

Les Bétons à Hautes Performances, apparus dans le milieu des années 1980, ont rapidement montré qu'ils ouvraient un vaste champ de progrès pour la construction, compte tenu non seulement de leur résistance mais surtout de leur microstructure qui amène les propriétés déterminantes pour leur utilisation. Ainsi, au-delà de la consolidation de nos connaissances, l'un des enjeux forts des années à venir est de modifier l'image du matériau béton, banal mélange de granulats, de ciment et d'eau à celle d'un produit hautement élaboré et faisant appel à une technologie de pointe.

C'est l'un des objectifs du Projet National « BHP 2000 » qui s'est constitué en 1995. Il regroupe une cinquantaine de partenaires : maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, entreprises, industriels, laboratoires, universitaires, bureaux d'études, etc. fédérés autour du programme de recherche et développement visant à la plus grande diffusion des BHP dans le BTP. Ce programme qui s'inscrit dans le cadre du plan Génie Civil est soutenu par les ministères de l'Équipement et de la Recherche. L'originalité réside en la collaboration étroite de spécialistes sur des champs différents, permettant de traiter à la fois des aspects microscopiques, macroscopiques, économiques et industriels.

Le programme de vieillissement des bétons en sites naturels s'inscrit particulièrement dans cet esprit mariant analyse de laboratoire et constatations sur corps d'épreuves et devrait aider à démontrer l'avantage des BHP alors que le principe du développement durable devient une référence.

Didier BRAZILLIER
Directeur technique du Projet national « BHP 2000 »

Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXIe siècle

RÉSUMÉ

Le réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées, en liaison avec le projet national BHP 2000, a lancé en 1996 une opération consistant à créer des sites de vieillissement naturel pour des corps d'épreuve en béton armé, afin d'en suivre l'évolution à long terme. Le but en est de fournir des éléments pour spécifier les matériaux à employer dans les structures, sur la base d'essais de performance en laboratoire. On trouve dans ce premier article des données expérimentales concernant 17 bétons, mis au point et caractérisés non seulement pour le présent projet, mais aussi à l'intention des partenaires du projet national. Les résistances en compression visées varient de 25 à 120 MPa. Pour chaque niveau de résistance retenu, les paramètres additions minérales et air entraînés ont été étudiés. De plus, les bétons à très hautes performances ont été doublés en changeant la nature du granulat (silex au lieu de calcaire). Outre les formulations, on donne les résultats des essais rhéologiques et mécaniques entre 18 heures et 90 jours. On s'est notamment intéressé aux effets de la cure (conservation à l'eau ou cure étanche) sur le développement des résistances en compression et en traction par fendage. Enfin, les lois de comportement en compression simple ont été systématiquement mesurées.

Le principal résultat de cette partie de l'étude est de fournir des « cartes d'identité » des différents bétons. Cependant, on a acquis au passage quelques résultats nouveaux concernant l'effet de la cure, et on a confirmé pour l'ensemble des bétons étudiés l'évolution non monotone de la résistance en traction par fendage en fonction du temps (croissance, maximum et diminution). Des essais sont prévus jusqu'aux échéances de dix ans afin de mieux explorer ce phénomène, qui semble plus marqué pour les BHP aux fumées de silice.

MOTS CLÉS : Laboratoire - Essai - Traction - Compression - Fissuration - Cure - Temps (durée) - Composition du mélange - Essai de résistance à la traction par fendage - Ouvrage d'art (gén.) - Béton armé.

I - Généralités et caractéristiques mécaniques initiales des bétons

François de LARRARD

Docteur de l'École nationale des Ponts et Chaussées
Chef de la division
Méthodes et matériels de constructions des routes
Laboratoire central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

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
Laboratoire central des Ponts et Chaussées
Centre de Paris

Introduction

À notre époque, la conception des ouvrages de génie civil doit, de plus en plus, prendre en compte le comportement à long terme. Ainsi, les bâtiments ont une durée de vie escomptée de l'ordre de 50 ans, contre 100 ans pour les ouvrages d'art, sans parler des conteneurs de déchets radioactifs, conçus pour des durées bien plus longues. La prise en compte de telles constantes de temps pose aux ingénieurs un défi redoutable : comment prévoir les mécanismes de dégradation par lesquels périra la structure étudiée ? En combien d'années ces mécanismes rendront-ils la structure impropre à son usage ? La question se pose lorsqu'on choisit le matériau, et lorsqu'on dimensionne la construction dans laquelle il entrera.

S'agissant des bétons de structure, la réglementation actuelle fixe des prescriptions de composition, qui dépendent de l'environnement futur auquel le matériau sera soumis, et dont l'observation est censée garantir la durabilité de la structure. C'est un progrès, par rapport à l'époque où seule la résistance mécanique était considérée. Par contre, ces prescriptions trouvent leur limite lorsqu'on sort du champ des matériaux connus depuis plusieurs décennies, dont on peut assurer la pérennité moyennant quelques spécifications de moyen. Longtemps, l'Administration s'est réfugiée dans une attitude conservatrice, consistant à éviter au maximum l'usage de bétons s'écartant des constituants classiques (granulats, ciment Portland et eau). Cette position n'est plus guère tenable aujourd'hui. D'une part, les potentialités offertes par la génération des bétons à hautes performances ne peuvent être ignorées des concepteurs, qui recherchent des matériaux leur permettant de construire des structures économiques et durables. Mais l'usage des BHP entraîne le recours à des constituants non traditionnels, tels que les superplastifiants. D'autre part, le thème émergeant du développement durable, qui, au-delà de la technique, implique une triple approche économique, environnementale et sociale, pousse les formulateurs à intégrer dans leurs matériaux un certain nombre de co-produits de l'industrie, afin d'éviter des mises en décharge coûteuses pour la collectivité. Paradoxalement, l'usage de certains de ces produits, comme les cendres volantes, les laitiers de haut fourneau ou les fumées de silice, peut être favorable à la qualité des structures en béton, pour peu qu'on sache les utiliser à bon escient.

Ainsi, devant la diversification des matériaux envisageables, l'ingénieur doit aujourd'hui s'appuyer sur des exigences performantes pour concevoir des structures durables. Ceci passe par les étapes suivantes :

- analyser les mécanismes physico-chimiques critiques, tels que la corrosion des armatures, la dégradation due aux cycles de gel-dégel ou encore les réactions internes de gonflement de type alcali-silice ou sulfatique ;
- faire apparaître dans ces analyses des constantes liées au matériau (indicateurs de durabilité) et mettre au point des méthodes de mesure ;
- à partir d'une exigence de durée de vie, en déduire des seuils d'acceptation des différentes paramètres précédemment dégagés.

La grande difficulté dans l'application de cette démarche idéale réside dans la complexité du matériau béton. Il s'ensuit que, dans les divers phénomènes de dégradation, les paramètres isolés sont rarement intrinsèques au matériau considéré : ils dépendent souvent de la taille des

échantillons de mesure, de leur état hygrométrique, du degré d'avancement des réactions d'hydratation, de leur microfissuration, etc. De plus, la mesure des paramètres de durabilité nécessite la plupart du temps une accélération des phénomènes, qui provoque parfois une modification de ces derniers. L'exécution d'essais de laboratoire liés à la durabilité du matériau, tels que ceux récemment proposés par l'AFREM [1], n'est donc pas suffisante pour s'assurer complètement de l'adéquation d'un matériau à son usage, défini par le triplet structure-environnement-durée de vie. Il faut confronter ces essais au comportement réel du matériau en place. Idéalement, l'intégration des paramètres mesurés en laboratoire dans des modèles mathématiques permettrait de prévoir la date d'apparition des dégradations de la structure. Cette utopie pourrait devenir bientôt une réalité pour certains phénomènes relativement simples tels que la carbonatation [2]. Cependant, d'autres phénomènes beaucoup plus complexes, comme par exemple l'écaillage dû aux sels de dé verglaçage, sont plus difficilement descriptibles par des systèmes d'équations aisément manipulables. Une approche plus modeste consisterait alors à comparer les essais de durabilité pratiqués sur une famille de bétons suffisamment large aux performances des mêmes matériaux placés dans différents environnements, afin de vérifier l'identité de classement, et de voir quel niveau on doit fixer pour garantir une certaine durée de vie.

Revue de la littérature sur les essais d'exposition à long terme

Des expériences d'exposition de corps d'épreuve ont été entreprises de longue date dans le port de La Rochelle (Charente-Maritime), où des échantillons de mortier étaient entreposés, dès 1883, pour étudier leur durabilité en milieu marin. Au début de ce siècle (1904-1911), l'expérience fut étendue à une série de cubes contenant différents ciments dosés à 300 ou 600 kg/m³. Plus récemment, soit en 1974, l'opération fut répétée avec des prismes de béton de teneurs variable en liant, également caractérisés en laboratoire. Le résultat de ces essais permit d'étayer les spécifications des ciments dits « prise Mer » de la COPLA (Commission Permanente des Liants Hydrauliques et des Adjuvants du béton). Enfin, en 1991, des dalles de béton armé ont été installées dans le même port. Les enrobages des armatures variaient entre 25 et 50 mm. Le but de ces expériences, toujours en cours, était de suivre la corrosion des aciers et d'évaluer la précision des méthodes de prévision de la pénétration des ions chlorure dans le béton.

À l'étranger, on trouve aussi des publications sur ce type d'études. Bremner [3] a dressé une liste

assez complète d'essais à long terme entrepris dans différents pays, visant à étudier les effets de la nature et des dosages des constituants des bétons sur leur tenue en ambiance marine. En 1920, démarrait une étude à St John (Nouveau Brunswick, Canada), suivie d'une autre étude à Ostende (Belgique) en 1934. On trouve également à la même époque un programme d'essais similaires à Trondheim (Norvège) en 1936. En ajoutant les stations du port de Tianjin en Chine et de la mer de Barents en ex-URSS, on voit que beaucoup de pays se sont posés les mêmes questions, et ont essayé d'apporter des réponses adaptées à leurs matériaux et à leur environnement spécifique.

Regardons à présent des études plus récentes, dans lesquelles les matériaux tendent à se rapprocher de ceux utilisés dans les bétons d'aujourd'hui. Au Japon, Sasatami et al. [4] relatent des essais de vieillissement naturels relatifs à des éprouvettes de béton non armé, placées dans trois environnements différents (en intérieur, à l'extérieur d'un bâtiment et sur une plage, en zone de marnage). Les bétons, tous à air entraîné, avaient un dosage en liant constant de 300 kg/m^3 , ce liant étant constitué soit de ciment Portland, soit de mélange ciment/addition (cendres volantes dosées à 30 % du total, laitier dosé à 50 % ou encore fumée de silice dosée à 10 %). Les résistances en compression des bétons ne dépassaient guère 30 MPa. Les résultats principaux de cette étude de cinq ans sont les suivants :

- les additions minérales ont affiné la distribution en taille des pores, occasionnant ainsi une diminution de la pénétration des ions chlorures (pour les éprouvettes exposées en ambiance marine) ;
- par contre, elles ont eu pour effet d'augmenter la profondeur de carbonatation (sauf la fumée de silice) ;
- l'effet de la cure est apparu important pour les bétons conservés en intérieur, mais pas pour ceux exposés à la pluie, qui semble provoquer, sur le long terme, un complément d'hydratation des liants.

Une autre étude japonaise [5] s'est déroulée sur une période de dix ans, et des mesures sont prévues en 2002 à échéance de 20 ans. Les corps d'épreuve de béton armé et préfissuré ont été placés en ambiance marine. Les auteurs s'intéressaient à l'effet des inhibiteurs de corrosion et des revêtements époxydiques sur la corrosion des armatures. Quant aux bétons, il étaient formulés à partir de ciment Portland seul ou de ciment au laitier, avec des rapports eau/liant variant entre 0,32 et 0,48. On était loin cependant des BHP au sens où on l'entend en France, puisque la résistance en compression à 28 jours était comprise entre 30 et 42 MPa. Ces valeurs relativement modestes s'expliquent par la présence d'air entraîné, et par le caractère relative-

ment grossier du ciment. Les conclusions des auteurs sont données ci-après :

- les inhibiteurs de corrosion ont globalement un effet positif à cinq ans, mais négatif à dix ans ;
- les revêtements époxydiques donnent également des résultats décevants sur le long terme. Les auteurs signalent cependant qu'une explication pourrait résider dans la mauvaise qualité de l'application de la résine, l'expérience datant des débuts de cette technologie ;
- la réduction du rapport eau/liant est favorable à la prévention de la pénétration des ions chlores ;
- les mesures de potentiel d'armatures décrivent assez bien la corrosion effective des armatures.

En Suède, la nécessité de disposer de données expérimentales mesurées *in situ* pour la prévision de la durée de vie des ouvrages, en particulier pour les grands projets de la Great Belt Link et de l'Öresund Link, a conduit à la mise en place d'un site expérimental en environnement marin sur la côte ouest du pays à la fin de 1991 [6 - 8]. 50 bétons, incluant des BHP, avec trois ciments différents et dont le rapport eau/liant variait de 0,25 à 0,75, ont été étudiés sur ce site. Les corps d'épreuve se présentaient sous la forme de cubes de béton ou sous la forme de blocs en béton armé. Les premiers, exposés aux embruns, étaient destinés à l'étude de la résistance au gel et à l'écaillage. Pour les seconds, partiellement immersés, une large panoplie d'investigations a été entreprise, incluant la pénétration des ions chlorures et les transferts d'humidité dans le béton, ainsi que la détection de la corrosion des armatures. Ces mesures étaient complétées par des essais accélérés en laboratoire. L'ensemble des résultats a mis en évidence l'importance des propriétés hydriques des matériaux sur les processus de transfert et en particulier sur la pénétration des chlorures, mais en même temps la difficulté de prévoir ces propriétés *in situ*. Au bout de trois ans, aucune détérioration due au gel n'a été enregistrée sur le site, excepté pour les bétons ayant un rapport eau/liant de 0,75. L'une des conclusions intéressantes de cette étude, vis-à-vis de la résistance au gel, a été qu'il était possible de produire des bétons sans air entraîné résistant à l'écaillage en environnement marin, à condition que le rapport eau/liant soit suffisamment faible. Cependant, il a également été montré qu'en ce qui concernait le gel, l'environnement marin était beaucoup moins agressif que l'exposition aux sels de dé verglaçage, en bordure de route par exemple. Pour compléter notre revue de la littérature étrangère, intéressons-nous pour finir au site de vieillissement de Treat Island aux USA (dans une zone de marnage). Les premiers essais entrepris dans ce site datent de 1935 [3]. À l'époque, il s'agissait d'évaluer l'impact des entraîneurs d'air pour la protection vis-à-vis du gel. En 1950, l'US Corps of Engineers entreposa 82 poutres de béton

armé, soumises à des charges permanentes, afin de juger de la pérennité de leur capacité portante. En 1961, on y ajouta 20 poutres en béton précontraint, dans le but d'évaluer l'efficacité de diverses protections d'ancrage. Enfin, plus récemment, le CANMET (Canadian Center for Energy and Mineral Technology) lança un nouveau programme d'essais. 250 prismes de béton de dimensions $305 \times 305 \times 915$ mm furent placés sur le site, entre les années 1978 et 1994. L'objectif principal était d'évaluer l'influence des additions minérales et de la formulation du béton sur sa durabilité. Les conclusions à la date de la publication en référence [9], soit après 17 années d'exposition, étaient les suivantes :

- l'air entraîné est indispensable pour la bonne tenue du béton dans cet environnement (qui induit environ une centaine de cycles gel-dégel dans l'année) ;
- le pourcentage en fumée de silice doit être limité à 10 % ;
- les bétons de granulats normaux ou légers contenant des cendres volantes ou des fumées de silice ou encore du laitier se comportent bien, sous réserve que le rapport eau/liant soit inférieur à 0,5 et que la teneur en ciment Portland reste supérieure à une valeur minimale ;
- le comportement des ciments de type I, II ou V selon l'ASTM ne diffèrent pas significativement.

Dans l'ensemble, les expériences relatées confirment qualitativement les résultats des essais accélérés de laboratoire, en termes notamment d'influence des paramètres de composition sur la durabilité. Cependant, les BHP, d'apparition relativement récente, ne sont pas couverts dans ces campagnes de mesure, à l'exception des essais suédois. D'autre part, il n'y a pas eu à notre connaissance de tentative d'établir des seuils de propriétés initiales (mesurées en laboratoire) pouvant assurer le bon comportement du béton armé dans les différents environnements.

But de la recherche

Dans le cadre du projet national BHP 2000, il a été décidé de créer divers sites de vieillissement naturel, où des corps d'épreuve en béton armé seraient placés et observés pendant une durée longue (plusieurs décennies). Une gamme complète de bétons de structure a été formulée avec les mêmes constituants, et a fait l'objet d'une campagne d'essais de caractérisation en laboratoire. Le premier article de cette série présente les formulations testées, et leurs propriétés mécaniques. On traitera ensuite de la caractérisation microstructurale et des propriétés de durabilité des matériaux mesurées sur éprouvettes en laboratoire. Enfin, un article sera consacré aux sites eux-mêmes, ainsi qu'aux corps d'épreuve (géométrie et caractérisation initiale). Le but principal de cette recherche est de rapprocher les indica-

tions des essais de durabilité conventionnels du comportement réel du matériau dans l'ouvrage, afin de pouvoir déterminer des seuils d'acceptation. Au passage, on pourra tenter de valider certains modèles de dégradation, au travers du suivi du comportement dans le temps. Les résultats acquis ultérieurement, lors des inspections périodiques des sites, seront également publiés dans cette revue, afin d'en garder une traçabilité, point particulièrement critique lorsqu'il s'agit de projets de recherche s'étalant sur plusieurs décennies.

Au total, 15 formules de béton ont été mises au point et caractérisées. Elles ont également servi de référence à d'autres programmes du projet national BHP 2000, comme ceux ayant trait aux thèmes « Bétons à Très Hautes Performances », « Résistance au feu » et « Armatures HP ». Pour les études à caractère mécanique, deux formules ont été ajoutées, dans le but de fournir des bétons de résistance en compression comparables, formulées avec un granulat différent. Un objectif secondaire de l'opération était également d'acquérir des données sur le comportement mécanique à long terme des BHP (notamment sous l'angle de la résistance en traction, aspect peu documenté dans la littérature), lorsque les échantillons sont soumis à divers types de cure. Enfin, on désirait au passage vérifier la pertinence des modèles permettant de déduire différentes caractéristiques mécaniques à partir de la résistance en compression, du type de ceux adoptés récemment dans le nouveau BAEL/BPEL étendu aux BHP B 80 [10], suite aux travaux du groupe AFREM « Connaissance et utilisation des BHP ».

Formulations

On a cherché à couvrir la gamme actuelle des bétons de structure : résistance moyenne à 28 jours de 25 à 120 MPa, présence ou non d'additions minérales pouzzolaniques (cendre volante ou fumée de silice selon le cas), présence ou non d'entraîneur d'air (pour les bétons de résistance spécifiée inférieure à 100 MPa). La plupart des bétons ont été confectiionnés avec un squelette essentiellement calcaire, avec cependant un ajout de sable de rivière permettant d'accroître la maniabilité. Seuls les bétons dits B 100 FS et B 120 FS ont été formulés à partir d'un gravillon de basalte et d'un sable entièrement siliceux, afin de pouvoir juger de l'effet éventuel du granulat sur la résistance du béton aux contraintes tangentes. Enfin, pour faire le lien avec la récente norme NFP 18 305, un béton courant (formule M 30 CV) rentrant dans les spécifications de cette norme (environnement 2a, béton armé, coefficient k de la cendre volante pris égal à 0,6) a été ajouté à la liste. Au total, on a donc mis au point neuf bétons courants et huit BHP.

L'origine des matériaux est donnée dans le tableau I (la composition chimique du ciment apparaissant dans le tableau IIa et b).

TABLEAU I
Constituants des bétons formulés

Catégorie	Dénomination	
Granulats	Calcaire concassé du Boulonnais 12,5/20	<p>* La fabrication de ce ciment a été arrêtée peu après les essais de mise au point des bétons. Il a été remplacé par le CPA CEM I 52,5 PM ES CP, utilisé pour les essais de durabilité et pour la fabrication des corps d'épreuve. On s'est assuré que le nouveau produit donnait des résultats similaires à l'ancien en termes rhéologiques, comme en termes mécaniques. Ainsi, le béton M 120 FS (formule C9) formulé avec le ciment ES a donné une résistance en compression à 28 jours de 126,3 MPa (au lieu de 125,5 MPa avec le ciment non ES).</p>
	Calcaire concassé du Boulonnais 5/12,5	
	Calcaire concassé du Boulonnais 0/5	
	Sable de Seine 0/4	
	Basalte concassé de Raon l'Étape 6/10	
Ciment	CPA CEM I 52,5 PM CP de St Vigor*	
Cendre volante	Silico alumineuse (Origine EDF)	
Fumée de silice	Fumée densifiée de l'usine d'Anglefort Qualité DM	
Superplastifiant	de type Mélamine (Résine GT Chryso)	
Retardateur	Chrytard (Chryso)	
Entraîneur d'air	Chryso air	
Eau	Eau potable du réseau	

TABLEAU II
Composition chimique et minéralogique du ciment CPA-CEM I 52,5 PM ES CP2 de Saint-Vigor
(usine Lafarge du Havre) et des additions minérales
a. Composition chimique

Constituant	Ciment CPA	Cendres volantes	Fumée de silice
	(%)		
Silice soluble	SiO ₂	21,39	55,86
Oxyde d'aluminium	Al ₂ O ₃	3,49	25,40
Oxyde de titane	TiO ₂	0,18	0,84
Oxyde ferrique	Fe ₂ O ₃	4,16	6,05
Oxyde de calcium	CaO	65,12	1,83
Oxyde de magnésium	MgO	0,82	0,63
Oxyde de sodium	Na ₂ O	0,12	0,24
Oxyde de potassium	K ₂ O	0,30	4,77
Anhydride sulfurique	SO ₃	2,86	0,11
Chlore des chlorures	Cl	Néant	Néant
Soufre des sulfures	S	Néant	Néant
Résidu insoluble	Ins.	0,31	Néant
Perte au feu à 1 000 °C	PAF	1,10	2,64
Oxyde de manganèse	MnO	0,09	0,04
Total des éléments dosés		99,94	98,41
Chaux libre	CaO ₁	0,71	n.d.
Dioxyde de carbone	CO ₂	0,88	n.d.

b. Composition minéralogique potentielle
du ciment d'après la formule de Bogue

Constituant	Teneur (%)
Carbonate	2,00
CaO libre	0,71
Gypse	6,15
C ₃ S	57,63
C ₂ S	17,84
C ₃ A	2,22
C ₄ AF	12,64
Total	99,19

Les bétons ont été formulés selon les principes suivants :

➤ squelette granulaire proportionné de façon à minimiser la viscosité relative au sens du modèle de suspension solide [11], le matériau étant placé dans un cylindre de diamètre 125 mm. Cette approche devait produire des matériaux suffisamment riches en sable pour permettre le remplissage aisément de coffrages minces et ferraillés, tels que ceux utilisés dans certains essais de structure du programme « BTHP » ;

➤ pour les BHP, fluidifiant dosé à saturation devant donner une rhéologie assez stable dans le temps [12] ;

➤ rapport eau/liant ajusté pour donner la résistance spécifiée à 28 jours ; pour les bétons aux cendres volantes, on a limité la teneur en cendres à 25 % du poids de ciment (valeur usuelle), à l'exception du béton M 30 CV, qui en contenait

43 %. Pour les BHP, la teneur en fumée de silice a été modulée en fonction du niveau de résistance recherché : 6 % pour le M 75 FS, 10 % pour les M 100 FS et B 100, et 12 % pour les M 120 FS et B 120 FS ;

➤ teneur en air visée de 5-7 % pour les bétons à air entraîné ;

➤ la quantité de pâte a été ajustée pour fournir la rhéologie recherchée. Pour les bétons ordinaires, on a visé des affaissements au cône voisins de 10 cm. Dans le cas des BHP, la propriété critique est souvent la viscosité plastique, que l'on a cherché à limiter à des valeurs plus faibles que 300 Pa.s (valeur mesurée au rhéomètre BTRHEOM, selon le mode opératoire précisé dans la référence [13]).

Les compositions des bétons sont données dans le tableau III.

TABLEAU III
Formulations des bétons

Bétons	Dénomination	Eau d'ajout l/m ³	SP kg/m ³	Ret. kg/m ³	Ent. d'air kg/m ³	FS kg/m ³	CV kg/m ³	Cim. kg/m ³	Sable Seine kg/m ³	Boul. 0/5 kg/m ³	Boul. 5/12,5 kg/m ³	Boul. 12,5/20 kg/m ³	Raon 6/10 kg/m ³	% air	Affaissement au cône cm
1	M 25	193	0	0	0	0	0	230	446	453	388	619	0	0,8	10,5
2	M 25 CV	187	0	0	0	0	48	195	449	456	369	623	0	0,5	17,5
3	M 30 CV	166	1,1	1,4	0	0	95	223	436	443	421	565	0	0,9	9,5
4	M 50	197	0	0	0	0	0	410	400	406	428	509	0	1	14
5	M 50 CV	181	0	0	0	0	79	325	401	408	453	503	0	1	9
6	M 75	146	12,4	3,3	0	0	0	461	401	407	475	550	0	0,5	25
7	M 75 FS	136	12	2,5	0	22	0	360	435	442	465	579	0	0,5	25
8	M 100 FS	124	12,5	2,6	0	38	0	377	432	439	488	561	0	0,7	24
9	M 120 FS	124	15,6	3,3	0	57	0	470	407	413	437	554	0	0,9	24,5
10	M 25 EA	160	0	0	0,31	0	0	230	427	433	454	574	0	7,2	11
11	M 25 CV EA	159	0	0	0,54	0	49	189	405	411	454	586	0	7,3	10,5
12	M 50 EA	188	0	0	1,32	0	0	483	364	368	390	477	0	7,1	12
13	M 50 CV EA	192	0	0	1,44	0	107	428	317	322	422	452	0	5,2	8,5
14	M 75 EA	151	14,8	3,9	0,98	0	0	557	332	338	443	489	0	6,5	26,5
15	M 75 FS EA	132	12,9	2,7	0,58	23	0	387	408	414	437	550	0	5,3	25
16	B 100 FS	127	13,7	2,9	0	41	0	412	861	0	0	0	1 037	0,9	24,5
17	B 120 FS	122	15,5	3,2	0	55	0	461	837	0	0	0	1 010	1	23

SP : superplastifiant - FS : fumée de silice - CV : cendre volante - M : résistance moyenne visée (granulats calcaires) - EA : entraîneur d'air - B : béton de basalte.

Caractérisation mécanique initiale

Propriétés rhéologiques à l'état frais

Les seuils de cisaillement et les viscosités plastiques ont été mesurées pendant une heure pour chaque gâchée réalisée, au rhéomètre BTRHEOM [13]. Les valeurs de seuils ont été affectées par des changements de rhéomètre et de types de joints, et ne peuvent donc être comparées entre elles. Cependant, à la vue de l'évolution des seuils enregistrés, on peut dire qu'aucun béton n'a présenté de perte de maniabi-

lité appréciable pendant la durée de l'essai.

Le tableau IV donne la moyenne de la viscosité plastique des bétons testés, mesurée selon le mode opératoire décrit dans la référence [13], pendant la première heure.

Mis à part le béton n° 16 (B 100 FS), tous les mélanges ont gardé une viscosité faible à modérée. Dans l'ensemble des bétons de calcaire, il apparaît que la viscosité est assez bien corrélée avec la teneur en eau totale (fig. 1). Cependant, certains bétons sous-dosés en fines (n° 1) ont une viscosité notable, malgré un fort dosage en eau.

TABLEAU IV
Viscosité plastique moyenne des bétons

Bétons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
μ (Pa.s)	144	48	158	32	98	155	173	202	192	75	152	44	91	152	143	319	179

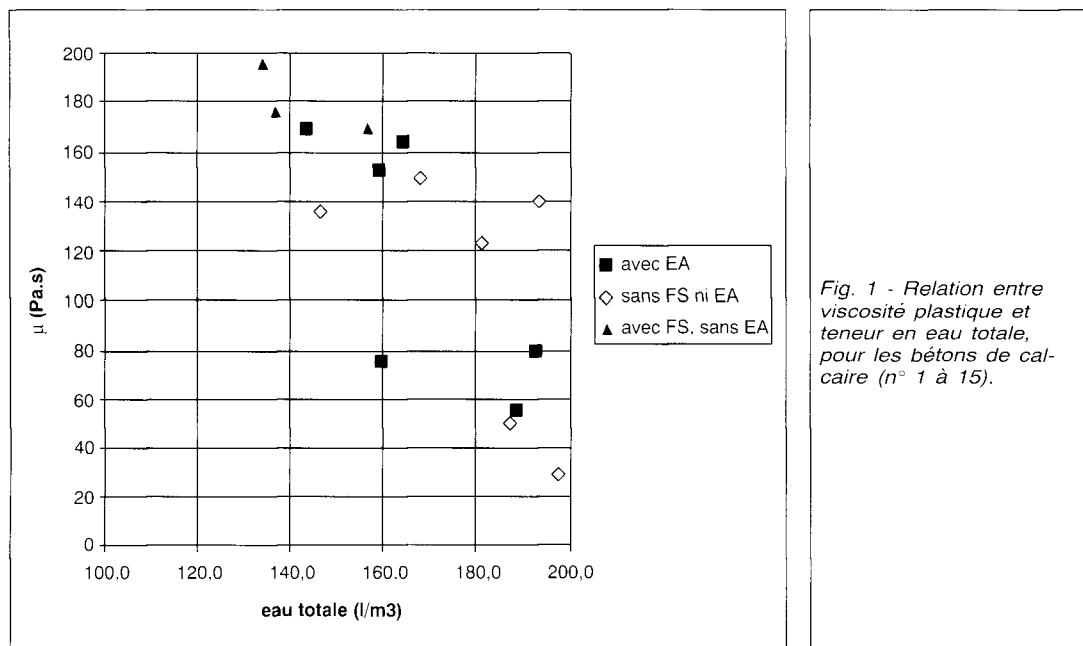


Fig. 1 - Relation entre viscosité plastique et teneur en eau totale, pour les bétons de calcaire (n° 1 à 15).

Résistance en compression (cure à l'eau)

Toutes les mesures concernant les propriétés mécaniques à l'état durci sont données dans le tableau V.

Les résistances à 28 jours (cure à l'eau) excèdent généralement les résistances recherchées, sauf pour les M 25. Ceci a pour effet d'accroître encore l'intervalle d'études, qui va donc de 23,6 à 128,1 MPa. Les courbes de durcissement apparaissent dans la figure 2. Elles sont toutes monotones croissantes jusqu'à 90 jours.

Le durcissement des bétons de 25 et 50 MPa s'effectue à vitesse presque constante dans un diagramme semi-logarithmique. Le M 25 EA, dont la teneur en liant est la même que celle du M 25, présente des caractéristiques supérieures à tout âge, ce qui montre l'effet bénéfique de l'air (probablement un effet stabilisant et anti-ressuage) dans les bétons sous-dosés en ciment. Les bétons aux cendres ont des résistances au jeune âge un

peu inférieures aux témoins, mais rattrapent en général leur retard.

Toujours dans le diagramme semi-logarithmique, les BHP présentent des courbes de durcissement concaves. À ceci, deux raisons principales. D'une part, l'effet du retardateur et du fort dosage de superplastifiant, qui se traduisent par de faibles résistances au très jeune âge (à 18 et 24 heures). Cet effet est amplifié par le durcissement assez lent du ciment de Saint Vigor. D'autre part, lorsqu'on atteint de fortes résistances, le granulat peut exercer un effet limiteur sur les résistances [14], qui tend aussi à infléchir la courbe vers l'axe des x. À même résistance finale, la fumée de silice donne des résistances plus modérées aux âges intermédiaires, conséquence classique de la relative lenteur de la réaction pouzzolanique. Précisons que toutes les résistances en compression des BHP à partir de trois jours ont été obtenues sur éprouvettes rectifiées au lapidaire.

TABLEAU V
Résultats des essais mécaniques jusqu'à l'âge de 90 jours, sur cylindres 16 × 32 cm

		fc cure à l'eau						fc cure scellée		ft eau	ft cure scellée			ft traité	E128 alu	ε_1	k	k'
		Age (j)	0,75	1	3	7	28	90	28	90	7	28	90	56	28	28	28	
1	M 25	3,8	5,2	11,1	13,1	23,6	28,9	23,9	26,2	2,65	1,65	2,54	2,89	2,14	32,0	0,0021	2,75	2,79
2	M 25 CV	2,8	4,0	9,2	13,2	23,8	33,0	21,1	30,8	2,52	1,67	2,59	2,60	2,33	31,2	0,0019	2,79	2,22
3	M 30 CV	0,4	4,6	21,9	31,3	49,4	65,7	44,2	58,4	3,20	2,88	3,14	4,36	4,36	37,8	0,0019	1,65	0,08
4	M 50	17,0	20,0	28,9	38,0	54,5	65,1	49,8	51,7	3,57	3,61	3,88	3,70	3,59	39,0	0,0022	1,74	0,392
5	M 50 CV	13,1	16,6	28,8	38,8	55,4	71,0	49,7	58,2	4,25	3,57	3,95	4,08	4,70	38,2	0,0019	1,47	0,0138
6	M 75	0,2	2,9	54,3	68,8	83,1	91,9	80,7	86,1	5,44	4,63	4,62	4,80	4,22	49,6	0,0023	1,42	0,0591
7	M 75 FS	0,0	0,5	42,9	58,2	81,4	91,0	79,2	89,9	4,81	3,80	4,62	3,81	4,18	49,9	0,0023	1,43	0,0477
8	M 100 FS	0,1	6,3	68,7	86,7	116,1	128,7	112,0	124,7	6,21	4,44	4,60	5,59	4,38	51,8	0,0027	1,26	~ 0,112
9	M 120 FS	0,3	28,1	89,5	101,0	125,5	139,2	126,3	136,0	6,41	5,69	6,09	4,89	4,93	50,6	0,0029	1,17	~ 0,107
10	M 25 EA	4,8	7,0	13,0	19,5	28,8	33,7	26,2	30,2	2,84	1,95	2,67	2,87	2,44	32,6	0,0014	1,75	0,309
11	M 25 CV EA	2,9	4,2	9,6	14,4	23,9	32,7	21,8	28,6	2,30	1,58	2,24	2,70	2,21	29,7	0,0013	1,77	0,358
12	M 50 EA	20,8	23,3	31,1	35,4	46,9	54	44,9	48,9	3,78	3,41	3,54	4,00	3,61	34,3	0,0019	1,46	~ 0,032
13	M 50 CV EA	17,1	19,8	27,2	33,6	45,8	57,3	46,4	52,0	3,58	2,96	3,18	3,91	3,71	34,1	0,002	1,46	~ 0,054
14	M 75 EA	0,0	0,4	52,0	61,1	79,4	86,3	72,0	81,0	5,08	4,91	4,39	4,83	4,40	41,7	0,0024	1,39	~ 0,069
15	M 75 FS EA	0,0	1,1	39,7	51,7	71,7	80,1	70,4	79,6	4,70	4,52	4,40	3,89	4,06	45,6	0,002	1,26	~ 0,01
16	B 100	0,2	16,5	67,6	89,0	119,0	131,9	116,8	129,0	6,91	5,28	6,72	5,73	5,26	55,2	0,0027	1,28	~ 0,041
17	B 120	0,8	31,7	78,0	99,6	128,1	141,0	126,2	138,4	7,46	6,23	6,90	5,54	5,44	56,3	0,0028	1,24	~ 0,049

fc : résistance en compression - ft : résistance en traction par fendage - Résistances en MPa, modules en GPa - Cure à l'eau : à partir de 48 heures, à 20 ± 1 °C - Cure étanche : sous double feuille d'aluminium autocollant (sauf pour les résistances en compression, module et loi de comportement à 28 jours : simple feuille + polyéthylène), à température ambiante (18-22 °C).

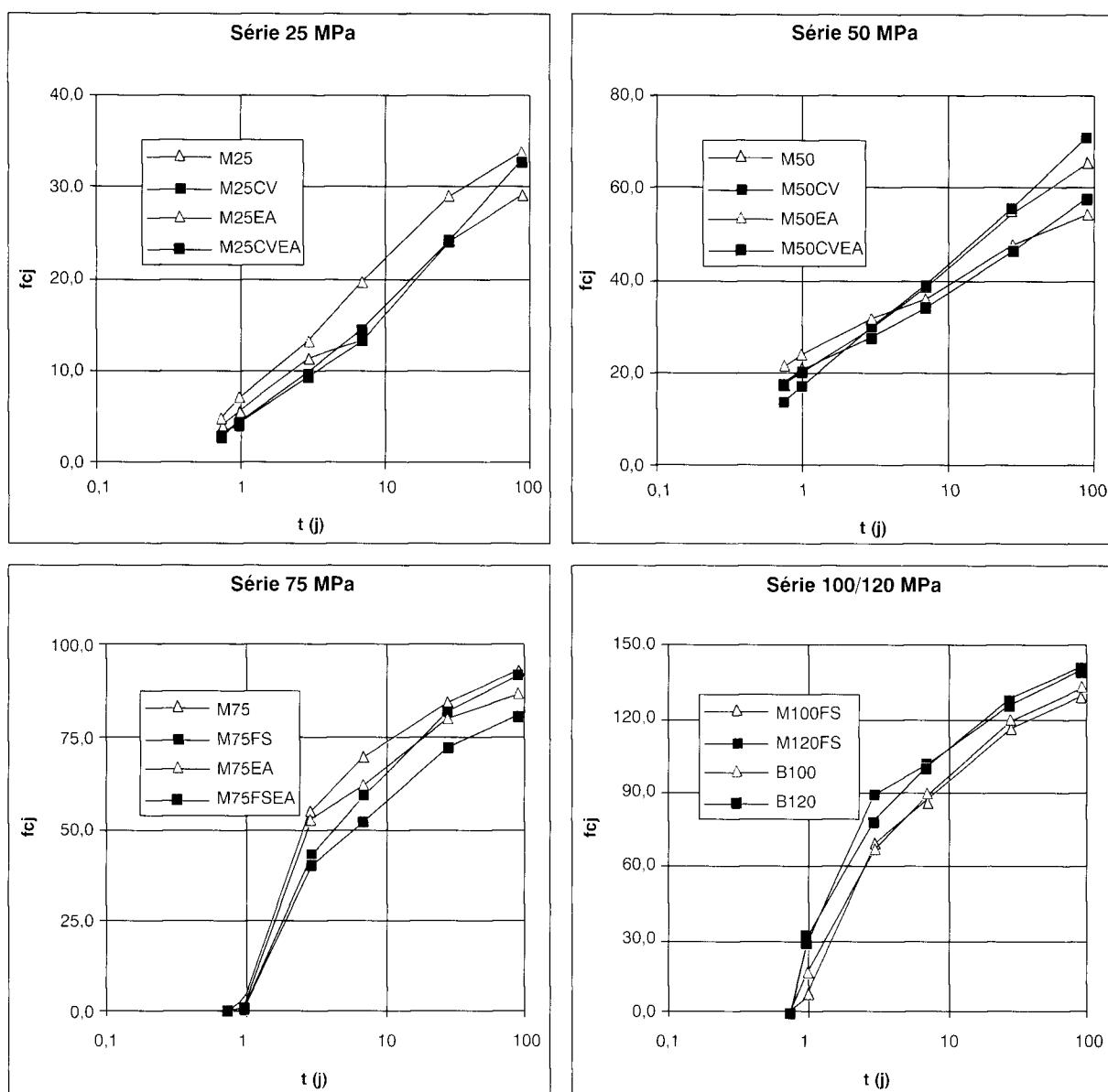


Fig. 2 - Courbes de durcissement des bétons conservés sous eau

Résistance en compression (cure étanche)

Les essais à 28 et 90 jours ont été doublés par des essais sur éprouvettes protégées de la dessiccation. On voulait en effet vérifier que la cure à l'eau n'augmentait pas trop la résistance du béton, de manière artificielle puisque dans la majorité des cas le béton n'est pas au contact de l'eau dans les structures.

Dans le cas présent, l'effet de la cure à 28 jours apparaît comme limité (2,6 MPa en moyenne). Lorsqu'on calcule le rapport entre la résistance à 90 jours sous cure étanche et la résistance conventionnelle à 28 jours (cure à l'eau), on trouve la valeur moyenne la plus forte pour les bétons aux cendres, puis pour les bétons à la fumée de silice, puis enfin pour les bétons de ciment Portland seul (fig. 3). Si on admet que la cure étanche est plus représentative

du béton en place que la cure à l'eau, on voit que la mesure conventionnelle de résistance en compression place davantage en sécurité avec les « nouveaux bétons » (aux additions minérales), par comparaison avec les anciens. Ces résultats ne confirment pas ceux d'une étude canadienne récente [15], selon laquelle le rapport résistance en place (sur carottes)/résistance conventionnelle à 28 jours était plus faible pour les bétons contenant des additions. Il est vrai cependant qu'on ne peut assimiler une résistance en place mesurée sur carotte, affectée par les méthodes de mise en œuvre du béton, par l'élévation de température en cours de prise ou encore par les dommages éventuels liés au prélèvement de la carotte, à la valeur obtenue sur un cylindre de laboratoire, même conservé sans échanges hygrométrique.

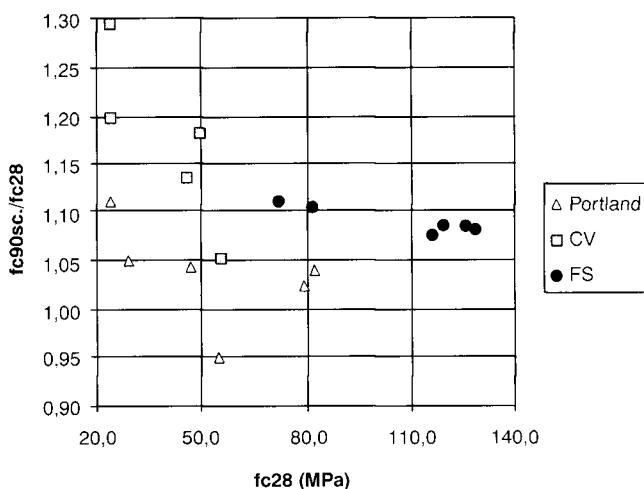


Fig. 3 - Rapport résistance à 90 jours (cure étanche) /résistance à 28 jours (cure à l'eau).

CV : cendre volante - FS : fumée de silice.

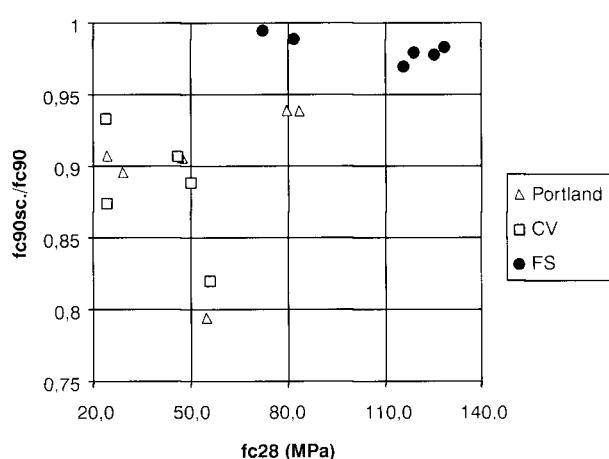


Fig. 4 - Rapport résistance à 90 jours (cure étanche)/ résistance à 90 jours (cure à l'eau).

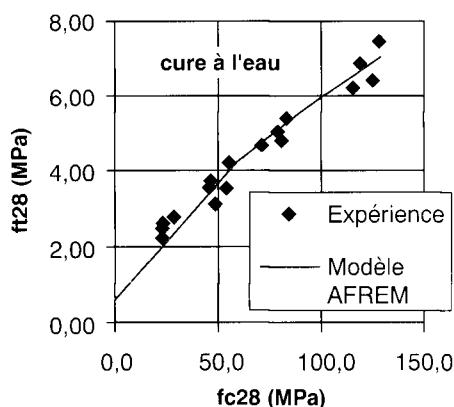


Fig. 5 - Relation entre résistance au fendage à 28 jours et résistance en compression au même âge (conservation eau).

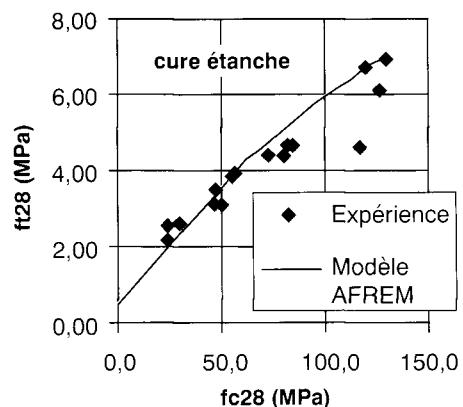


Fig. 6 - Relation entre résistance au fendage à 28 jours (cure étanche) et résistance en compression au même âge (conservation eau).

$$e/c = 0,26 - 10\% FS$$

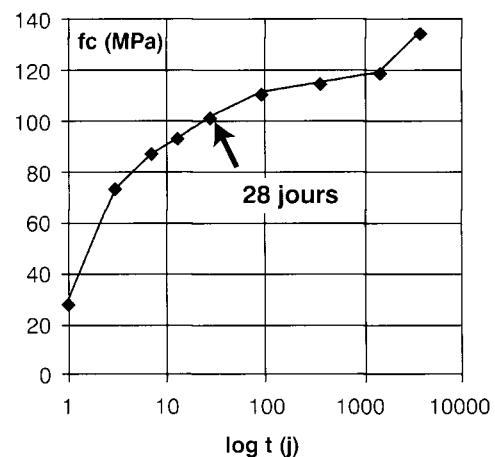


Fig. 7 - Durcissement d'un BTHP pendant 10 ans (conservation eau).

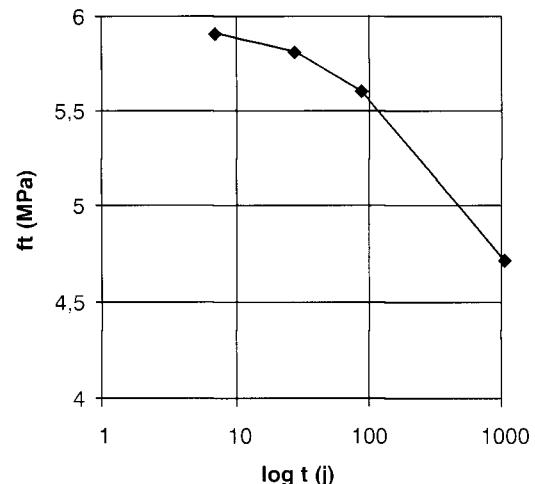


Fig. 8 - Évolution de la résistance en traction par fendage d'un BTHP (cure étanche) [18].

On peut également se poser la question de savoir si le fait de mesurer des résistances après 28 jours sur des cylindres conservés en eau renseigne sur le béton de la structure. D'après la figure 4, la résistance obtenue par cure à l'eau est toujours supérieure à la résistance vraie, mais la différence est plus sensible pour les bétons ordinaires que pour les BHP, particulièrement ceux qui contiennent de la fumée de silice.

Il semblerait donc que, pour les BHP aux fumées de silice, les augmentations de résistance en compression à long terme, constatées sur des éprouvettes en conservation humide, soient assez représentatives du béton en place. On a obtenu en 1996 la résistance à dix ans d'un BTHP étudié en détail dans le passé [16]. Sur ce béton particulier, il y avait à 28 jours une réserve de résistance de plus de 30 %.

Concernant le présent programme, des essais aux échéances de trois et dix ans sont prévus, afin de suivre le comportement à long terme de tous ces bétons, en l'absence d'échanges hydriques avec le milieu ambiant [17].

Résistance en traction par fendage (cure à l'eau)

Celle-ci a été mesurée à 28 jours. Les résultats obtenus confirment remarquablement le modèle adopté par le groupe AFREM [10] (fig. 5).

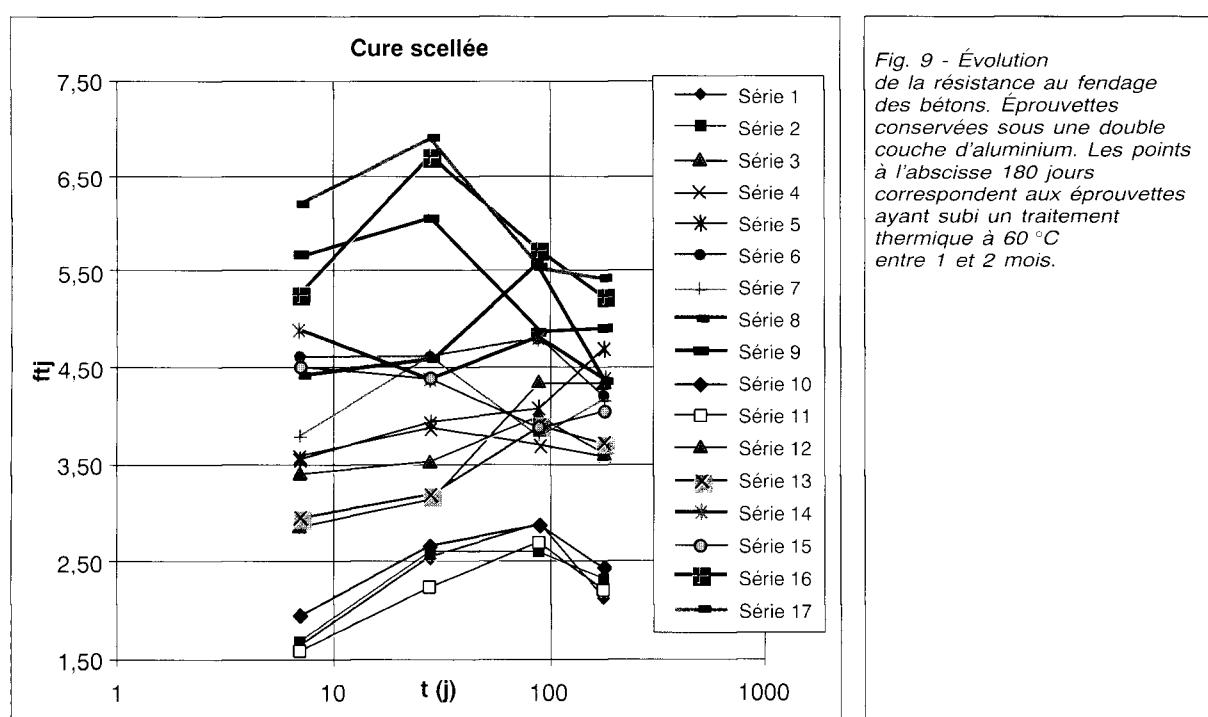
Quant aux BTHP de basalte, on observe une résistance d'environ 10 % supérieure à leurs homologues calcaires. L'écart n'est pas considérable, du fait qu'on est en présence, dans les deux cas, d'excellents granulats.

Résistance en traction par fendage (cure étanche)

Lorsqu'on s'intéresse aux résistances en traction par fendage obtenues sur éprouvettes scellées, les différences (par rapport à la cure à l'eau) sont plus marquées que pour la résistance en compression. Le modèle AFREM ne se place déjà plus en sécurité à 28 jours pour les BHP (fig. 6). Cependant, l'enseignement de ces essais réside surtout dans l'évolution de la résistance en traction après 28 jours. Nous avions déjà constaté, sur le même béton que celui de la figure 7, que la résistance au fendage sur éprouvettes scellées diminuait régulièrement de sept jours à trois ans [18] (fig. 8). Des résultats similaires ont été obtenus à l'étranger [19].

Ici, afin d'acquérir plus rapidement des résultats, on a eu l'idée* d'appliquer un traitement thermique modéré (60°C entre 28 et 56 jours), afin de vieillir artificiellement les éprouvettes. Pour éviter de soumettre les éprouvettes à des chocs thermiques, on les a placées au refroidissement dans des boîtes calorifugées, de façon à ce qu'elles reviennent à l'équilibre thermique en une journée environ. En se basant sur la loi d'Arrhenius avec un coefficient E/R de $5\,000\text{ K}^{-1}$, le traitement thermique d'un mois à 60°C équivaut à environ cinq mois à 20°C . On a donc tracé dans la figure 9 la relation entre la résistance au fendage et le temps, en ajoutant les points des éprouvettes traitées thermiquement à l'abscisse de six mois.

* VERNET C., Communication privée, 1995.



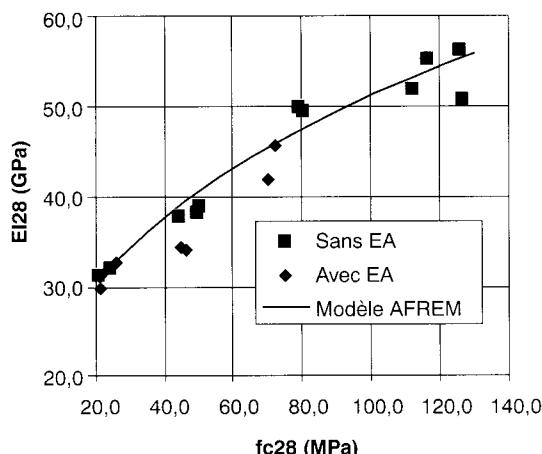


Fig. 10 - Module élastique des bétons en fonction de la résistance en compression à 28 jours. Les deux grandeurs ont été mesurées sur les mêmes éprouvettes, conservées sous une double couche aluminium/polyéthylène.

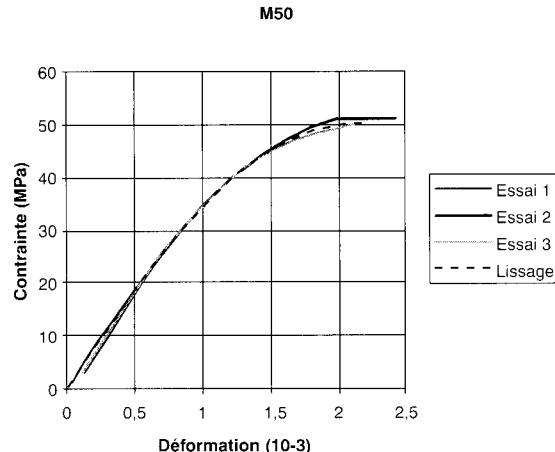


Fig. 11 - Lois de comportement obtenues sur trois éprouvettes du MS 50, et lissage par le modèle de Sargin.

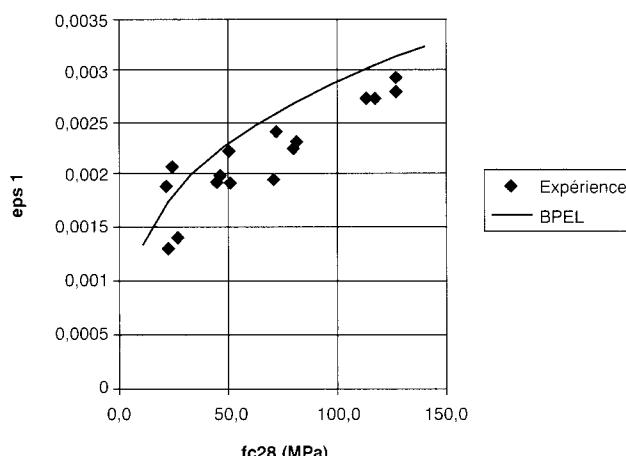


Fig. 12 - Déformation au pic d'effort. Valeurs expérimentales comparées aux prévisions du BPEL.

On constate que la plupart des bétons voient leur résistance en traction atteindre un maximum à 28 ou 90 jours selon les cas, et diminuer ensuite. Le phénomène semble particulièrement marqué pour les BTHP. Quelle que soit l'évolution ultérieure de ces courbes (des essais sur éprouvettes conservées à température ambiante sont prévus à trois et dix ans), il apparaît dès à présent que le modèle AFREM surestime les résistances en traction des BTHP (au delà de 80 MPa).

Modules élastiques

Les modules élastiques ont été mesurés sur les éprouvettes scellées, afin d'être plus représentatifs du béton des corps d'épreuve. Le modèle AFREM (inchangé par rapport à celui du BPEL 91) prédit bien les résultats, même pour les bétons à air entraîné, pour lesquels on aurait pu craindre une surestimation importante du module (fig. 10).

Loi de comportement en compression uniaxiale à 28 jours

Afin de pouvoir alimenter les modèles de calcul, on a mesuré pour chaque béton la relation contrainte-déformation en compression jusqu'au pic d'effort. La mesure a été répétée à l'âge de 28 jours sur trois éprouvettes (soumises préalablement à une cure étanche), et chaque courbe expérimentale a été lissée par le modèle de Sargin, présenté dans la nouvelle annexe 1 du BPEL [10]. La loi de comportement de chaque béton a été ensuite déterminée en calculant la moyenne arithmétique des coefficients du modèle, obtenus pour chacune des trois courbes (fig. 11). Les coefficients obtenus sont donnés dans les trois colonnes de droite du tableau V. À noter cependant que le coefficient k' contrôle principalement la partie post-pic de la courbe, laquelle n'a pas été mesurée.

On a constaté lors de ces opérations que le modèle de Sargin permettait de lisser les courbes expérimentales avec une grande précision, et que l'essai était très répétable.

La déformation au pic d'effort, en fonction de la résistance, suit une loi similaire à celle prévue par le BPEL, avec cependant des valeurs plus faibles, ce qui place en sécurité (voir fig. 12).

Cette surestimation de la déformation au pic entraîne également une surestimation du coefficient k . Quand à k' , il tend vers une valeur nulle dans les essais présents (fig. 13).

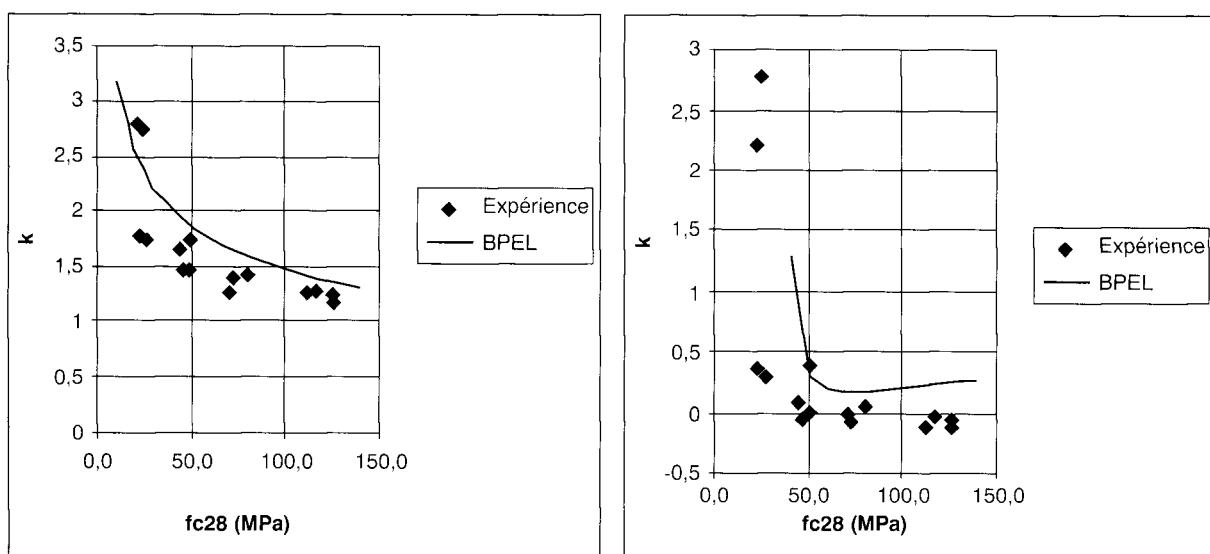


Fig. 13 - Coefficients k et k' de la loi de Sargin, calés sur les essais des bétons étudiés

Conclusion

Cette série d'articles a pour but de présenter un important projet de recherche, visant à mieux connaître le comportement en place du béton armé dans des structures soumises à différents environnements, essentiellement sous l'angle de la durabilité. Cette première livraison a été consacrée à la présentation des résultats des essais mécaniques initiaux.

Dix-sept bétons ont été mis au point, pour des résistances en compression visées s'étalant de 25 à 120 MPa. En plus de la résistance, l'effet de la présence d'additions minérales pouzzolaniques (cendres volantes, fumée de silice) ou d'entraîneur d'air a été étudié. À l'issue de la campagne de caractérisation mécanique initiale, qui a constitué un travail expérimental considérable (pas moins de 731 cylindres 16 × 32 ont été confectionnés), on peut dresser la liste de conclusions suivante :

— les bétons mis au point couvrent une gamme de résistance extrêmement large, depuis le plus modeste des bétons de bâtiment jusqu'à des bétons à très hautes performances (non encore utilisés en France sur chantier à ce niveau de résistance) ; ces bétons présentent de bonnes propriétés rhéologiques à l'état frais (seuils stables, viscosités modérées), et ont pu être utilisés pour fabriquer dans de bonnes conditions divers corps d'épreuve ;

— les résistances en compression et en traction ont été mesurées, ainsi que les modules élastiques et les lois de comportement. Les partenaires du projet national avaient ainsi de quoi alimenter leurs modèles, pour prédire le comportement mécanique des éléments de structures étudiés en laboratoire ;

— en terme de connaissance du matériau, les essais ont permis de confirmer un certain nombre de modèles et de tendances déjà observées. En ce qui concerne l'effet de la cure sur la résistance en compression, on a trouvé des effets moindres par rapport à ceux qu'on attendait. Les résultats obtenus ne conduisent pas à proposer la cure étanche pour des éprouvettes de contrôle (résistance conventionnelle à 28 jours). On sait, en effet, que la résistance obtenue à 28 jours sur éprouvettes normalisées, après cure humide, est pratiquement toujours supérieure à la résistance en place au même âge. Pourtant, cette déviation est moindre dans le cas des BHP que dans celui des bétons ordinaires. La même constatation s'applique d'ailleurs au sujet de la cure thermique [20]. Dans le cadre de ce projet national, des carottages sur ouvrage ont également apporté, récemment, des réponses rassurantes*. Pourtant, ces résultats ne sont pas en accord avec une étude bibliographique récente [15], et demandent encore à être confirmés par d'autres prélèvement *in situ*, ainsi, peut-être, que par des études à caractère plus fondamental ;

— en ce qui concerne les résistances en traction par fendage, les doutes qu'on avait sur leur stabilité dans le temps ont été confirmés : en évitant tout effet lié à des échanges hydriques, il appa-

* ANGOT D., Résultats bruts du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Blois, mai, 1996.

raît que ces résistances atteignent un maximum, et décroissent par la suite. Le phénomène est particulièrement marqué pour les BHP/BTHP aux fumées de silice. Est-ce pour atteindre un plancher ? Les essais relatifs aux échéances de 3 et 10 ans renseigneront, au moins partiellement sur la question. Cette diminution est-elle liée à la microfissuration provoquée par l'autodessiccation [21] ? Quelques observations préliminaires du béton de la figure 8, réalisées par le LMDC (Toulouse), n'ont pas confirmé cette hypothèse.

Il paraît sage, d'ores et déjà, de limiter la résistance en traction de calcul des BTHP à la valeur maximale du règlement actuel (atteinte pour $f_{c28} = 80$ MPa), soit 5,1 MPa.

Les articles suivants renseigneront le lecteur sur les propriétés de durabilité mesurées dans les essais de caractérisation initiale, ainsi que sur l'organisation pratique de l'expérimentation de vieillissement naturel (nature, emplacement et propriétés des corps d'épreuve).

Remerciements

Les auteurs remercient A. Belloc, C. Boulay, D. Kaplan, S. Renvez, T. Sedran, du LCPC, pour leur participation aux essais relatifs dans cet article, ainsi que le projet national BHP 2000 pour avoir soutenu financièrement cette étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte rendu des Journées Techniques AFPC-AFREM « Durabilité des Bétons », 11-12 décembre 1997, Toulouse, France (LMDC, 1998).
- [2] SCHIESSL P. et al. (1997), *New approach to durability design - An example for carbonation induced corrosion*, CEB Bulletin No. 238, 138 pages.
- [3] BREMNER T.W. (1989), *Field and Laboratory Studies of the Durability of Concrete in Seawater*, Proceedings of the First Canadian Symposium on Cement and Concrete, Sainte-Foy, Quebec, August 9-11, 10 pages.
- [4] SASATANI T., TORI K., KAWAMURA M. (1995), *Five-Year Exposure Test on Long-Term Properties of Concretes Containing Fly Ash, Blast-Furnace Slag, and Silica Fume*, 5th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, ACI SP 153-16, June.
- [5] SAKAI K., SASAKI S. (1994), *Ten-Year Exposure Test of Precracked Reinforced Concrete in a Marine Environment*, 3rd International CANMET/ACI Conference on the Durability of Concrete, Nice, ACI SP 145-18, V.M. Malhotra ed.
- [6] SANDBERG P. (1996), *Systematic collection of field data for service life prediction of concrete structures*, in Durability of Concrete in Saline environment (Cementa, Lund), pp. 7-22.
- [7] NILSSON L.O. (1996), *Moisture in marine concrete structures – studies in the BMB-project 1992-1996*, in Durability of Concrete in Saline environment (Cementa, Lund), pp. 23-48.
- [8] PETERSSON P.E. (1996), *Scaling resistance of concrete – Field exposure tests*, in Durability of Concrete in Saline environment (Cementa, Lund), pp. 49-79.
- [9] MALHOTRA V.M., BREMNER T.W. (1996), *Performance of Concrete at Treat Island, U.S.A.: CANMET Investigations*, Proceedings of the Third CANMET/ACI International Conference on Concrete in Marine Environment, St. Andrews by-the-Sea, V.M. Malhotra ed., SP 163-1.
- [10] (1996) Extension du domaine d'application des règlements de calcul BAEL/BPEL aux bétons à 80 MPa, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Numéro spécial XIX, Mai, 162 pages.
- [11] SEDRAN T., de LARRARD F. (1994), RENé-LCPC, Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil, Note technique, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 194, Novembre-Décembre.
- [12] de LARRARD F., BOSC F., CATHERINE C., DEFLORENNE F. (1996), Nouvelle méthode des coulis AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 202, Mars-Avril, pp. 61-70.
- [13] de LARRARD F., HU C., SITZKAR J.C., JOLY M., CLAUX F., SEDRAN T. (1994), *Le nouveau rhéomètre LCPC pour bétons très plastiques à fluides*, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 527, Octobre, pp. 17-47.
- [14] de LARRARD F., BELLOC A. (1999), L'influence du granulat sur la résistance en compression du béton, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 219, Janvier-Février, pp. 41-52.
- [15] BARTLETT F.M., MC GREGOR J.G. (1994), *Assessment of Concrete Strength in Existing Structures*, University of Alberta, Structural Engineering Report No. 198, May.
- [16] de LARRARD F., MALIER Y. (1989), Propriétés constructives des bétons à très hautes perfor-

- mances : de la micro- à la macro-structure, *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, N° 479, décembre.
- [17] TOUTLEMONDE F., LE MAOU F. (1996), Protection des éprouvettes de béton vis-à-vis de la dessiccation - Le point sur quelques techniques de laboratoire, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 203, mai-juin, pp. 105-119.
- [18] de LARRARD F. (1993), *A Survey of Recent Research Performed in the French LPC Network on High-Performance Concrete*, 3rd International Conference on the Utilization of High-Strength Concrete, Lillehammer, Norvège, juin.
- [19] PERSSON B. (1992), *Högpresterande betongs - Hydratation, struktur och hållfasthet*, Thèse, Université de Lund.
- [20] LAPLANTE P., *Comportement mécanique du béton durcissant. Analyse comparée du béton ordinaire et à très hautes performances*, Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Mars, Publiée en Études et recherches des LPC, OA 13, décembre.
- [21] YSSORCHE-CUBAYNES M.P., OLLIVIER J.P. (1999), La microfissuration d'autodessiccation et la durabilité des BHP et BTHP, *Matériaux et constructions*, vol. 32, pp. 14-21, janvier-février.

ABSTRACT

The ageing of concrete in natural environments: an experiment for the 21st century I - General considerations and initial mechanical properties of concrete

F. de LARRARD, V. BAROGHEL-BOUNY

In 1996, in collaboration with the National BHP 2000 project, the network of Laboratoires des Ponts et Chaussées set up natural ageing sites for specimens of reinforced concrete in order to monitor long term developments. The aim was to provide information for the purpose of specifying the materials to be used in structures on the basis of laboratory performance tests. This first paper contains the experimental data concerning 17 types of concrete which were developed and characterized not only for the purposes of this study but also to meet the needs of the other partners in the national project. The targeted compressive strengths ranged between 25 and 200 MPa. For each level of strength the influence of the mineral additive and entrained air parameters was investigated. Two types of very high performance concrete were used, one of them using siliceous instead of calcareous aggregate. In addition to giving the mix designs the paper provides the results of rheological and mechanical tests conducted between 18 and 90 days. Particular attention was paid to the effects of curing (wet or sealed) on the development of compressive and splitting tensile strength. Finally, systematic measurements were made of the unconfined compressive behaviour.

The principal result of this part of the study is to provide an « identity card » for the different types of concrete. However, in the process there have been some new findings (in particular concerning the effects of curing), and the non-monotonic nature of the development of splitting tensile strength over time has been confirmed for all the types of concrete (increase, peak and reduction). To investigate more thoroughly this phenomenon, which seems more pronounced for high performance concrete containing silica fume, tests have been planned at intervals of up to 10 years.

Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXIe siècle I - Généralités et caractéristiques mécaniques initiales des bétons