

LES BETONS DE HAUTES PERFORMANCES

bétons aux fumées de silice

Par
Hamid KHELAFI

Docteur en Génie Civil, Maître Assistant à l'IGCMO - USTO (Oran)

Résumé

Le béton de hautes performances est un béton spécial en voie de développement dans les pays occidentaux. Il a fait preuve de grandes performances mécaniques et a été utilisé dans d'importants ouvrages. Le présent article présente les caractéristiques essentielles de ce béton qui, soulignons le, peut être confectionné chez nous et avec des matériaux locaux. Ses constituants sont "ciment + granulats + sable + eau + poudre pouzzolanique + fluidifiant". Il nous paraît important de développer ce nouveau matériau chez nous tout en assurant une meilleure continuité entre la recherche, l'ouvrage et la réglementation.

Mots clés : fumée de silice - pouzzolane - fluidifiant - haute résistance - compacité - microstructure - haute performance - durabilité.

1 INTRODUCTION

Depuis le début du siècle, les chercheurs se sont intéressés à l'augmentation de la résistance à la compression du béton par différents procédés tels que la centrifugation ou la compression sur béton frais. Des produits tels que les résines et les fibres sont apparus plus tard pour conférer de grandes résistances aux bétons, mais à des prix insupportables.

Actuellement, on arrive, après une sélection des matériaux, à fabriquer de bons bétons maniables et très résistants, pour un supplément de prix raisonnable.

Le béton possédant les caractéristiques suivantes :

- ▲ une compacité maximale,
- ▲ une résistance très élevée,
- ▲ un module d'élasticité élevé,

- ▲ des déformations différées minimales,
- ▲ une très bonne perméabilité,
- ▲ une très bonne durabilité,
- ▲ une très bonne liaison avec l'acier,

est, depuis 84/86, nommé **BETON DE HAUTES PERFORMANCES (B.H.P.)** car le terme hautes résistances est trop limitatif.

Depuis, plusieurs laboratoires s'intéressent de plus en plus à l'étude approfondie des caractéristiques du BHP telles que sa microstructure, ses performances mécaniques, sa durabilité et son adhérence avec l'armature.

Les chercheurs combinent deux ajouts ; une poudre ultrafine à caractère **pouzzolanique** et un fluidifiant approprié et efficace.

La poudre ultrafine est généralement une fumée de silice condensée (FSC), qui est un sous-produit de la fabrication du silicium ou d'autres alliages.

La FSC possède deux effets principaux :

- ▼ l'effet pouzzolanique, qui consiste à fixer la chaux Ca(OH)_2 pour former un composant hydraté plus résistant C-S-H (silicate de calcium hydraté).
- ▼ l'effet de remplissage, qui consiste à combler les vides (de l'ordre du micron) laissés entre les grains du ciment.

Le fluidifiant déflocule les grains de la FSC, les disperse dans la pâte et diminue ainsi le dosage en eau.

Grâce à ce procédé, on atteint des résistances moyennes à la compression entre 80 et 120 Mpa.

L'objet du présent article est d'établir un état de connaissance de ces nouveaux bétons à travers une synthèse bibliographique de ce qui existe dans la littérature et d'en déduire les conclusions.

2 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Plusieurs publications sur les bétons avec fumée de silice sont parues à ce jour. Nous avons jugé utile de faire une analyse de la bibliographie existante afin de cerner et d'éclaircir les propriétés importantes du BHP.

2.1 Composants essentiels du BHP

Les composants les plus spécifiques du BHP sont les adjuvants *fluidifiants* et les poudres *ultrafines*.

Le fluidifiant appartient le plus souvent à l'une des deux espèces chimiques suivantes ; les résines mélamines et les naphthalènes sulfonates. L'incorporation du fluidifiant pendant ou à la fin du malaxage d'un béton très sec permet l'obtention d'une consistance normale. Son rôle principal est généralement celui de réducteur d'eau.

Les ultrafines sont généralement des fumées de silice constituées de microsphères de diamètre compris entre 0.01 et 10 microns, de densité 2.2 de surface spécifique 20 m²/g (contre 0.4 pour le ciment), de masse volumique 200 kg/m³. La silice (SiO₂) représente 85 à 98% en poids des composants chimiques de la FSC.

Selon des auteurs, le dosage en ciment varie de 300 à 600 kg/m³, une quantité de FSC entre 5 et 30% (en poids du liant), un rapport eau/liant allant jusqu'à 0.25 et un dosage en fluidifiant de 2 à 5% (en poids du liant).

a) Le fluidifiant

On sait bien que la maniabilité du béton frais est gouvernée par le dosage en eau. Cependant, les conséquences *néfastes* de l'augmentation d'eau dans le béton sont :

- ▲ la ségrégation du matériau,
- ▲ la perte d'homogénéité,
- ▲ l'augmentation de la porosité,
- ▲ la chute de résistance,
- ▲ la diminution de la durabilité.

C'est pour ces raisons que les chercheurs ont, depuis longtemps déjà, fait appel à des produits de la chimie organique rendant le béton maniable sans diminuer sa compacité (Tableau 1).

Par l'observation au microscope, on constate que les grains de ciment s'agglomèrent lors du gâchage mais sont dispersés sous l'action du fluidifiant (Figure 1).

Déformation	Fabrication	Forme commerciale
Mélamine sulfonée formaldéhyde	réaction résine de mélamine / formaldéhyde + sulfonation par solution de bisulfite de sodium + polymérisation	solution aqueuse à 20% d'extrait sec couleur laiteuse
Naphtalène sulfonée formaldéhyde	réaction naphtalène / formaldéhyde + sulfonation + neutralisation à la soude + polymérisation	solution aqueuse entre 20 et 45% couleur brune
Lignosulfate de sodium (ou calcium)	traitement du bois par voie chimique	liquide de couleur brun foncé
Autres produits : saccharates, carboxylates, esters, acides sulfoniques, etc.		

Tableau 1 : Classification des adjuvants fluidifiants.

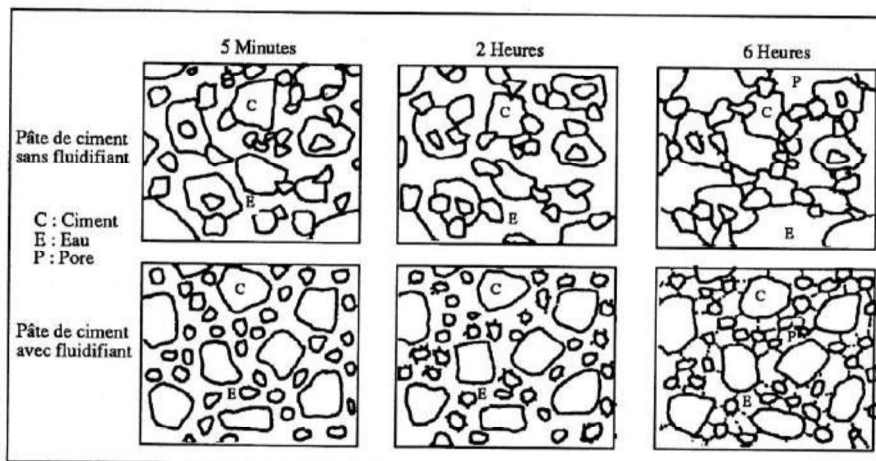


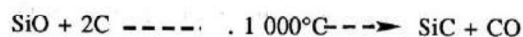
Figure 1 : Dégglomération des grains de ciment par un fluidifiant.

b) La fumée de silice condensée

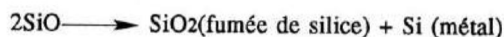
Les premiers bétons aux FSC (années 50) n'ont pas été faits dans le but d'obtenir des performances particulières mais plutôt pour utiliser un sous produit de l'électrometallurgie jugé polluant.

○ Schéma de formation de la FSC

La FSC renferme toujours du carbure de silicium SiC, ce dernier résulte de la réaction dans la zone la plus chaude du four ;



Le SiO étant instable dans cette zone où la température atteint 1 000°C, a tendance à se transformer en silicium (Si) et dioxyde de silicium (SiO₂) ;



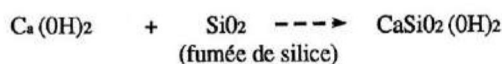
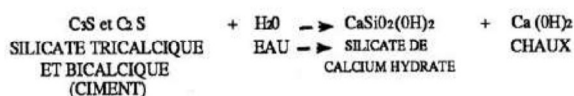
Dans les usines, on obtient environ 300 Kg de FSC par tonne d'alliage produit. Il faut rappeler aussi que les propriétés physico-chimiques de la FSC sont assez dispersées d'une usine à l'autre (Tableau 2).

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	C	SO ₃
85 / 98	0.1/4.4	0.2/2.5	0.02/2.6	0.2/2	0.2/1.5	0.5/6.9	1.3/4.3	0.1/0.4

Tableau 2 : Composition chimique des fumées de silice (%).

La nature chimique de la FSC la rend capable de réagir avec la chaux libérée par le ciment (rôle pouzzolanique), des hydrates contribuant à la résistance mécanique sont ainsi formés.

Le mécanisme simplifié d'hydratation de la pâte de ciment contenant la fumée de silice est donnée ci-après :



Par ailleurs, la grande finesse de cette poudre lui permet de s'insérer entre les grains du ciment et de diminuer ainsi le pourcentage des pores. Cependant, ce rôle de remplissage n'est rempli qu'en présence de fluidifiant approprié sans lequel la demande en eau est au contraire accrue (Figure 2).

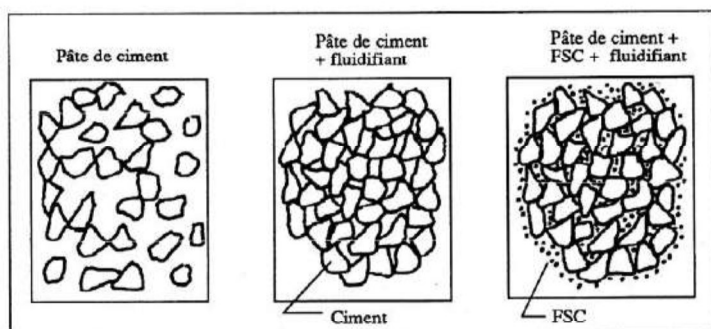


Figure 2 : Structuration de la pâte dans le béton frais.

2.2 Caractéristiques du matériau BHP

Parmi les travaux sur les bétons aux FSC, certains s'intéressaient à un matériau de propriétés mécaniques ordinaires où la FSC a été ajoutée en *substitution* au ciment (10 kg de FSC apportent le même accroissement de résistance que 20 kg de ciment dans un béton ordinaire). Par contre dans les BHP, la FSC est toujours en *ajout* par rapport au ciment et l'emploi d'un fluidifiant est obligatoire.

Il est donc intéressant de rechercher un matériau dont le coût reste compatible avec les applications du Génie Civil.

2.2.1 Choix des constituants du BHP

Pour un béton ordinaire, on réalise un mélange de bonne maniabilité et de coût raisonnable, ce qui conduit à limiter le dosage en ciment (maximum 400 kg/m³), composant le plus cher.

Pour le BHP le dosage en ultrafines implique un dosage en fluidifiant dont le coût peut devenir prohibitif. C'est pour cette raison que les considérations économiques coïncident rarement avec les considérations optimales conduisant aux plus fortes résistances (en BHP on raisonne en terme de *coût/résistance*).

On utilise généralement, pour élaborer un BHP, du ciment CPA de bonne qualité, mais pas forcément de hautes résistances.

Le fluidifiant le plus souvent préféré appartient aux naphthalènes sulfonés car son efficacité se prolonge davantage dans le temps. On s'est rendu compte que l'efficacité de ce fluidifiant est meilleure s'il est introduit en fin de malaxage.

En présence du fluidifiant, le dosage en eau (eau/ciment) est compris entre 0.25 et 0.35. Le rapport de 0.37 représente la quantité nécessaire pour l'hydratation totale du ciment. Ce qui veut dire qu'une quantité de ciment reste anhydre dans un BHP, même à long terme. On peut alors conclure qu'en plus de sa fonction liante, le ciment joue le rôle d'un granulat inerte de petite dimension.

Concernant les granulats, leur résistance intrinsèque joue un rôle très important dans les BHP car les faciès de rupture sont *transgranulaires*. Dans les bétons ordinaires, les granulats sont déchaussés de leur matrice lors de la rupture (Figure 3). Il est donc recommandé d'utiliser des granulats de grandes résistances (bauxite calcinée, carborundum, granite, calcaire dolomitique, etc).

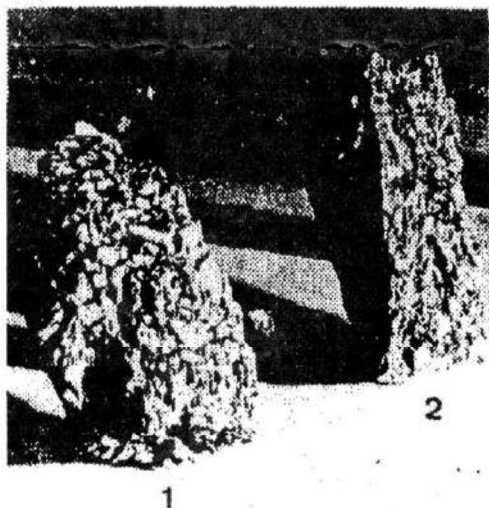
2.2.2 Béton frais

Il faut tenir compte de deux paramètres importants pouvant changer la maniabilité du BHP :

- La consommation d'une quantité du fluidifiant par les premiers hydrates du ciment.
- L'absorption d'eau par les granulats.

Ce phénomène peut être préjudiciable pour un béton malaxé en centrale et mis en oeuvre sur un chantier relativement éloigné. L'emploi d'un *retardateur* d'hydratation compatible s'impose alors.

Les utilisateurs du BHP ont constaté l'absence totale de ségrégation ou de ressuage. La pâte est assez visqueuse l'homogénéité du matériau est excellente. Mais l'absence de ressuage nécessite une meilleure surveillance du BHP surtout par temps chaud (la dessiccation rapide provoque souvent des fissures superficielles).



1 - Béton ordinaire
2 - Béton de hautes performances

Figure 3 : Rupture dans les bétons.

2.2.3 Microstructure du BHP

La majorité des auteurs considère la FSC comme une excellente pouzzolane. La réaction pouzzolanique se produit dans des conditions normales de température (20 °C) entre le 7ème et le 14ème jour.

On a constaté alors, par diffraction aux RAYONS "X", que la quantité de chaux libérée décroît pendant cette période puis se stabilise (en fonction de la quantité de FSC introduite).

L'observation au microscope électronique d'un mortier avec FSC montre une structure de CSH particulièrement dense et amorphe. La pâte est microfissurée par endroit mais plus faiblement qu'une pâte ordinaire. La liaison pâte-granulat est exempte de toute fissuration. C'est ce qui explique l'excellente tenue de cette liaison.

2.2.4 Propriétés mécaniques instantanées

Bien que la réaction pouzzolanique ne se développe que dans la 2ème semaine, le BHP atteint souvent 80 Mpa à 24 heures. Ce qui montre la contribution du FSC et de l'adjuvant dans l'accélération du durcissement. Les chercheurs sont unanimes sur le fait que la résistance à la traction (comprise entre 4 et 7 Mpa) augmente mais pas dans les mêmes proportions que la résistance à la compression (1/20 pour le BHP contre 1/12 pour le béton ordinaire).

La partie ascendante du diagramme contrainte-déformation du BHP est quasi-linéaire (pour le béton armé le diagramme présente un fléchissement à partir de 50% de la charge maximale). La partie descendante du diagramme du BHP est difficile à obtenir même si la vitesse de déformation est contrôlée, ce qui a laissé penser que les BHP sont fragiles (Figure 4).

Les mécaniciens de la rupture ont constaté que le chargement nécessaire pour qu'une fissure progresse dans le BHP était plus important que dans le cas des bétons ordinaires, d'où un supplément de sécurité quant aux défauts dus à la mise en œuvre.

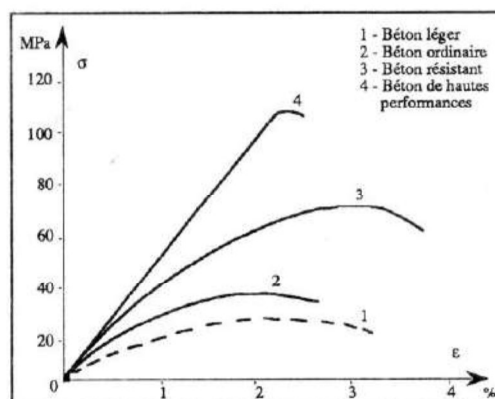


Figure 4 : Diagramme contrainte-déformation dans les bétons.

2.2.5 Déformations différées (retrait et fluage)

En général, le retrait du béton est provoqué par un accroissement de tensions superficielles de l'eau libre adsorbée par le squelette de la pâte (Figure 5). Ceci est provoqué par un départ de l'eau (hydratation créant le retrait d'autodessiccation ou l'évaporation créant le retrait de séchage). En effet les résultats expérimentaux dans certaines publications confirment cette théorie qui a pour conséquence une diminution du retrait dans les BHP.

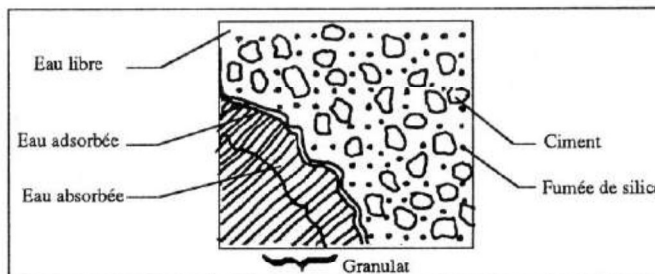


Figure 5 : Différents états de l'eau dans le béton frais.

Les résultats du fluage sont difficilement interprétables, le niveau du chargement soutenu diffère d'un auteur à l'autre. Une chose est certaine, c'est que l'eau joue un rôle primordiale dans le fluage. Plus le rapport eau/ciment est faible moins il y aura de pâte par rapport aux granulats et plus faible sera le fluage. D'après certains auteurs, le BHP flue moins que le béton ordinaire. Si ce résultat est confirmé par des essais à long terme (5 ans et plus), il constituerait un argument important pour l'utilisation du BHP dans la précontrainte.

2.2.6 Durabilité

La majorité des tests classiques de laboratoire simulant certains mécanismes de dégradation (gel-dégel, feu, agent chimique, etc) montrent une supériorité

rité très nette des BHP. Cependant, seule l'expérience en grandeur nature et à très long terme permettra d'avoir une sécurité totale sur l'emploi de ces matériaux.

2.2.7 Adhérence armature-BHP

Sur ce sujet, la littérature est encore peu abondante. Les travaux que nous avons pu effectuer (*) sur l'essai d'arrachement et l'essai tirant nous permettent de conclure que :

- La résistance à l'apparition et à la propagation de l'endommagement de la liaison d'adhérence résulte non seulement de la résistance mécanique en traction du béton d'enrobage mais aussi de sa *micro-structure* (Figure 6).
- Les paramètres effort maximal, raideur, réversibilité évoluent dans un sens favorable lorsque l'âge du béton, la longueur de contact BHP-armature ou le rapport liant/eau augmentent.

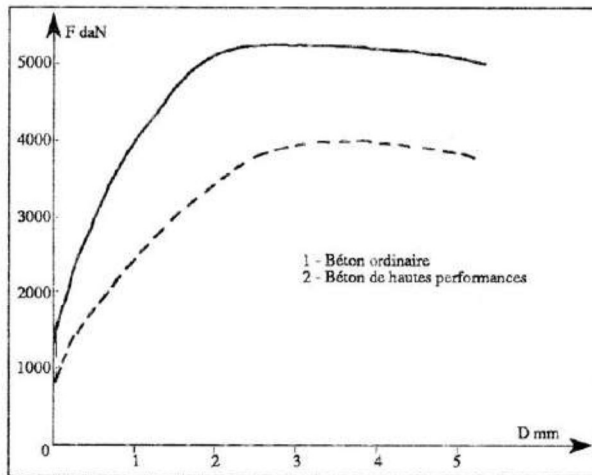


Figure 6 : Déplacement de la barre enrobée en fonction de la force d'arrachement.

2.3 L'emploi du matériau BHP

Au début des années 70, les marchés du béton et de l'acier dans la construction étaient bien distincts. Le marché "*horizontal*" était réservé au béton et le marché "*vertical*" constituait le domaine de l'acier. Il était alors impensable qu'un jour le béton puisse concurrencer l'acier dans la construction de gratte-ciel. C'est ce qui est arrivé à la fin des années 80.

Aussi, il ne faut pas oublier que les règlements du béton armé et du béton précontraint dans le monde ne s'appliquent qu'à des bétons de résistances ne dépassant pas 60 Mpa en compression. Cependant un nombre non négligeable d'ouvrages a été construit à partir du béton de grande, voire très grande résistance.

(*) Laboratoires de Génie Civil, INSA de Toulouse - France.

2.3.1 Historique de l'emploi du béton aux fumées de silice

- En 1950 "Technical University of Norway" a effectué les *premières études* de laboratoire sur la fumée de silice dans le béton.
- En 1952, il a été construit une partie d'un tunnel à Oslo (Norvège) avec un béton contenant la FSC en substitution au ciment.
- En 1971, la fonderie de Fiscaa (Norvège) a utilisé un béton aux FSC.
- En 1975 à Gothenberg (Suède), on a assisté au *premier usage* industriel de la FSC dans une centrale.
- En 1978, il a été établi en Norvège et Suède une norme autorisant l'emploi de FSC de dosage maximal 10% par rapport au ciment.
- En 1980, on a assisté à la *première expérience* sur chantier effectuée par l'usine SKW de Becancourt au Québec (Canada). Il s'agissait d'un revêtement de trottoir en béton avec FSC.
- En 1982, on a employé pour la *première fois* à Kansas city (USA), du béton aux FSC.
- En 1983 en Pennsylvanie (USA), il a été mis en oeuvre un béton de 86 Mpa aux FSC, pour la préparation d'un bassin d'épanchement d'un barrage soumis à l'abrasion.
- En 1984 les japonais ont réalisé une plate-forme off-shore en béton léger à hautes performances (granulat léger + fluidifiant + FSC).

2.3.2 Exemples de gratte-ciel en BHP

Le "SCOTIA PLAZA" construit à Toronto en 87/88 est le *premier gratte-ciel* en BHP au Canada où la résistance caractéristique utilisée dans ses calculs fut 70 Mpa alors que le béton livré avait une résistance moyenne de 93.4 Mpa.

Le "TWO UNION SQUARE BUILDING" est un édifice de 58 étages à Seattle aux USA. Sa construction en 88/89 était caractérisée par l'utilisation pour la *première fois* dans le monde d'un béton de 120 Mpa (alors qu'on n'avait besoin que de 90 Mpa). Sa construction a résolu l'un des problèmes les plus spectaculaires de la charpente métallique en l'occurrence "l'oscillation" du gratte-ciel sous l'effet du vent causant le mal de mer aux occupants des derniers étages.

Le "ONE WACKER PLACE" est en cours de construction à Chicago en USA depuis 89/90. Une fois terminé, il aura 290 mètres de hauteur et sera le plus haut édifice en béton armé. La résistance des 13 premiers étages est de 80 Mpa et diminuera progressive-

ment jusqu'à 40 Mpa aux derniers étages. Les poutres et les dalles sont post-tensionnées.

3 CONCLUSION

Au début des années 70, les producteurs de béton ne pouvaient pas, avec les matériaux de l'époque, diminuer le rapport eau/ciment au dessous de 0.4 tout en assurant à l'entrepreneur une mise en place pas trop pénible et coûteuse en temps et en main d'œuvre.

Il a fallu attendre l'arrivée sur le marché de fluidifiants de synthèse efficace et sans effets secondaires pour pouvoir fabriquer des bétons de rapport E/C compris entre 0.3 et 0.4.

La mise sur le marché d'un autre résidu industriel à caractère pouzzolanique a permis d'aller encore plus loin dans cette course. Il est désormais possible de livrer des bétons très performants de rapport E/C compris entre 0.2 et 0.3 ayant 20 cm d'affaissement après leur fabrication.

L'objectif principal pour élaborer un BHP est d'obtenir la microstructure la *plus compacte* possible au moment où se développe la matrice solide. Cela revient à diminuer autant que possible le volume qui ne sert pas à hydrater des grains de ciment aux très jeunes âges.

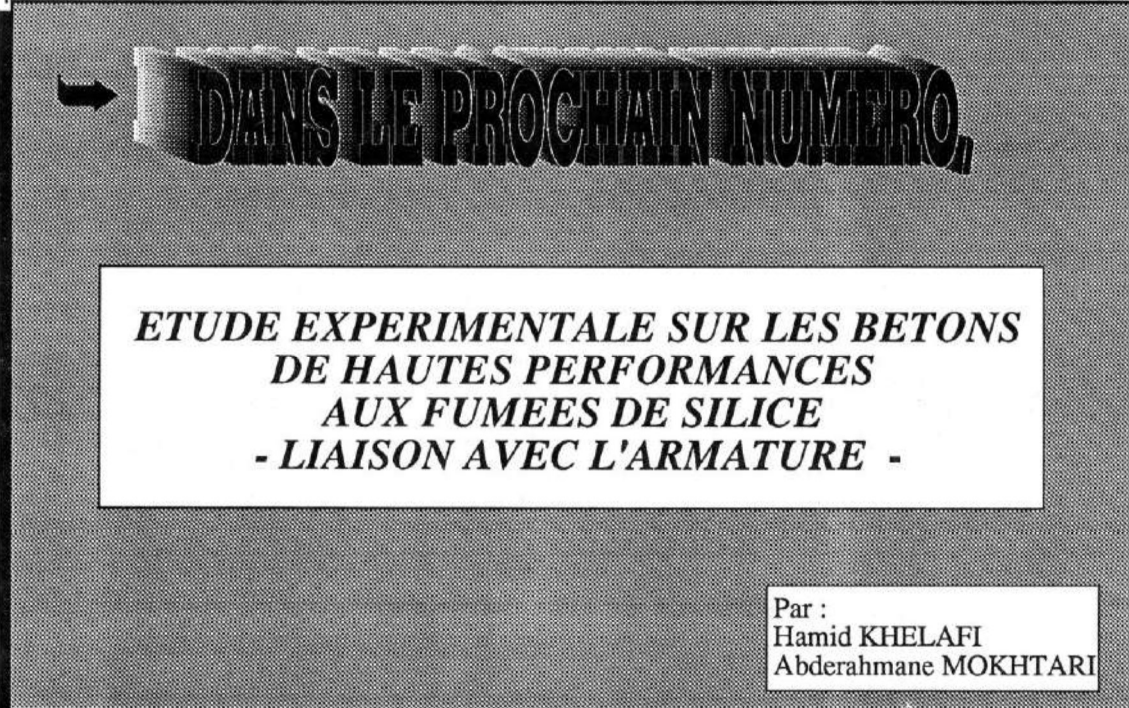
La formulation, la mise au point et la livraison du BHP ayant des rapports eau/ciment de plus en plus faible représentent un *défi* de taille pour tout producteur de béton.

Certes, le marché des BHP est relativement marginal pour l'instant mais c'est un marché d'avenir.

A l'heure actuelle, il semble difficile de dépasser une résistance de 150 Mpa à la compression. Cependant, il se trouvera une génération pour franchir cette nouvelle barrière technologique pour finalement buter sur la suivante ⑥

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. Khelafi : "*Contribution à l'étude de l'association armature-béton de hautes performances*". Thèse de Doctorat en Génie Civil INSA de Toulouse, Juillet 88.
- [2] H. Khelafi, M. Lorrain : "*Contribution à l'endommagement de la liaison armature-béton de hautes performances*". Annales de l'ITBTP N°472, Février, 1989.
- [3] Divers auteurs sous la direction de Y. Malier : "*Le béton à hautes performances, du matériau à l'ouvrage*". Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Paris, 1990.
- [4] F. De Larrard : "*Formulations et propriétés des bétons à très hautes performances*". Thèse de Doctorat l'ENPC. Rapport de recherche des LPC n°149 mars 88.
- [5] P.C. Aitcin, J. Albinger : "*Les bétons à hautes performances. Expériences nord américaine et française*". Annales de l'ITBTP N°473, Mars/Avril 1989.



The graphic features a dark, textured background. At the top, a large, 3D-style title reads "DANS LE PROCHAIN NUMERO," with an arrow pointing left towards it. Below this, a white rectangular box contains the following text in bold, italicized capital letters: "ETUDE EXPERIMENTALE SUR LES BETONS DE HAUTES PERFORMANCES AUX FUMEEES DE SILICE - LIAISON AVEC L'ARMATURE -". In the bottom right corner, another white box lists the authors: "Par : Hamid KHELAFI, Abderahmane MOKHTARI".