

Chapitre ACI de Paris
Journées d'étude « *Durabilité des ouvrages en béton* »

Enseignements tirés des recherches sur les BFUP

Christian VERNET
LAFARGE - Laboratoire Central de Recherche.

Synthèse de la présentation du 20.09.2002



Passerelle de la Paix à Séoul

Architecte : Rudy Ricciotti
Photo : Philippe Ruault

1 - Le rôle de FREYSSINET réalisé...et surpassé :

Les BFUP dépassent le niveau de performances rêvé par FREYSSINET pour mieux exploiter l'idée de précontrainte...

Mais par delà les performances mécaniques, ils marquent une considérable avancée dans le domaine de la durabilité des ouvrages.

2 – Les pré-requis de la durabilité des ouvrages.

La durabilité, c'est d'abord la préservation de l'intégralité des performances mécaniques prévues au cahier des charges. Ainsi un processus rigoureux de qualification des BFUP accompagne le matériau à chacune des étapes, de la conception à la réalisation, jusqu'au comportement à long terme des ouvrages. A cet effet ont été développés :

- Des règles de dimensionnement des structures exploitant les performances en traction des BFUP.
- Des outils de formulation et de contrôle de qualité des fabrications.
- Des technologies adaptées et une liste de "bonnes pratiques" pour la fabrication et la mise en œuvre. En effet, ce n'est qu'à cette condition que la durabilité du matériau, validée par les essais de laboratoire, trouve sa traduction dans l'ouvrage.

3 – Des références scientifiques solides.

La pérennité au sens mécanique de la structure étant garantie, il faut aussi prévoir l'évolution du matériau avec le temps, à plus long terme, en fonction de ses interactions avec l'environnement. A ce titre, une nouvelle approche "performantielle" de la durabilité du matériau, dans le sens de l'évaluation de la durée de service des ouvrages, a été initiée depuis une dizaine d'années dans le cadre du développement des BHP et BTHP. Cette approche a été poursuivie dans le domaine des BFUP, et nous fournit de nouveaux outils à la fois pratiques et opérationnels pour faciliter la rédaction des *cahiers des charges*, en y incluant des spécifications en termes de durabilité.

- **Quatre indicateurs de durabilité** (porosité accessible à l'eau, perméabilité à l'oxygène, coefficient de diffusion des ions *chlorure*, teneur en portlandite) et des ordres de grandeur permettant de comparer et classer les performances des matériaux, ([Tableau 1](#))
- Un *panel* très complet de **résultats d'essais accélérés** classiques (carbonatation, gel-dégel, résistances aux sulfates et à diverses solutions agressives, résistance à la corrosion, essais à haute pression et haute température, etc...) ([Tableau 2](#))
- Des résultats de recherche montrant clairement **l'absence de processus endogènes de dégradation** (DEF, thaumasite, Alkali-réaction, gonflements du clinker anhydre résiduel...) y compris dans des BFUP intentionnellement pré-fissurés mécaniquement. ([Tableau 3](#))
- Des modèles simplifiés de la **résistance à la lixiviation** dans différents milieux agressifs, obtenus plus récemment, donnant des ordres de grandeur des durées de service dans des conditions extrêmes, fréquentes dans certaines applications nucléaires. ([Tableau 4](#))

	Béton ordinaire	BHP	BTHP	BFUP
Porosité accessible à l'eau (%)	12-16	9-12	6-9	1.5-6
Perméabilité à l'oxygène (m ²)	10 ⁻¹⁵ – 10 ⁻¹⁶	10 ⁻¹⁷	10 ⁻¹⁸	<10 ⁻¹⁹
Coefficient de diffusion tritium ^(*) (m ² /s)	2.10 ⁻¹¹	2.10 ⁻¹²	10 ⁻¹³	2.10 ⁻¹⁴
Teneur en portlandite (kg/m ³)	76	86	66	0

(*) les ions minéraux ont une mobilité plus faible que le tritium, ils ont donc un coefficient de diffusion inférieur.

Tableau 1 – Les quatre Indicateurs de durabilité des bétons et les ordres de grandeur obtenus pour différentes catégories de bétons.

Source : *Bétons fibrés à ultra-hautes performances*. Recommandations provisoires Janvier 2002 SETRA - AFGC Documents Scientifiques et Techniques.

	Béton ordinaire	BHP	BTHP	BFUP
Profondeur de carbonatation (mm) après 1 mois de carbonatation accélérée	10	2	< 1	< 0.1
Gel-Dégel ASTM C 666 Module d'Young résiduel à 300 cycles (% du témoin) sans entraîneur d'air avec entraîneur d'air	10 % 50 %	15 % 90 %	100 %	100 % 100%
Gel+Sel AFNOR P 18 420 Ecaillage à 60 cycles (g/m ²)	> 1000	< 900	< 100	< 60
Cycles immersion 15°C- séchage 60°C EN 494 50 cycles 100 cycles				$\Delta l/l < 80\mu\text{m/m}$ Pas de variation des performances
Irradiation 10 ⁵ Gray / 120 jours 10 ⁶ Gray / 120 jours				Sans effet Sans effet
Abrasion humide CNR I = V/Vverre	4	2.8		1.3-1.7
Choc CNR volume d'empreinte (2700 chocs)	250-400			60

Tableau 2 - Résultats d'essais accélérés sur différents types de bétons

	Béton ordinaire	BHP	BFUP
Gonflement ettringitique			
Après cure thermique.....	Risque élevé si chauffage au delà de 60°C	Variable selon cure et exposition	Stabilité dimensionnelle $\Delta l/l < 50\mu\text{m/m}$
Après microfissuration contrôlée.....	Aggravation		Stabilité Dimensionnelle Cicatrisation
Alcali-réaction	Variable Selon réactivité des granulats et teneur en alcalins des ciments	Risque faible (diminue avec la teneur en fumées de silice)	Risque nul (pas de granulats réactifs)
Thaumasite	Risque au dessous de 10°C	Risque faible	Risque nul (pas de carbonates)

Tableau 3 – Absence de dégradations endogènes des BFUP.

	Pâte de ciment e/c = 0.2	BTHP E/L = 0.28	BFUP E/L = 0.2
Lixiviation par l'eau distillée ^(*)			
Coefficient de dégradation (mm/jour ^{1/2}).....	0.09		0.04
Estimation épaisseur dégradée à 100 ans.....	19 mm		7.6 mm
Lixiviation par l'eau naturelle ^(**) (régime permanent non atteint à 18 mois)			
Majorant du Coefficient linéaire de dégradation ($\mu\text{m/mois}$).....	5	6 à 12
Majorant de l'épaisseur de la couche réactionnelle à 100 ans ^(***)	6	7 à 14 mm

* Source : Thèse V. MATTE (1999)

** Source : Programme BRITE-EURAM III UNICORN (1998-2001)

***Contrairement au cas de l'eau distillée, la couche réactionnelle est peu dégradée mécaniquement

Tableau 4 - Résistance à la lixiviation des différents bétons et BFUP.

Ces résultats de recherche et de modélisation sont maintenant confortés par les retours d'expérience des BFUP les plus anciens (10 ans) et du comportement des premiers ouvrages en BFUP (5 ans), dont le comportement est excellent, dans des conditions d'exposition très drastiques (zone de marnage du St Laurent, aérorefrigérants de centrales nucléaires).

3 – La récompense d'un effort remarquable de recherche pluridisciplinaire.

Ces progrès ne sont pas le fruit du hasard ou d'une approche empirique, mais sont la trace visible des dix années de recherche scientifique réalisées dans une quarantaine de laboratoires industriels, universitaires, et CNRS, qui ont mis en œuvre et développé dans ce cadre les techniques les plus modernes de caractérisation. Dix programmes coordonnés de R&D ont été mis en jeu, dont 5 programmes européens. Issus de ce remarquable effort pluridisciplinaire, les enseignements de la recherche sur les BFUP concernent à la fois le monde scientifique et le monde industriel, dans les catégories suivantes :

- Nouveaux concepts, exploitables dans d'autres domaines connexes, (bétons autoplaçants, coulis d'injection, liants composites...)
 - Connaissances scientifiques nouvelles, (éléments de compréhension, nouvelles règles et outils de formulation)
 - Nouvelles méthodes de caractérisation,
 - Techniques de fabrication et de mise en œuvre.
- (des illustrations en seront fournies lors de l'exposé du 20.09)

Cette moisson de résultats reste néanmoins à partager avec une communauté scientifique et technique plus large. Il lui faut maintenant diffuser vers les praticiens, afin qu'il puissent se ré-approprier les nouvelles technologies et en alimenter l'état de l'art. Depuis la construction en 1997 du premier ouvrage d'art en BFUP (passerelle de Sherbrooke), les références de terrain s'accumulent, dans des applications très diverses, avec des cahiers de charges où performances mécaniques et durabilité sont exigés simultanément. Les nouveaux outils de dimensionnement des ouvrages en BFUP élaborés par le groupe éponyme de l'AFGC, la mise sur le marché de *premix* ou de BFUP prêts à l'emploi, l'extension du marché de la réparation des ouvrages, devraient permettre à ces matériaux de trouver rapidement leur créneau technico-économique. Soulignons que même si ce dernier reste modeste dans un premier temps, les retombées des recherches sur les BFUP dans les autres domaines de l'utilisation des liants hydrauliques suffisent déjà à rentabiliser le coût de ces recherches.

4 - Evolutions techniques possibles des BFUP

Les recherches sur les BFUP ont porté sur un panel d'applications qui dépasse largement le cadre du Génie Civil. Toutes ces applications n'ont pas encore atteint le stade final de la commercialisation. Les applications au périréfractaire, au domaine pétrolier, à la fabrication de pièces moulées, de composites architectoniques sont donc susceptibles de se développer rapidement. Des solutions techniques hybrides associant les BFUP à d'autres matériaux permettraient de franchir une nouvelle étape dans la conception des ouvrages. Par ailleurs, la fabrication de "*premix intelligents*" permettant de faciliter le malaxage et la mise en œuvre devrait voir le jour dans les prochaines années.

5 – Illustrations.

5.1 – Pour la première fois, la RMN du solide à haute résolution a été appliquée à la caractérisation de formulations complexes de bétons. (source : programme UNICORN, thèse de Charlotte PORTENEUVE (2001 ESPCI).

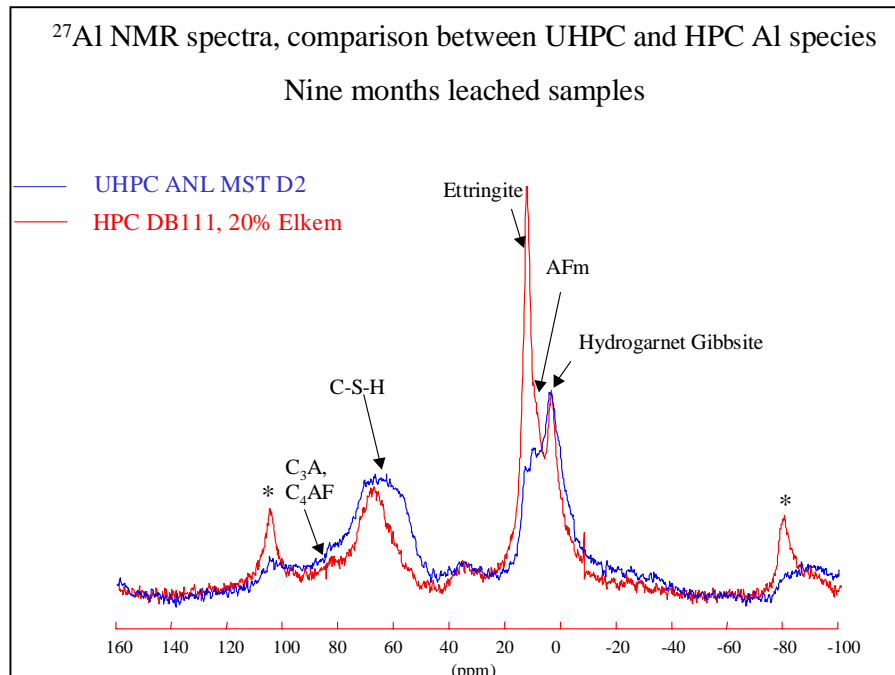


Fig. 1 - Spectres montrant la distribution des atomes d'aluminium dans les différents constituants des BFUP soumis à la lixiviation par l'eau. On remarquera la combinaison de l'aluminium sous forme d'hydrogarnats dans l'échantillon de Ductal[®] : ces hydrates sont particulièrement résistants à la lixiviation. L'aluminium se trouve aussi en partie combiné dans les CSH.

^{29}Si NMR spectra of ANL MST D2 leached for 9 and 12 months

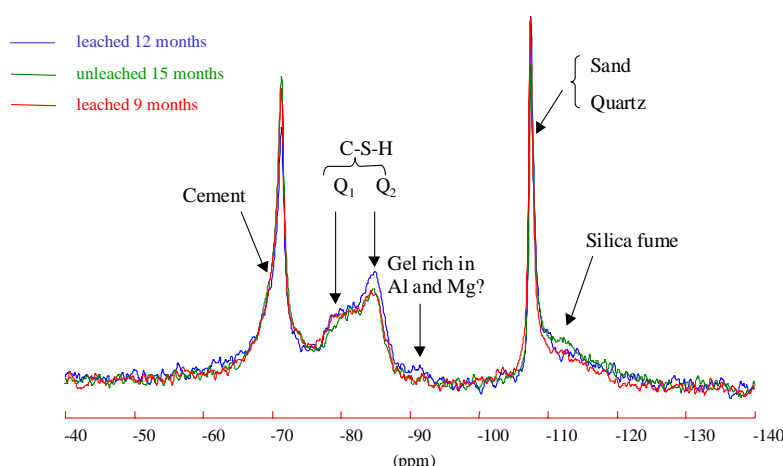


Fig. 2 Spectres du silicium montrant l'évolution de la structure des chaînes silicates des CSH soumis à la lixiviation : on remarque une très légère augmentation de la longueur des chaînes silicate, et la formation d'une faible quantité de gel (hydroxydes de Si, AL et Mg).

5.2 – Le programme européen UNICORN a été consacré à l'étude de la lixiviation des BFUP par les eaux naturelles, montrant l'exceptionnelle durabilité de ces matériaux.

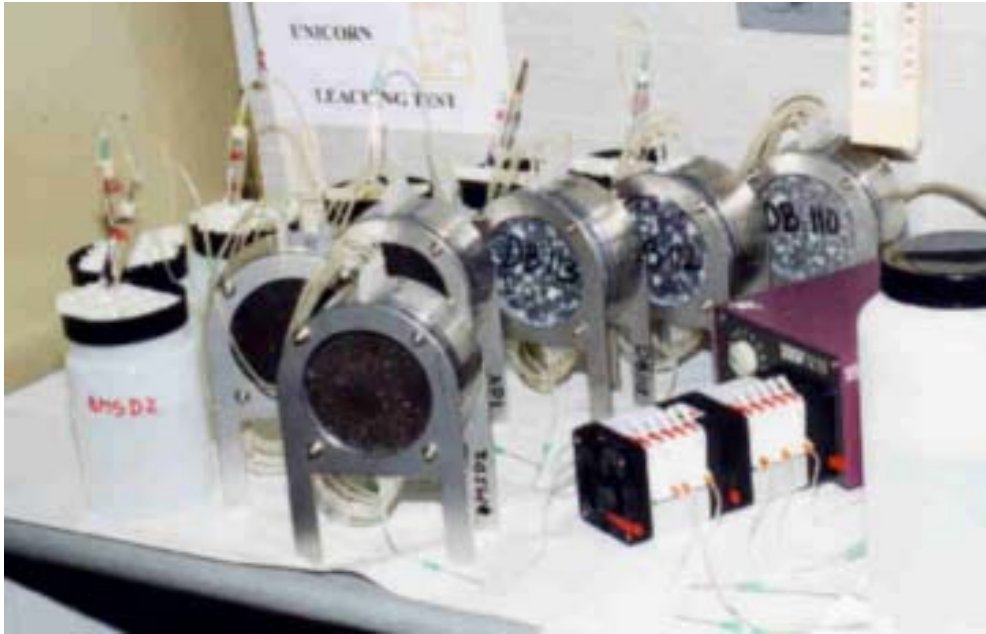


Fig.3 – Programme UNICORN - Modules de lixiviation accélérée

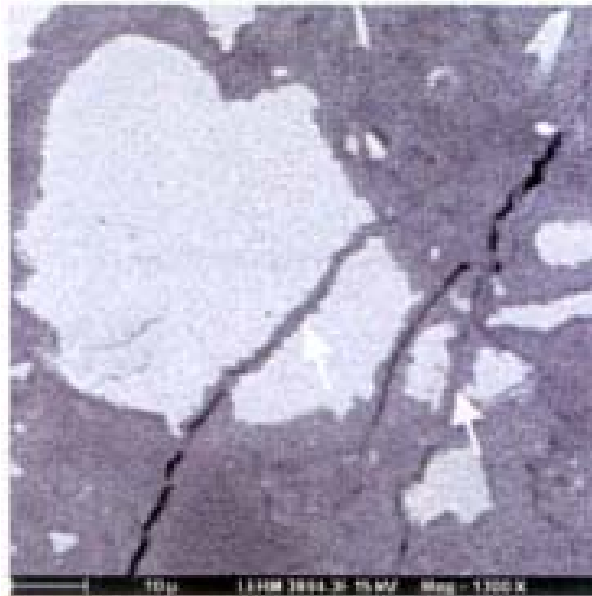


Fig. 4 - Comportement du clinker anhydre résiduel des BFUP. Phénomène de *cicatrisation*. Dans une éprouvette de BFUP préfissurée mécaniquement, pour simuler le comportement sous sollicitation limite, les microfissures se cicatrisent par formation des hydrates dans la fissure

Annexe 1

1- Nouveaux concepts développés lors des recherches sur les BFUP	Exploitation dans le domaine de la durabilité
<p>Architecture interne des BFUP. Le matériau n'est plus conçu comme un solide homogène et isotrope, mais comme un composite possédant une organisation multi-échelle.</p> <p>Optimisation granulaire Espacement multi-classe des empilements granulaires</p> <p>Adhérence chimique des composants à la matrice Particules et granulats à surface réactive</p> <p>Nouvelle approche de la durabilité Approche <i>performantielle</i> : Indicateurs quantitatifs de durabilité Concept de durée de service</p>	<p>Meilleur choix du panel et de l'organisation des constituants en fonction de la durée de service demandée et du cahier des charges</p> <p>Meilleur compromis compacité/fluidité, d'où réduction de la porosité après durcissement</p> <p>Garantie de continuité mécanique de la microstructure</p> <p>Éléments-clés d'élaboration des cahiers des charges Evaluation de la durée de service, remplaçant les différentes échelles empiriques de durabilité liées aux divers essais accélérés.</p>

2 - Connaissances nouvelles	Exploitation dans le domaine de la durabilité
<p>2.1 - Compréhension. Etudes fondamentales.</p> <p>Physique des Empilements granulaires. Propriétés des empilements polydisperses. Rôle de l'espace des classes.</p> <p>Physicochimie des BFUP Caractérisation et rôles des différentes échelles de la micro- à la nanostructure.</p> <p>Structure moléculaire des hydrates</p> <p>Cinétique chimique des matrices sous-stœchiométriques. Réaction pouzzolanique : Cinétique réactionnelle des fumées de silice. Impact sur la composition des hydrates Etude de la stabilité chimique, thermique, et des transformations de phase des hydrates</p> <p>Quantification et rôle du clinker anhydre résiduel</p> <p>Calcul de la composition de phases, et des liants hydratés.</p> <p>Calcul des variations de volume absolu, de la porosité et du degré de saturation en eau en fonction de l'avancement des réactions. Seuil de percolation et architecture des pores capillaires</p> <p>Modélisation des phénomènes de lixiviation dans différents milieux. Comportement face aux agressions chimiques</p>	<p>Réduction drastique de la porosité capillaire grâce à un meilleur compromis compacité/fluidité</p> <p>Exploitation des synergies entre les différentes échelles pour améliorer les performances mécaniques et chimiques.</p> <p>Meilleure sélection et amélioration des performances des hydrates</p> <p>Détermination des meilleurs paramètres de cure</p> <p>Meilleure exploitation des ultrafines. Compromis réactivité/remplissage granulaire/stabilité chimique</p> <p>Amélioration de la stabilité hydrique et chimique par polymérisation des CSH. Stabilisation dimensionnelle par traitement thermique</p> <p>Exploitation de la cicatrisation des micro-fissures par le clinker résiduel</p> <p>Prévision et choix d'un panel d'hydrates adapté à chaque application</p> <p>Éléments de base conditionnant la résistance aux agressions chimiques Données critiques contrôlant la perméabilité aux gaz et la diffusivité des agents agressifs</p> <p>Prévision de la durée de confinement des déchets nucléaires</p>

Annexe 1 (suite) Connaissances nouvelles (suite)	Exploitation dans le domaine de la durabilité
<p>Rhéologie. Interactions rhéologie /structure d'empilement granulaire. Règles d'adsorption des adjuvants organiques sur les constituants. Réduction des effets secondaires des fluidifiants</p> <p>Micromécanique de la rupture. Origine nano- et microstructurale du comportement mécanique. Evolution micromécanique aux jeune âges Nanostructure, performances mécaniques intrinsèques et comportement élasto-plastique des hydrates</p> <p>Interactions fibre-matrice. Adhérence. Dissipation de l'énergie de rupture. Renforts multiéchelle.</p> <p>2.2 - Règles et outils de formulation. Caractérisation et spécifications des constituants Optimisation des empilements granulaires Optimisation des doses de fluidifiant. Titrage rhéométrique. Réglage du comportement rhéologique Réglage de la cinétique de prise et durcissement. Outils logiciels de formulation. Plans d'expérience, systèmes experts</p>	<p>Meilleur compromis compacité/fluidité Réduction de la fraction lixiviable du béton</p> <p>Optimisation micromécanique du composite Maîtrise de la maturation et de la cure. Réduction des risques de micro-dommages endogènes Réduction du fluage, stabilité dimensionnelle à long terme..</p> <p>Gestion du comportement mécanique au delà de la limite élastique Amélioration de la ténacité (résistance à la microfissuration)</p> <p>Meilleure garantie de qualité</p> <p>Rapidité et facilité de formulation, meilleure garantie d'adéquation au cahier des charges</p>

3 – Progrès des méthodes de caractérisation	Exploitation dans le domaine de la durabilité
<p>Microscopie électronique en haute résolution Préparation des échantillons en coupes ultra-minces Techniques d'observation de la nano-structure</p> <p>RMN du solide Exploitation des différentes techniques haute résolution ^{29}Si, ^{27}Al. Dosage quantitatif des hydrates Polarisation croisée Relaxométrie du proton.</p> <p>Rhéométrie Nouveaux outils dédiés aux BFUP Titration rhéométrique Logiciels de traitement des données.</p> <p>Mesures non destructives Calorimétrie isotherme sur mortiers et bétons. Conductimétrie sur mortiers et bétons</p> <p>Ultrasons. Emission acoustique</p> <p>Détection magnétique des fibres. Dose et orientation moyennes Tomographie RX</p> <p>Analyse d'images Comptage local et mesures d'orientation des fibres</p> <p>Techniques de lixiviation Nouveau matériel fonctionnant en système ouvert</p> <p>Caractérisation mécanique des BFUP Traction directe, exploitation des essais de flexion Energie de rupture. Retrait. Fluage.</p> <p>Méthodes de calcul des structures en BFUP Règles de dimensionnement des structures</p> <p>Indicateurs de durabilité (4 indicateurs BFUP / recommandations AFGC 2001)</p>	<p>Maîtrise de la nanostructure des pores. Réduction de la perméabilité et de la diffusivité des ions</p> <p>Meilleure polymérisation des hydrates type CSH Contrôle de la micro- et de la nanostructure</p> <p>Caractérisation des différentes échelles de pores</p> <p>Réduction du dosage en eau et de la porosité et amélioration de la fluidité</p> <p>Contrôle de la cinétique des réactions d'hydratation des liants Quantification de la connectivité des pores capillaires. Diminution de la perméabilité Identification des micro-événements mécaniques accompagnant la prise et le durcissement Contrôle de la qualité de mise en œuvre</p> <p>(id)</p> <p>Simulation réaliste des environnements chimiques</p> <p>Contrôle des performances par rapport au cahier des charges Garantie de durabilité mécanique</p> <p>Outils de base des concepteurs</p> <p>Outils de base de rédaction des cahiers des charges</p>

Annexe 1 (suite)

4 – Progrès des techniques de fabrication et de mise en œuvre.	Exploitation dans le domaine de la durabilité
<p>Contrôles de réception des constituants</p> <p>Gestion des silos et du stockage des poudres fines Validation de la durée d'utilisation des stocks de constituants Précautions concernant le transfert, ingénierie adaptée.</p> <p>Fabrication et gestion de la qualité des PREMIX Maintien des performances d'usage des <i>premix</i>. Stabilité et maintien d'homogénéité des <i>premix</i> au transport Validation des durées de stockage maximales autorisées Validation des solutions techniques pour le transfert vers les malaxeurs</p> <p>Malaxage. Validation des performances minimales requises pour les pesées Calibration de la séquence de malaxage en fonction de l'énergie de cisaillement des différents types de malaxeurs.</p> <p>Procédés industriels de mise en place (coulage en place, injection, démoulage immédiat, compression en cours de prise, extrusion.....) Mise au point des technologies adaptées <i>"Bonnes pratiques"</i> de mise en place Formulation des variantes de BUHP pour chaque application</p> <p>Amélioration des techniques de coffrage Coffrages à géométrie variable Peaux coffrantes spéciales pour parements améliorés Coffrages étanches pour injection</p> <p>Optimisation de la séquence industrielle de traitement thermique Technologies industrielles de traitement thermique Installations foraines. Performances requises par les installations de cure thermique. Gestion de la sécurité et de la maintenance.</p> <p>Techniques de précontrainte Validation des temps de mise en détension, etc...</p>	<p>Garantie de qualité et de constance des fabrications.</p> <p>Régularité des fabrications, politique <i>"zéro défaut"</i></p> <p>(id.)</p> <p>(id.) Une défloculation correcte des fines garantit l'homogénéité chimique et mécanique du BUHP</p> <p>Les « bonnes pratiques » contribuent à la réduction des macro-défauts des ouvrages, dont l'impact sur la durabilité peut être très important.</p> <p>Un parement de qualité est une garantie de durabilité (esthétique, chimique, mécanique) de la surface</p> <p>La durabilité chimique est améliorée par une bonne maîtrise des conditions de cure thermique</p> <p>Réduction des risques de fissuration à la détension.</p>

Annexe 2 - Quelques laboratoires ayant participé à l'effort de recherche sur la durabilité des BFUP (liste non exhaustive).

1- Laboratoires industriels, Centre Techniques et Recherche Privée	Domaine de travail / expertise
<p>BOUYGUES, <i>Direction Scientifique</i> (1991-1999) LAFARGE, Laboratoire Central de Recherche RHODIA CRA, Dép^t <i>Matériaux de construction</i> TAIHEYIO (ONODA-NIHON-CHICHIBU, 1^{er} groupe cimentier Japonais) AALBORG Portland NORCEM A.S., Dep^t R&D (Dr. Knut O. KJELLEN) CEMENTA Cement Norden CBI (Dr. Bjorn LAGERBLAD) HDR (USA) CEA Saclay, DESD (Dr. Cécile RICHET) CEA Cadarache CEA-CENG IFP, Division <i>Forage et complétion</i> (Mme Christine NOÏK) CERIC-ADLER, Ateliers PELERIN (Dr. Alain LOUGE) Chaux de CONTERN, Luxembourg (Dr. WEISS)) CSTB CEBTP LCPC (P. ROSSI) EDF-CEMETE CNR LERM (Dr. Hugues HORNAIN) TOMOADOUR CAD</p>	<p>Développement, formulation, caractérisation, industrialisation des BFUP. Développement, formulation, caractérisation, industrialisation des BFUP. Adjuvantation et caractérisation mécanique de l'interaction fibre-matrice Recherche appliquée. Achat de la licence d'exploitation Ductal® Applications CRC Participation au projet BRITE UNICORN (id.) (id.) Eléments vibro-compactés en BPR. Programme CPAR (US Army) Modélisation de la lixiviation des BPR par l'eau distillée Essais d'irradiation des BFUP. Fibres acier amorphe à très hautes performances Essais en milieux agressifs sous haute pression à haute température. Développement de nouvelles techniques d'extrusion. Essais de performances sur produits extrudés ATEX et essais de qualification sur plaques de parement, essais au feu Essais mécaniques et essais accélérés de gel-dégel Caractérisation des BFUP. Nouveaux matériaux à 2 classes de fibres. Perméabilité à l'air Essais de résistance à l'abrasion Résistance à la DEF et étude du comportement du clinker résiduel de Ductal® Tomographies RX et gamma, Distribution 3-D des fibres Fabrication de nouveaux rhéomètres dédiés aux BFUP</p>

Annexe 2 (suite)

2 - Laboratoires Universitaires et CNRS (France)	Domaine de travail / expertise
<p>ESPCI Laboratoire de Physique Thermique (Pr. Hélène ZANNI) ESPCI Laboratoire Matériaux minéraux (Pr. Philippe BOCH) ENS Cachan LMT (Pr. Micheline MORANVILLE).</p> <p>Ecole Centrale de Nantes (Dr. A. LOUKILI) LMDC-INSA Toulouse INSA Lyon ESC Mulhouse UPMC Ecole Polytechnique Palaiseau LEM Nancy (Pr. CASES, Dr. Jacques YVON)</p> <p>CRMD Orléans (Pr. Henri VAN DAMME) IUT Lyon IET-CSIC Madrid (Dr. Carmen ANDRADE, Pr��s. RILEM)</p>	<p>RMN du solide haute résolution DRX Rietveld, analyse thermique, synthèse minérale Adsorption des fluidifiants et comportement rhéologique des BRP (thèse Olivier BONNEAU) Résistance à la DEF et processus de cicatrisation des Ductal^{��} (Contrat REACTIF) Retrait-Fluage des BPR Perméabilité à l'oxygène, MEB, MET, nano-indentation, caractérisation de la nano-structure des BPR. Synthèse et caractérisation d'hydrates dérivés du CSH. Relaxométrie du proton, étude de la nano-porosité. Caractérisation des différents ��tats énergétiques de l'eau dans les BPR, étude de leur évolution au cours des différents types de cure thermique (thèse Emmanuel SAUZEAT) Empilements granulaires et rhéologie (thèse IFP-Nicolas DUBOIS). Canoë en Ductal^{��} Résistance aux agents agressifs, corrosion, résistance à la lixiviation par les eaux naturelle (Programme BRITE UNICORN)</p>
<p>3 – Laboratoires universitaires de recherche étrangers</p>	
<p>Université de Sherbrooke (Québec) Laboratoire de Génie Civil (Pr. Pierre-Claude A��TCIN)</p> <p>Université LAVAL Montréal (Quebec) ENEA (Rome) Consorzio PADOVA RICERCHE (SP) University of AALBORG (Dk) Université de Leeds (UK) Imperial College London (UK) Université de Delft (Génie Civil)</p>	<p>Essais accélérés de gel-dégel et diffusion de chlorures. Qualification du BPR pour la passerelle de SHERBROOKE et supervision de la réalisation de l'ouvrage. Etude du retrait endogène, essai de durabilité des BFUP Part. HITECO (id.) CRC CRC Part. HITECO Canoë en BPR</p>