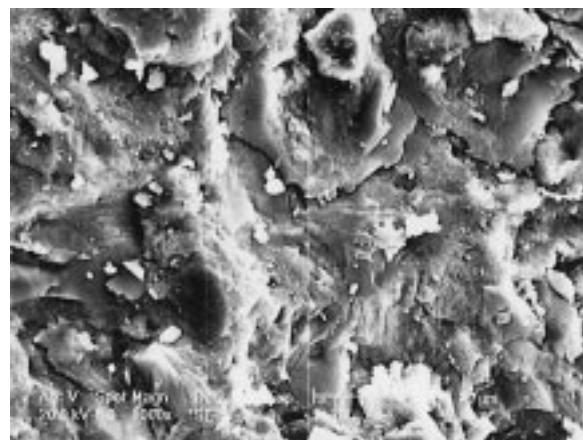


b. - Grossissement 1 000x.

Fig. 2 - Images obtenues au MEB par électrons secondaires sur la fracture d'un échantillon de béton M 50.



a. - Grossissement 250x.

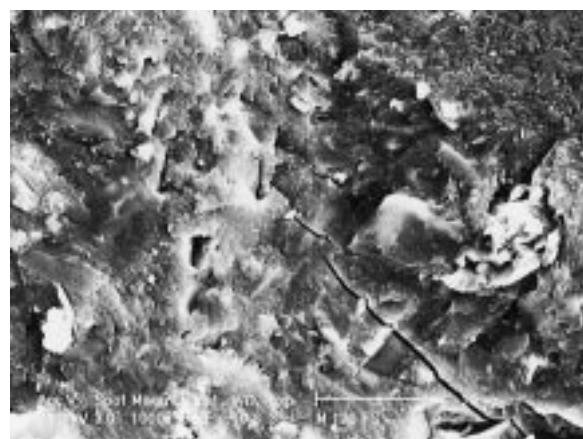


b. - Grossissement 1 000x.

Fig. 3 - Images obtenues au MEB par électrons secondaires sur la fracture d'un échantillon de béton M 75.



a. - Grossissement 250x.



b. - Grossissement 1 000x.

Fig. 4 - Images obtenues au MEB par électrons secondaires sur la fracture d'un échantillon de béton M 120 FS.

M 25 CV, et apparaissent sous la forme d'une matrice particulièrement dense dans le M 120 FS. La variété des phases et des morphologies, ainsi que l'importante porosité présente dans le M 25 CV, contrastent nettement avec l'homogénéité et la compacité du M 120 FS. Des cendres volantes sont également clairement visibles dans le M 25 CV.

Caractérisation de la structure poreuse

Porosité accessible à l'eau

Des mesures de porosité accessible à l'eau ont été réalisées par pesée hydrostatique, suivant le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM [4], sur des

portions de rondelles $\varnothing 110 \times 50$ mm, préalablement prélevées par sciage sous eau dans des cylindres $\varnothing 110 \times 220$ mm. Les pesées ont été réalisées à la précision de 0,01 gramme.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II et dans la figure 5, en fonction de la résistance mécanique moyenne à la compression à vingt-huit jours.

La figure 5 illustre l'étendue de la gamme des bétons testés. Les résultats de porosité accessible à l'eau apparaissent plutôt bien corrélés avec les valeurs de résistance mécanique moyenne à la compression. Ceci était

prévisible dans la mesure où la porosité à l'eau est un indicateur de la qualité globale du matériau. De plus, quand la porosité diminue (par la diminution du rapport E/C, l'incorporation d'ultrafines, etc.), la résistance augmente. Ceci constitue le principe même de formulation des BHP.

Mesures par intrusion de mercure

Les mesures par intrusion de mercure permettent de caractériser la structure poreuse des matériaux. La porosité et la distribution des tailles des pores dont les rayons sont inclus dans le domaine de mesure de l'appareil peuvent ainsi notamment être quantifiées.

Préparation des échantillons et mesure

Les échantillons (masse ≈ 20 g) ont été préparés à partir de tranches $\varnothing 110 \times 20$ mm sciées sous eau dans des cylindres $\varnothing 110 \times 220$ mm. Pour chaque matériau, trois échantillons ont été testés.

Ces 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 ici selon la procédure mise au point au LCPC qui consiste en un étuvage sous vide à $T \approx 45$ °C en présence de gel de silice, pendant quatorze jours. Au cours de ce prétraitement, les échantillons ont été régulièrement pesés (au milligramme 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. La figure 6 présente les

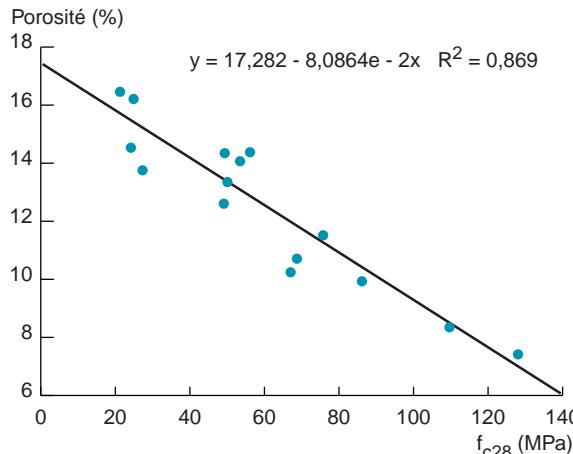


Fig. 5 - Porosité accessible à l'eau des quinze formulations de béton mesurée à l'âge de vingt-huit jours, en fonction de leur résistance mécanique moyenne à la compression à vingt-huit jours.

TABLEAU II

Résultats des mesures par pesée hydrostatique et par intrusion de mercure obtenus sur les quinze bétons à l'âge de vingt-huit jours (les formulations avec air entraîné sont indiquées en couleur)

Béton	E/C	E/ifiant	f _{c28} (MPa)	Porosité accessible à l'eau (%)	r _{pmoyen} (Hg) (Å)	Porosité accessible au mercure (%)
M 25 CV EA	0,84	0,67	20,5	16,4	190 et 1 275	14,6
M 25 CV	0,96	0,77	23,5	14,5	223 et 1 430 (*)	15,0
M 25	0,84	0,84	24,5	16,2	239 et 1 240 (*)	14,6
M 25 EA	0,70	0,70	26,8	13,7	343 et 1 000 (*)	14,7
M 30 CV	0,74	0,52	48,5	12,6	353	11,0
M 50 CV EA	0,45	0,36	49,0	14,3	233	14,5
M 50 EA	0,39	0,39	49,5	13,3	237 et 3 500	13,3
M 50 CV	0,56	0,45	53,0	14,1	323	11,6
M 50	0,48	0,48	55,5	14,4	347	12,0
M 75 FS EA	0,34	0,32	67,0	10,3	180 et 6 000	9,8
M 75 EA	0,27	0,27	68,5	10,7	180 et 21 667	8,7
M 75	0,32	0,32	75,0	11,5	180	6,6
M 75 FS	0,38	0,36	85,5	10,0	180	5,8
M 100 FS	0,33	0,30	109,0	8,4	200	5,5
M 120 FS	0,26	0,23	127,5	7,4	223	4,8

(*) Les domaines considérés dans ce cas sont $37 \text{ \AA} < r_p < 0,06 \text{ \mu m}$ et $0,06 \text{ \mu m} < r_p < 60 \text{ \mu m}$.

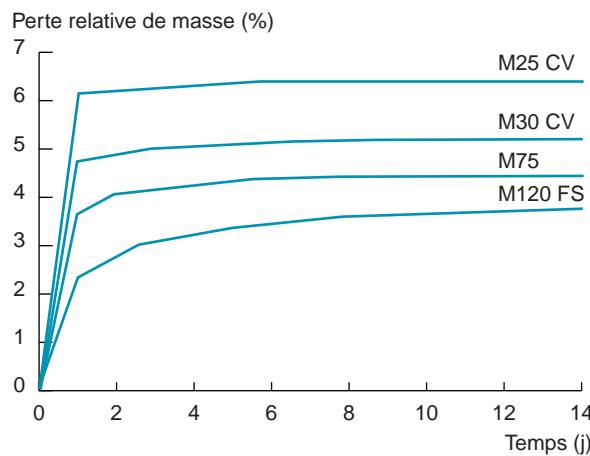


Fig. 6 - Perte relative de masse enregistrée au cours du prétraitement sur les échantillons destinés aux mesures par intrusion de mercure.

pertes relatives de masse obtenues au cours de ce séchage, pour différents bétons de la gamme testée. On remarquera que ces pertes augmentent, comme attendu, avec la teneur en eau initiale du matériau.

La mesure a été réalisée avec un porosimètre à mercure équipé de deux postes (*Pascal 140* et *Porosimeter 2000 WS*), où la pression d'injection maximale est de 200 MPa. Seuls les pores dont le rayon r_p vérifie $37 \text{ \AA} < r_p < 60 \mu\text{m}$ sont donc accessibles avec cet appareil.

Résultats

Les résultats des mesures par intrusion de mercure, obtenus pour l'ensemble des quinze formules de béton, sont présentés dans le tableau II (moyenne des trois échantillons testés) et sur la figure 7. Dans le tableau II sont reportées les valeurs de porosité. Figurent également dans ce tableau les rayons moyens correspondant à chacun des domaines de rayons de pores suivants : $37 \text{ \AA} < r_p < 0,1 \mu\text{m}$ et $0,1 \mu\text{m} < r_p < 60 \mu\text{m}$. Dans le cas où la distribution des tailles de pores est quasiment monomodale (i.e. le volume poreux correspondant à l'un des domaines est très nettement supérieur à celui

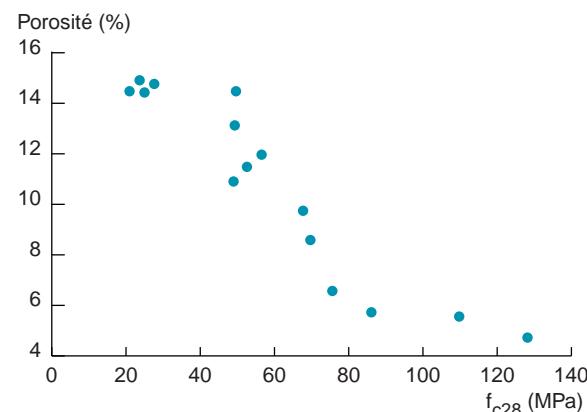


Fig. 7 - Porosité accessible au mercure des quinze formulations de béton mesurée à l'âge de vingt-huit jours, en fonction de leur résistance mécanique moyenne à la compression à vingt-huit jours.

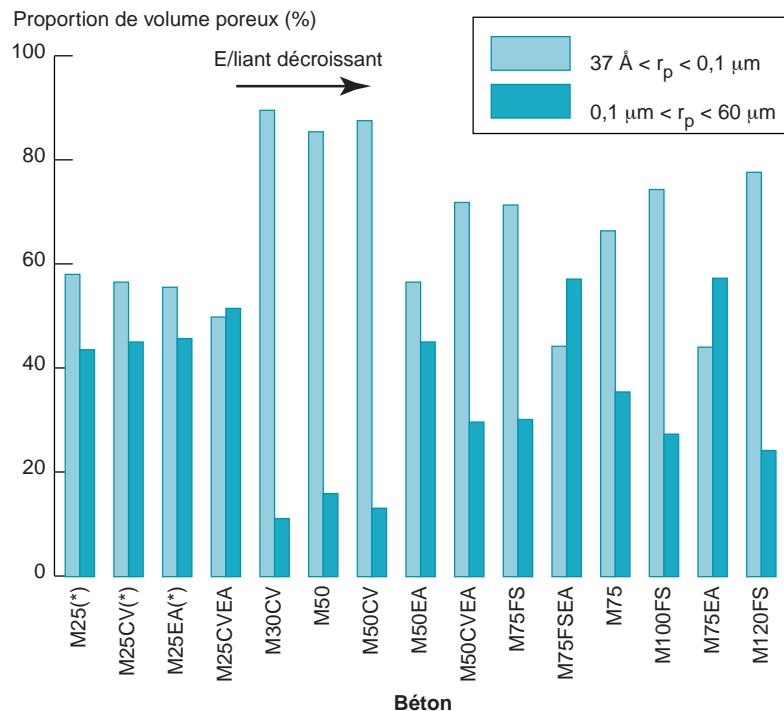
correspondant à l'autre), le rayon moyen des pores de l'ensemble de la distribution est indiqué. Dans le cas où la distribution des tailles de pores est plutôt bimodale (i.e. pour chacun des deux domaines considérés, les volumes poreux sont du même ordre), le rayon moyen correspondant à chacun des deux domaines est précisé.

Les résultats présentés dans le tableau II montrent que, dans le cas des formules sans entraîneur d'air, lorsque l'on passe des bétons bas de gamme aux bétons ordinaires de meilleure qualité, puis aux BHP, et enfin aux BTHP, la porosité mesurée par intrusion de mercure diminue. Plus précisément, pour les formules sans addition, quand le rapport E/C décroît, la porosité diminue. Avec un rapport E/C moyen ou faible, lorsque l'on ajoute des cendres volantes ou des fumées de silice, la porosité diminue par rapport à une formulation équivalente sans addition (même avec un E/C légèrement plus élevé). Lorsque l'on ajoute une forte quantité d'addition, même avec un fort E/C, la porosité diminue fortement (cas du M 30 CV contenant 43 % de cendres volantes).

On remarquera que la porosité des trois bétons contenant de la fumée de silice est très faible. Celle-ci est d'environ 5 à 6 %. Cette valeur représente la moitié de celle d'un bon béton ordinaire. Certains BTHP peuvent même présenter une porosité encore plus faible [5].

La figure 8 compare les proportions de volume poreux correspondant aux deux domaines de rayons de pores considérés ($37 \text{ \AA} < r_p < 0,1 \mu\text{m}$ et $0,1 \mu\text{m} < r_p < 60 \mu\text{m}$) pour chaque béton testé. Cette figure met clairement en évidence l'influence de chaque paramètre de formulation (rapport 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. La figure 9 présente les courbes de volume cumulé et les distributions des tailles de pores obtenues par intrusion de mercure pour différents bétons de la gamme testée, incluant le plus poreux et le moins poreux. 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 résultats présentés dans les figures 8 et 9 montrent que la distribution des tailles de pores est bimodale dans le cas d'un fort rapport E/C (les M 25) ou dans le cas de l'incorporation d'un entraîneur d'air. Elle est monomodale dans le cas d'un rapport E/C moyen à faible (à partir des M 50) ou dans le cas de la présence d'additions pouzzolaniques. Ce cas correspond plus précisément à un rapport E/liant moyen à faible ($< 0,60$, avec le ciment et les dosages utilisés ici). En particulier, la distribution des tailles de pores du béton M 30 CV contenant une importante quantité de cendres volantes est monomodale, malgré son fort rapport E/C. De plus, 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 200 \AA à partir de $E/C \approx 0,35$ (correspondant aux M 75).



(*) : les domaines considérés dans ce cas sont $37 \text{ \AA} < r_p < 0,06 \mu\text{m}$ et $0,06 \mu\text{m} < r_p < 60 \mu\text{m}$.

Fig. 8 - Répartition du volume poreux mesuré par intrusion de mercure pour les quinze bétons âgés de 28 jours.

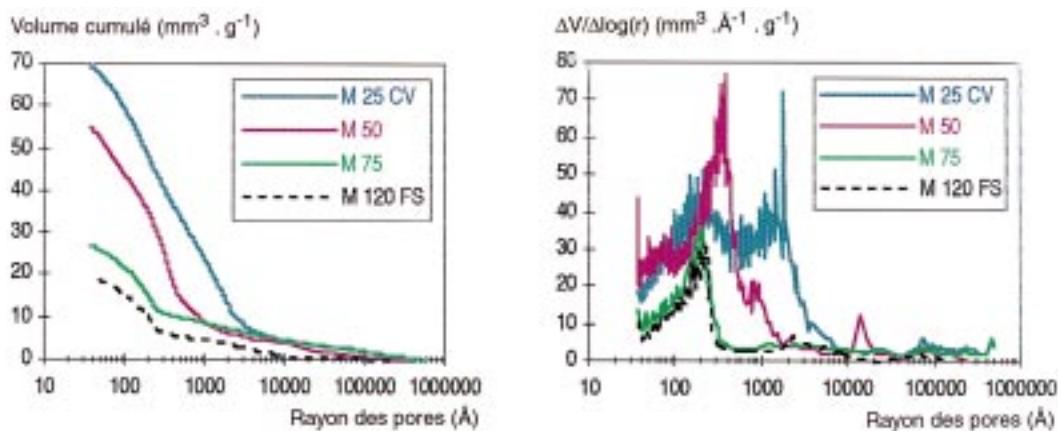


Fig. 9 - Courbes de volume cumulé et distributions des tailles de pores obtenues par intrusion de mercure pour les quinze bétons âgés de 28 jours.

En plus d'une porosité plus faible, les BHP et BTHP présentent un réseau poreux plus fin que les bétons de formule ordinaire, conséquence de leur faible rapport E/C, de l'incorporation de fumée de silice et d'un squelette granulaire optimisé. Ces caractéristiques vont avoir une influence directe sur les propriétés de transport de ces matériaux, et donc sur leur durabilité [6].

Effet de l'air entraîné sur la structure poreuse

À partir des résultats expérimentaux obtenus sur la gamme de bétons testés, il est possible d'examiner l'effet de l'air entraîné, les autres paramètres restant égaux, pour des bétons de différents niveaux de résistance. Il est toutefois à noter que les formules avec entraîneur d'air ont toutes ici un E/C plus faible que les

bétons de même niveau de résistance formulés sans air entraîné. En effet, le réseau de bulles d'air, qui améliore l'ouvrabilité du matériau frais, impose de réduire la quantité d'eau de gâchage lorsque l'on s'impose une consistance prédéfinie.

Cas des BHP

Les formules M 75 avec air entraîné, 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 que les formules équivalentes sans air entraîné (tableau III). Ceci résulte de la création d'une macroporosité notable, nettement visible sur la distribution des tailles de pores des matériaux, qui ne modifie pas le reste du réseau poreux,

TABLEAU III
Caractéristiques des bétons M 75

Béton	E/C	Teneur en air (*) (%)	f_{c28} (MPa)	Porosité H_2O (%)	Porosité Hg (%)
M 75	0,32	0,6	75,0	11,5	6,6
M 75 EA	0,27	6,7	68,5	10,7	8,7
M 75 FS	0,38	0,5	85,5	10,0	5,8
M 75 FS EA	0,34	5,1	67,0	10,3	9,8

(*) Mesurée sur béton frais, lors de la fabrication des éprouvettes.

mais qui accroît sa connectivité (fig. 10). Un volume poreux supplémentaire (pic localisé autour de 10^4 Å) apparaît dans une gamme de rayons de pores beaucoup plus grands que ceux correspondant à l'autre mode poreux existant dans ce type de béton avec ou sans air entraîné (≈ 200 Å). La mesure de la porosité par pesée hydrostatique, trop globale, n'est visiblement pas assez discriminante pour enregistrer cet effet (tableau III).

Il y a lieu de mentionner en outre que la proportion de volume relative à cette macroporosité, quantifiée ici par intrusion de mercure, est probablement sous-estimée, vu que cette technique sous-estime systématiquement le volume des pores les plus gros, comme il l'a été montré par comparaison avec l'analyse d'images [7].

Il est bien connu que l'ajout d'air entraîné a des conséquences négatives sur les propriétés mécaniques de ce type de béton (+ 1 % d'air implique - 5 % pour f_{c28}). Cet effet résulte des modifications de la microstructure du matériau mises en évidence ici. On peut prévoir que ces modifications microstructurales vont également avoir des conséquences négatives sur certaines propriétés de durabilité des matériaux, comme par exemple l'augmentation de la perméabilité aux gaz [6]. Ce coefficient de transfert est en effet directement influencé par l'augmentation de la connectivité du réseau des vides dans la gamme de tailles considérée.

Cas des bétons ordinaires

Les mêmes tendances sont enregistrées pour les bétons M 50 (tableau IV). Mais ici l'ensemble de la structure

TABLEAU IV
Caractéristiques des bétons M 50

Béton	E/C	Teneur en air (*) (%)	f_{c28} (MPa)	Porosité H_2O (%)	Porosité Hg (%)
M 50	0,48	1,1	55,5	14,4	12,0
M 50 EA	0,39	7,2	49,5	13,3	13,3
M 50 CV	0,56	1,1	53,0	14,1	11,6
M 50 CV EA	0,45	5,0	49,0	14,3	14,5

(*) Mesurée sur béton frais, lors de la fabrication des éprouvettes.

poreuse en présence d'air entraîné est modifiée, vu que ces formules ont un E/C nettement plus faible que celles sans air (fig. 11).

Cas des bétons bas de gamme

Dans le cas des M 25, le réseau poreux et, en particulier, sa connectivité ne sont pas notablement modifiés par la présence d'air entraîné, étant donné qu'un volume poreux important est déjà présent dans la gamme des macropores pour les formules sans air entraîné. Des porosités accessibles au mercure et des distributions de tailles de pores similaires sont en effet obtenues pour les M 25 avec ou sans air (tableau V et fig. 12).

En outre, l'ajout d'air entraîné dans les bétons maigres peut améliorer les caractéristiques mécaniques grâce à

TABLEAU V
Caractéristiques des bétons M 25

Béton	E/C	Teneur en air (*) (%)	f_{c28} (MPa)	f_{t28} (MPa)	E_{28} (MPa)	Porosité H_2O (%)	Porosité Hg (%)
M 25	0,84	2,4	24,5	2,65	32,0	16,2	14,6
M 25 EA	0,70	4,1	26,8	2,84	32,6	13,7	14,7
M 25 CV	0,96	1,1	23,5	2,52	31,2	14,5	15,0
M 25 CV EA	0,84	6,6	20,5	2,30	29,7	16,4	14,6

(*) Mesurée sur béton frais, lors de la fabrication des éprouvettes.

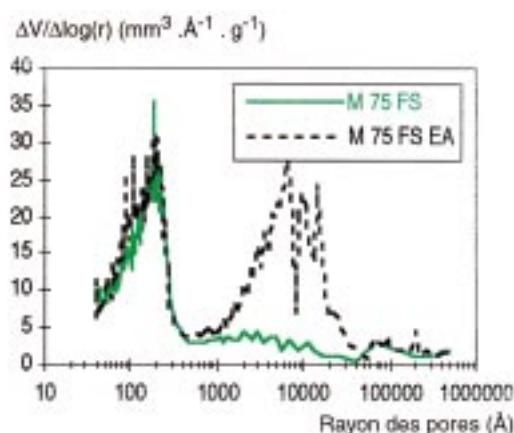
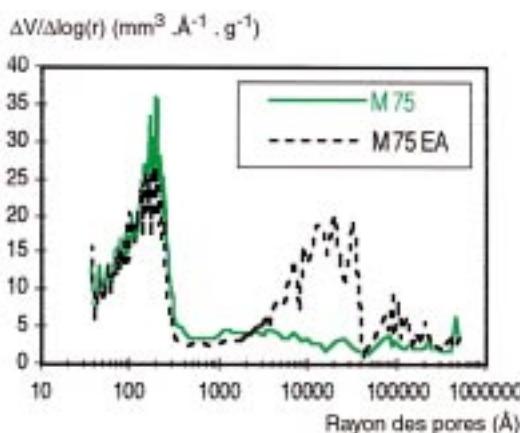


Fig. 10 - Distributions des tailles de pores des bétons à hautes performances (M 75) avec ou sans air entraîné obtenues par intrusion de mercure, à l'âge de vingt-huit jours.

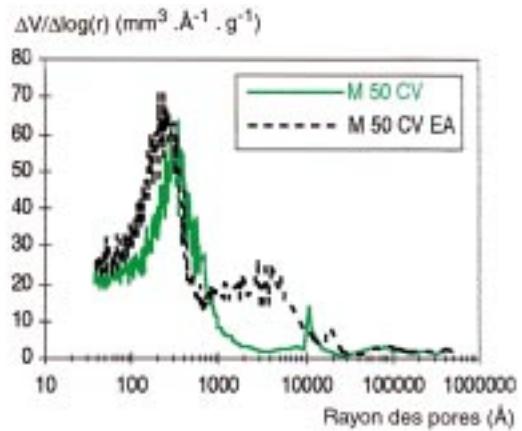
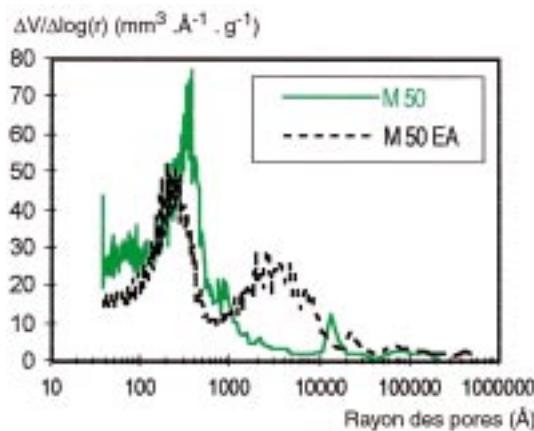


Fig. 11 - Distributions des tailles de pores des bétons ordinaires (M 50) avec ou sans air entraîné obtenues par intrusion de mercure, à l'âge de vingt-huit jours.

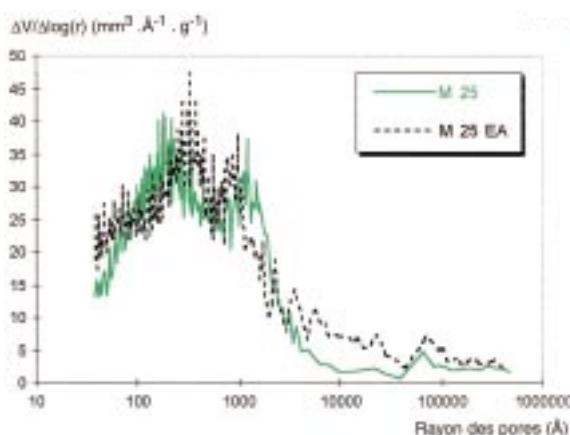


Fig. 12 - Distributions des tailles de pores des bétons bas de gamme (M 25) avec ou sans air entraîné obtenues par intrusion de mercure, à l'âge de vingt-huit jours.

une amélioration de la stabilité (diminution du ressage) et un meilleur arrangement des grains à l'état frais. C'est ce que l'on constate sur les résultats obtenus pour le béton M 25 EA (tableau V). Néanmoins, la diminution du rapport E/C et une teneur en air limitée contribuent ici également à cet effet.

Comparaison entre les porosités accessibles à l'eau et au mercure

Le tableau II et la figure 13 permettent de comparer les valeurs de porosité obtenues par pesée hydrostatique et par intrusion de mercure à l'âge de vingt-huit jours pour les quinze formules de béton. On remarque que les valeurs de porosité mesurée par intrusion de mercure sont semblables ou inférieures aux valeurs de porosité

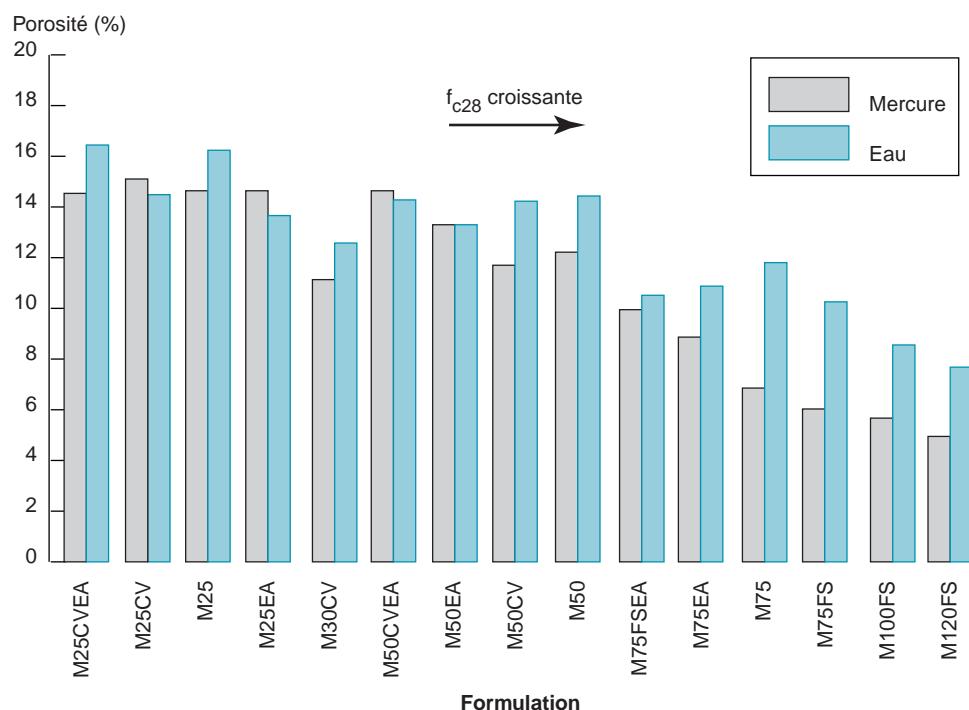


Fig. 13 - Comparaison des valeurs de porosité des quinze formulations de béton déterminées par pesée hydrostatique et par intrusion de mercure, à l'âge de 28 jours.

à l'eau. Cette constatation est tout à fait courante. Elle s'explique par le fait que seuls les pores tels que $37\text{Å} < r_p < 60\text{ }\mu\text{m}$ sont accessibles avec le porosimètre à mercure utilisé, alors qu'avec l'eau, tous les pores sont en principe accessibles, aux problèmes de cinétique près. Les mesures par intrusion de mercure sous-estiment le volume des pores de grandes dimensions [7]. De plus, l'important volume de pores relatifs aux silicates de calcium hydratés C-S-H n'est que très partiellement accessible par cette technique [5]. En conséquence, par exemple pour les bétons présentant à la fois une faible porosité capillaire et une importante quantité de C-S-H (cas des BHP avec fumées de silice), la proportion de pores non accessibles au mercure devient grande devant la porosité détectable par cette technique. Ceci creuse la différence entre les porosités mesurables par chacune des deux techniques, d'où l'écart entre les valeurs enregistrées.

Il est clair qu'une valeur de porosité n'est pas une caractéristique intrinsèque du matériau. Cette valeur est conditionnée à la fois par la méthode de prétraitement et par la technique de mesure, ces dernières devant explicitement être mentionnées en accompagnement de tout résultat expérimental.

Quantification de la microfissuration par analyse d'images

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, à l'âge de vingt-huit jours après conservation dans l'eau (état initial), par

une technique d'imprégnation par une solution de colorant rouge d'échantillons (disques) polis. L'observation a été effectuée au microscope optique en lumière réfléchie (fig. 14 et 15).

Les microfissures et les discontinuités d'interface pâte-granulat ont été quantifiées par analyse d'images. Le système d'analyse d'images et la procédure qui ont été utilisés sont décrits dans la référence [8]. 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 [8]. Les critères de reconnaissance mis en place tiennent compte des discontinuités aux interfaces pâte-granulat. Une fois identifiées, les microfissures sont simplifiées à l'aide de traitements morphologiques binaires (squelettisation, ébarbulage) et isolées dans une image. Puis, celles-ci sont quantifiées par la méthode des projections totales automatisée (fig. 16), après identification des points multiples et séparation des branches. Les microfissures sont modélisées en fin de traitement par des segments de droites enregistrés dans un repère global. Un algorithme spécifique permet de répéter le traitement précédent pour la totalité des champs de la surface de l'échantillon au moyen d'un balayage automatique en XYZ et d'un recollement des champs.

La procédure d'analyse d'image permet de déterminer les paramètres suivants :

- **La longueur spécifique (ou densité) de microfissures L_A (en mm/mm^2), calculée par :**

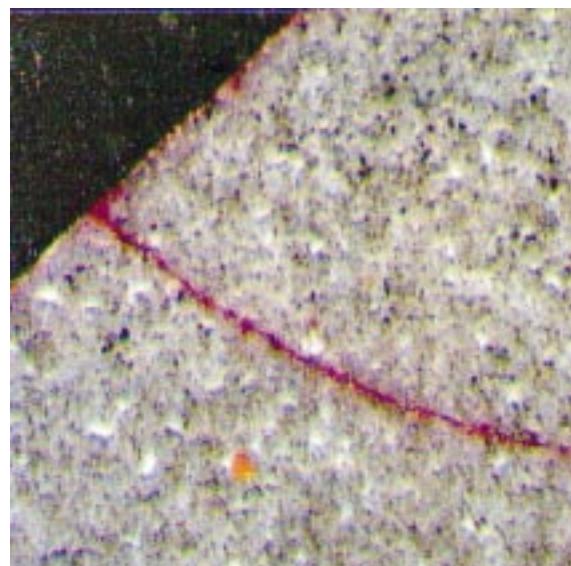
$$L_A = \frac{L}{A}$$

où L est la longueur développée de microfissures (en mm) et A est l'aire analysée (en millimètres carrés).



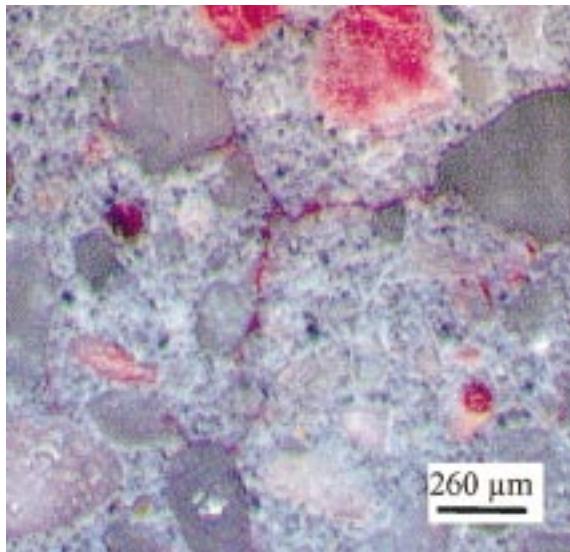
[1] Zone interfaciale pâte-granulat microporeux.

a. - Discontinuité à l'interface pâte-granulat ($G = 40\times$).

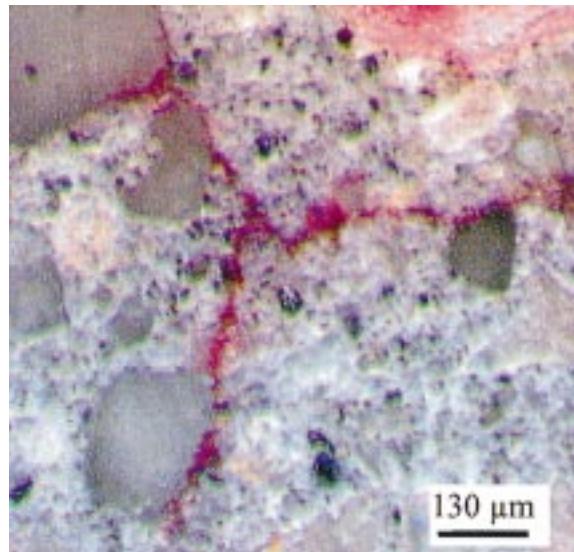


b. - Microfissure dans la pâte de ciment ($G = 80\times$).

Fig. 14 - Images obtenues sur le béton M 75 FS (imprégnation par un colorant rouge et observation au microscope optique en lumière réfléchie).

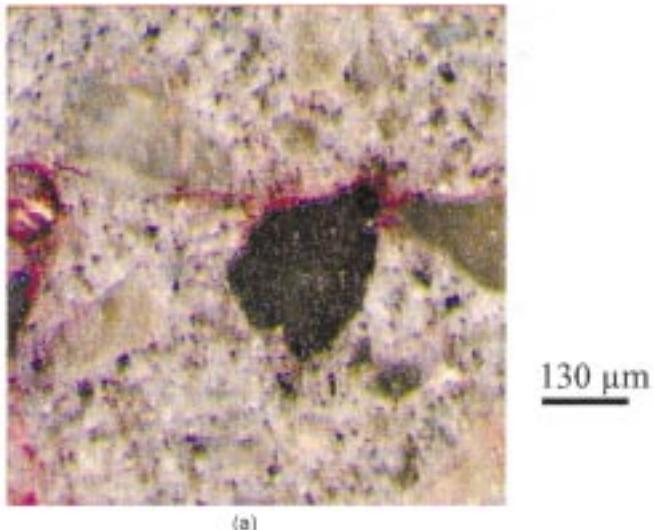


a. - Microfissures dans la pâte, reliant des granulats ($G = 40x$).

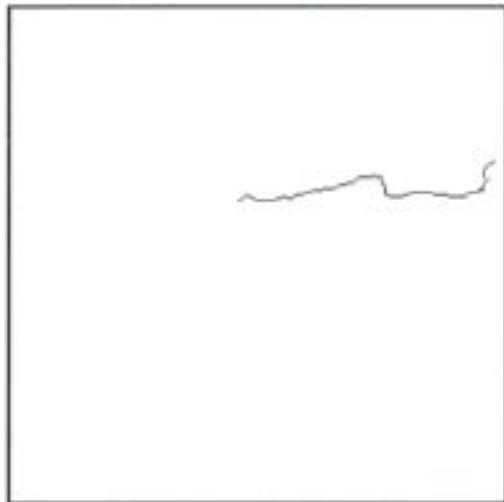


b. - Détail de l'image (a) au niveau des microfissures ($G = 80x$).

Fig. 15 - Images obtenues sur le béton M 100 FS
(imprégnation par un colorant rouge et observation au microscope optique en lumière réfléchie).



10



(b)

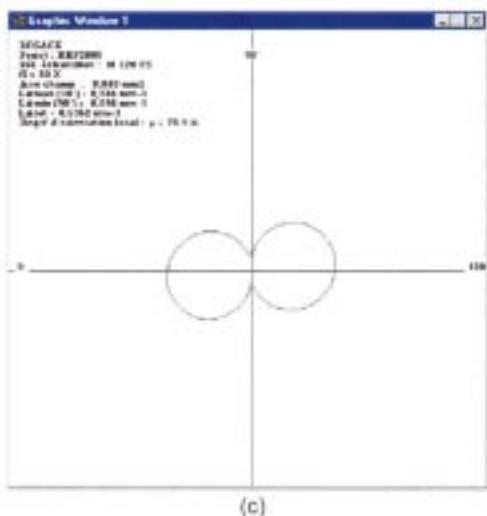


Fig. 16 - Quantification des microfissures par traitement d'images (méthode des projections totales automatisée).

a. - Image initiale acquise sur le béton M 120 FS ($G = 80 \times$).

b. - Microfissure extraite de l'image (a) par traitements successifs.

c. - Rosace de la longueur spécifique de microfissures du champ traité.

- **Le degré d'orientation des microfissures μ (en %)**, permettant d'évaluer leur orientation préférentielle éventuelle. Ce paramètre varie entre 0 % pour une structure parfaitement isotrope et 100 % pour une structure parfaitement orientée. μ est calculé par la relation suivante :

$$\mu = \frac{(L_{A,\max} - L_{A,\min})}{(L_{A,\max} + \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \cdot L_{A,\min})}$$

Les paramètres $L_{A,\max} = \max(L_A(\theta_i))$ et $L_{A,\min} = \min(L_A(\theta_i))$ sont respectivement les densités de microfissures maximale et minimale (en mm/mm²). L'angle θ_i varie entre 0 et 170° avec un pas de 10 degrés.

- **La proportion de surface saine A_{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 des mesures effectuées avec la technique décrite ont conduit à un coefficient de variation sur L_A de l'ordre de 5 %, correspondant aux erreurs expérimentales. Ceci implique que les valeurs données pour L_A doivent s'entendre à 0,05 mm⁻¹ près. Concernant μ , le coefficient de variation est de l'ordre de 15 % [8].

Une surface totale d'environ 18,4 cm² située dans la zone centrale de chaque échantillon a été analysée. Elle a été découpée à cet effet, au grossissement de 80x utilisé dans l'analyse, en 2 240 champs élémentaires joints de dimensions 0,92 × 0,92 millimètres carrés.

Résultats et analyse

Les longueurs spécifiques de microfissures obtenues pour les quinze bétons à l'âge de vingt-huit jours après conservation dans l'eau (état initial), sont présentées dans le tableau VI et la figure 17. Les valeurs sont comprises entre 0,02 et 0,26 mm⁻¹. Relativement à d'autres résultats obtenus avec la même technique, ces densités

TABLEAU VI
Longueur spécifique (L_A) et degré d'orientation (μ)
des microfissures, et proportion de surface « saine » (A_{saine})
déterminés par analyse d'images pour les quinze bétons
à l'âge de vingt-huit jours

Béton	E/C	f_{c28} (MPa)	L_A (mm ⁻¹)	A_{saine} (%)	μ (%)
M 25 CV EA	0,84	20,5	0,11	87,0	13,8
M 25 CV	0,96	23,5	0,17	83,4	14,6
M 25	0,84	24,5	0,24	70,0	20,4
M 25 EA	0,70	26,8	0,08	87,1	23,1
M 30 CV	0,74	48,5	0,10	83,0	21,1
M 50 CV EA	0,45	49,0	0,04	89,5	0,17
M 50 EA	0,39	49,5	0,22	67,3	14,8
M 50 CV	0,56	53,0	0,13	78,2	22,8
M 50	0,48	55,5	0,10	81,8	21,6
M 75 FS EA	0,34	67,0	0,09	86,3	13,2
M 75 EA	0,27	68,5	0,07	83,6	22,0
M 75	0,32	75,0	0,26	73,6	19,1
M 75 FS	0,38	85,5	0,21	80,3	23,2
M 100 FS	0,33	109,0	0,02	90,0	11,2
M 120 FS	0,26	127,5	0,13	69,0	35,4

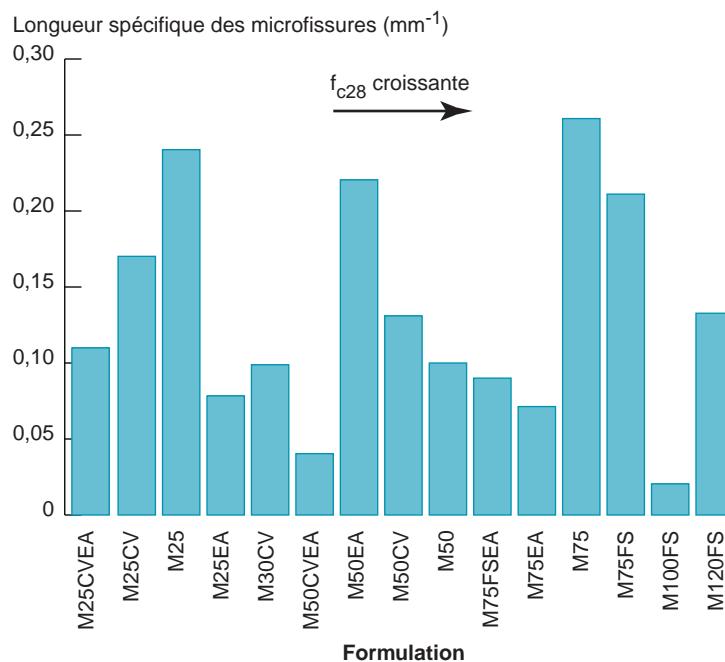


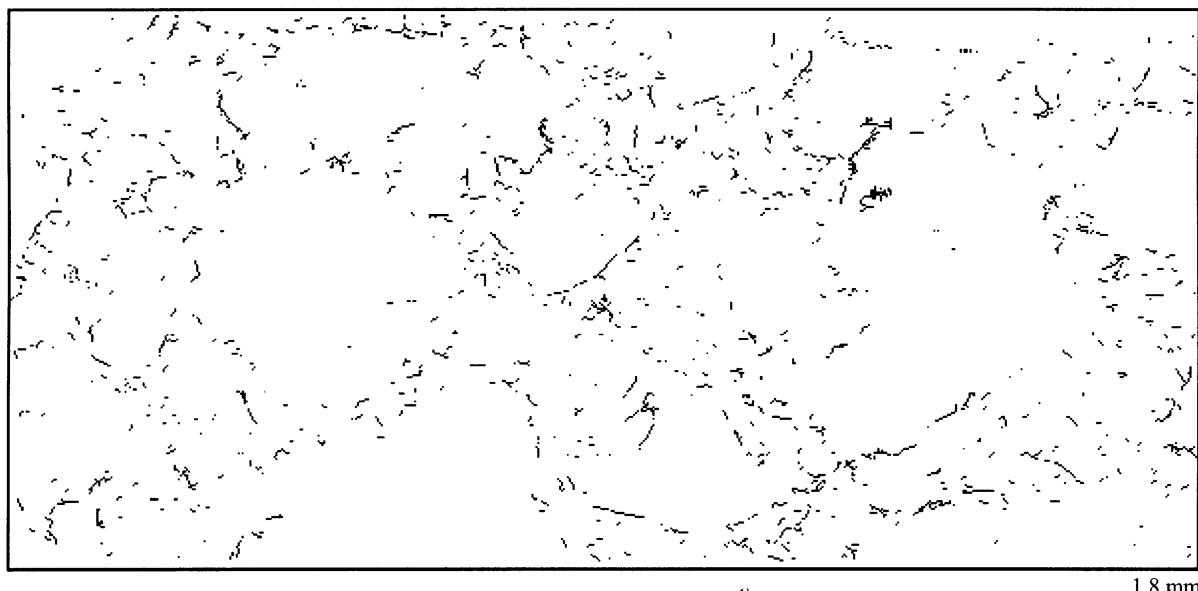
Fig. 17 - Longueurs spécifiques de microfissures des quinze bétons, déterminées par analyse d'images à l'âge de vingt-huit jours.

peuvent être considérées comme faibles et indicatives d'une microfissuration peu développée pour chacun des bétons testés. À titre indicatif, une densité de l'ordre de $0,7 \text{ mm}^{-1}$ a été mesurée pour un béton de rapport E/C = 0,42 ayant subi un traitement thermique à $T = 50^\circ\text{C}$ pendant 8 heures [8].

La figure 17 illustre qu'il n'y a pas de relation directe entre f_{c28} et la densité de microfissures. Les formules présentant le plus de microfissures sont M 75 et M 25. Les bétons les moins microfissurés sont M 100 FS et M 50 CV EA. Les longueurs spécifiques de $0,26 \text{ mm}^{-1}$ et $0,21 \text{ mm}^{-1}$ mesurées respectivement sur le M 75 et le M 75 FS, qui sont 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 des problèmes rhéologiques et de stabilité à l'état frais, à l'origine de ressage, d'hétérogénéité, d'une mauvaise qualité de parement et de la qualité très variable constatée suivant les gâchées [1, 2].

Les figures 18a et 18b comparent les cartographies de microfissuration du béton le plus microfissuré (M 75 avec $L_A = 0,26 \text{ mm}^{-1}$) et du béton le moins microfissuré (M 100 FS avec $L_A = 0,02 \text{ mm}^{-1}$). Sur le M 75, 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



a. - Béton M 75 ($L_A = 0,26 \text{ mm}^{-1}$).

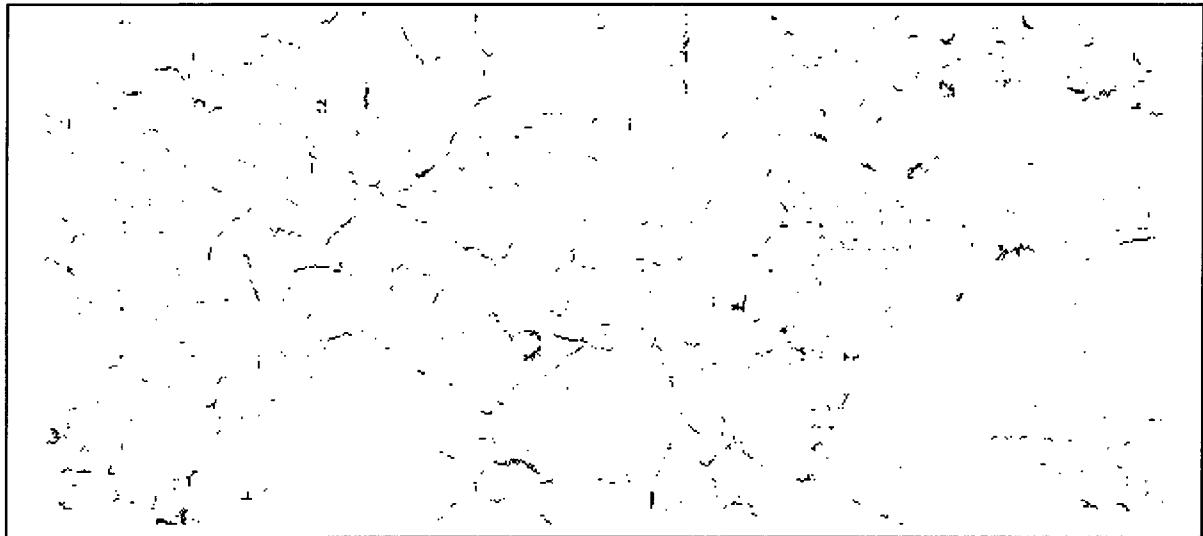
1,8 mm



b. - Béton M 100 FS ($L_A = 0,02 \text{ mm}^{-1}$).

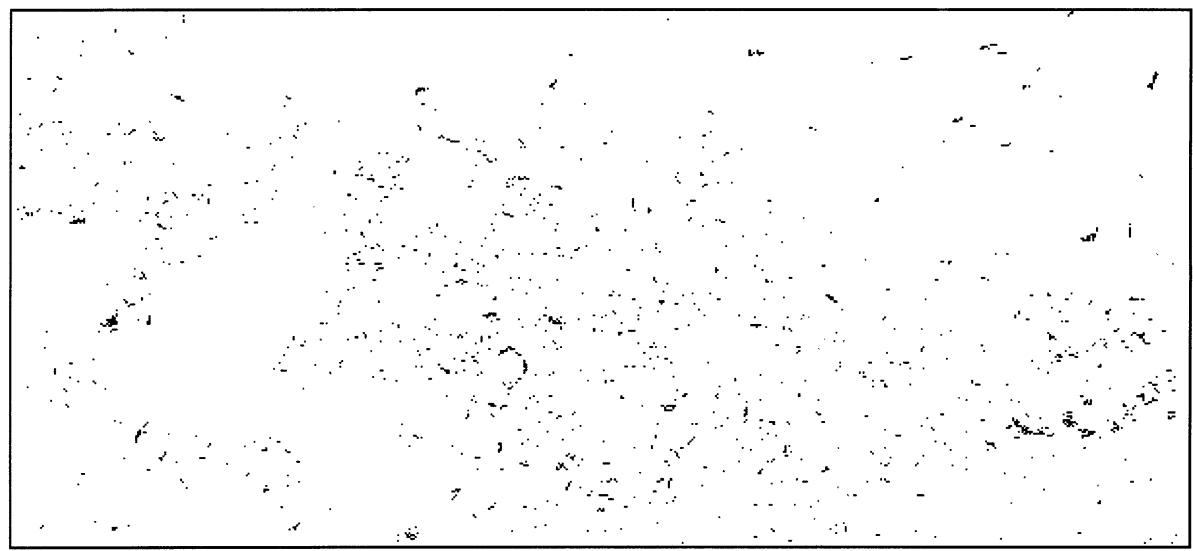
1,8 mm

Fig. 18 - Cartographies de microfissuration.



c. - Béton M 50 CV ($L_A = 0,13 \text{ mm}^{-1}$)

1,8 mm



d. - Béton M 120 FS ($L_A = 0,13 \text{ mm}^{-1}$)

1,8 mm

Fig. 18 - Cartographies de microfissuration.

dans le plan d'observation. Très peu de microfissures ont été détectées dans le béton M 100 FS, que ce soit aux interfaces pâte-granulat ou au sein de la pâte.

Les figures 18c et 18d illustrent qu'avec des valeurs identiques de longueur spécifique (ici $L_A = 0,13 \text{ mm}^{-1}$ pour les bétons M 50 CV et M 120 FS), le faciès de fissuration peut cependant être très différent. Le faciès de fissuration du béton M 50 CV est relativement similaire à celui décrit précédemment pour le béton M 75, mais avec une microfissuration moins développée. En revanche, le béton M 120 FS présente de petites microfissures, nombreuses mais très faiblement connectées. Il semble plutôt s'agir de petites bulles ou de zones microporeuses de la pâte de ciment ayant vraisemblablement une forme allongée et qui auraient été de ce

fait prises en compte lors de l'identification par l'algorithme de traitement. En outre, très peu de fissures ont été détectées aux interfaces pâte-granulat.

De façon générale, les cartographies de fissuration indiquent une répartition spatiale plutôt homogène, avec toutefois dans la plupart des cas une concentration des défauts aux interfaces.

Les valeurs de degré d'orientation obtenues, comprises entre 11 et 35 %, sont indicatives d'une microfissuration globalement peu orientée (tableau VI).

Les proportions de champs non fissurés sur la surface des disques, comprises entre 66 et 90 % confirment l'étendue limitée de la fissuration (tableau VI).

Les bétons à hautes et à très hautes performances étudiés ici apparaissent très faiblement microfissurés à

l'échéance considérée (état initial), à l'échelle de l'observation et avec la technique employée. Cependant, il est fréquent de détecter l'existence de microfissures à l'état initial dans des BHP plus âgés, même s'ils n'étaient pas microfissurés à vingt-huit jours [9]. On peut également citer des observations récentes par microscopie environnementale qui ont mis en évidence la présence de microfissures sur des pâtes de ciment à hautes performances ($E/C = 0,25$) n'ayant subi aucun séchage exogène [10]. Cette microfissuration est attribuée au retrait d'autodessiccation, plus prononcé dans ces matériaux comparativement aux bétons ordinaires, principalement à cause de leur faible rapport E/C [11, 12, 13]. Cependant, l'ouverture des microfissures varie fortement avec l'humidité relative (HR) du milieu environnant. L'ouverture augmente dans le cas d'une baisse d'HR allant jusqu'à 40 % et les fissures se referment de manière significative lorsque l'HR atteint 90 % [10]. Ce phénomène, combiné avec la poursuite de l'hydratation (cicatrisation) aux très hautes humidités relatives ou en présence d'eau liquide, laisse penser que cette microfissuration n'aura pas un rôle préjudiciable vis-à-vis de propriétés de transport telles que la perméabilité à l'eau. Par contre, on pourrait se poser plus de questions en ce qui concerne la perméabilité aux gaz. Différents auteurs ont en effet montré que la perméabilité aux gaz mesurée sous chargement sur des mortiers était sensible à l'apparition et à l'ouverture des microfissures [14]. Toutefois, la perméabilité aux gaz ne peut augmenter de façon notable que si cette microfissuration est connectée. Or, il s'avère que la microfissuration inhérente aux BHP est rarement connectée et que l'on mesure toujours des perméabilités aux gaz faibles sur ces matériaux [6, 9, 15].

Conclusions et perspectives

Les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude mettent en évidence que les bétons à hautes et à très hautes performances sont particulièrement peu poreux et présentent un réseau poreux très fin. L'incorporation d'un entraîneur d'air dans la formulation de

ces bétons augmente toutefois de façon notable la connectivité du réseau poreux. Ceci est susceptible de modifier de façon drastique les propriétés, notamment de transport, du matériau. Tous les bétons testés présentent à l'échéance considérée (état initial) une microfissuration limitée. Il sera toutefois intéressant de suivre l'évolution dans le temps de cette microfissuration, notamment celle des BHP et BTHP contenant des fumées de silice, étant donné que ces bétons sont souvent suspectés de développer une microfissuration à long terme.

Une caractérisation microstructurale incluant la détermination de la distribution des tailles de pores, des observations au MEB et une quantification de la microfissuration est donc à envisager à long terme sur certaines formules de la série. Une telle campagne de mesures devra être réalisée, d'une part sur des échantillons conservés en laboratoire, et d'autre part sur des prélèvements effectués *in situ* sur les corps d'épreuve en béton armé installés sur les différents sites naturels de vieillissement. L'évolution des caractéristiques microstructurales des bétons pourra être confrontée à celle des caractéristiques mécaniques déterminées aux mêmes échéances. En plus des BHP et des BTHP, des bétons tels que le M 30 CV (contenant 43 % de cendres volantes par unité de masse de ciment) pourront être étudiés à long terme et *in situ*. On peut en effet s'attendre à ce que la porosité particulièrement faible et la finesse du réseau poreux, enregistrées sur ce matériau après vingt-huit jours de conservation dans l'eau malgré un rapport E/C égal à 0,74, ne soient pas obtenues sur les corps d'épreuve installés sur sites, ceux-ci n'ayant pas bénéficié d'une cure humide.

Les articles suivants de la série « Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI^e siècle » renseigneront le lecteur sur les propriétés de durabilité mesurées sur éprouvettes en laboratoire pour les quinze formules de béton, ainsi que sur l'organisation pratique de l'expérimentation sur sites de vieillissement avec les premiers résultats obtenus sur les corps d'épreuve *in situ*.

Remerciements. Les auteurs remercient le Projet national BHP 2000 pour son soutien financier à cette étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BAROGHEL BOUNY V. (1999), *Étude 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, janvier, 47 pages.
- [2] DE LARRARD F., BAROGHEL BOUNY V. (2000), Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI^e siècle. I – Généralités et caractéristiques mécaniques initiales des bétons, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **225**, mars-avril, pp. 51-65.
- [3] BAROGHEL BOUNY V., GAWSEWITCH J., AMMOUCHE A., HORNAIN H. (1999), *Étude expérimentale sur sites de vieillissement – Caractérisation microstructurale sur éprouvettes en laboratoire des bétons M25 à M120FS, à l'âge de vingt-huit jours*. Projet national BHP 2000 – Thème 1 : Durabilité,

- [4] AFPC-AFREM, *Durabilité des Bétons*, 11-12 décembre 1997, Toulouse, France, (LMDC, 1998), *Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau – Mode opératoire recommandé*, dans *Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité*, Compte-rendu des Journées techniques, pp. 121-124.
- [5] BAROGHEL BOUNY V. (1994), *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, Analyse, Interprétations*, LCPC, Paris, France, décembre, 468 pages.
- [6] BAROGHEL BOUNY V., CARCASSES M., QUENARD D., ARNAUD S. (1999), *Durability of concretes ranging from 20 to 120 MPa – Mix-parameter influence*, in Proceedings of 5th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, June 20-24, Sandefjord, Norway, (Edited by I. Holand & E.J. Sellevold, **vol. 2**, pp. 1377-1386.
- [7] DIAMOND S., LEEMAN M.E. (1995), *Pore size distribution in hardened cement paste by SEM image analysis*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **vol. 370**, pp. 217-226.
- [8] AMMOUCHE A. (1999), *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.
- [9] BAROGHEL BOUNY V., ROUGEAU P., CARE S., GAWSEWITCH J. (1998), *Étude 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*, 217, septembre-octobre, pp. 61-73.
- [10] KJELLSEN K.O., JENNINGS H.M. (1996), *Observation of microcracking in cement paste upon drying and rewetting by environmental scanning electron microscopy*, *Adv. Cem. Bas. Mat.*, **3**, pp. 14-19.
- [11] LE ROY R., DE LARRARD F. (1993), *Creep and shrinkage of high-performance concrete : the LCPC experience*, in Proceedings of the 5th Int. RILEM Symposium in Barcelona, RILEM 93 (E. & F.N. SPON, London, pp. 500-508.
- [12] PERSSON B. (1996), *Early basic creep of high-performance concrete*, in Proceedings of the 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance concrete BHP 96, 29-31 may, Paris, France (LCPC, Presses de l'ENPC), pp. 405-414.
- [13] BAROGHEL BOUNY V. (1997), *Experimental investigation of self-desiccation in high-performance materials – Comparison with drying behaviour*, in Proceedings of the International Research Seminar « Self-desiccation and its importance in Concrete Technology », June 10th, Lund, Sweden (Edited by B. Persson & G. Fagerlund, Lund,), pp. 72-87.
- [14] MEZIANI H., SKOCZYLAS F. (1999), *An experimental study of the mechanical behaviour of a mortar and of its permeability under deviatoric loading*, *Materials and structures*, **vol. 32**, juillet, pp. 403-409.
- [15] BAROGHEL BOUNY V., MAINGUY M., COUSSY O. (1999), *Isothermal drying process in weakly permeable cementitious materials – Assessment of water permeability*, in *Materials science of concrete special volume : transport in cement-based materials* (Proceedings of International Conference on ion and mass transport in cement-based materials, 4-5-oct., University of Toronto, Canada), (Edited by J. Marchand, J.J. Beaudoin, R.D. Hooton and M.D.A. Thomas, 2000).

ABSTRACT

The Ageing of Concrete in Natural Environments An experiment for the 21st century

II – Microstructural analysis of concrete samples with strengths of between 25 and 120 MPa

V. BAROGHEL-BOUNY, A. AMMOUCHE, H. HORNAIN, J. GAWSEWITCH

In 1996, in collaboration with the National BHP 2000 project, the network of Laboratoires des Ponts et Chaussées set up a multi-annual experimental programme in order to characterize 15 types of concrete with targeted compressive strengths of between 25 and 125 MPa, with particular reference to their durability. The aim of the study was to provide information in order to specify the materials to be used in structures on the basis of durability criteria and laboratory performance tests. Samples of the fifteen types of concrete were subjected to laboratory tests to establish their properties. Long term change was also monitored using precracked reinforced concrete specimens placed at a number of natural ageing sites.

This paper presents the results from the microstructural analysis of the concrete conducted in the laboratory on 28 day-old samples which had been conserved in water. The porosity to water was measured and the porous structure was investigated by mercury intrusion. The microstructure was examined using a scanning electron microscope and microcracking was quantified by image analysis using an optical microscope. Particular attention was paid to the influence of mix design parameters on these characteristics.

The results indicate that high performance concrete has particularly low porosity and a very fine porous network. However, if an air entraining agent is added to these concrete mixes the porous network becomes considerably more interconnected. This may drastically alter the properties of the material, in particular as regards transfer. All the samples exhibited limited microcracking after the period in question.

This paper is the second in a series entitled « The Ageing of Concrete in Natural Environments. An experiment for the 21st century ». Future papers in this series will present the durability properties of the fifteen types of concrete measured on laboratory samples and the first results from the specimens at the ageing sites.