

CHAPITRE IV: Matériaux de construction

IV.1. Amélioration des procédés de préfabrication BHP, BTHP, BUHP

IV.1.1. Introduction

Les lois du béton liant la résistance à la composition sont énoncées dès la fin du XIXe siècle avec en particulier l'ingénieur français Férét, mais ne sont pas exploitées immédiatement. Jusqu'à la fin des années 1940, la formulation du béton était d'une grande simplicité : 800 litres de gravillons, 400 litres de sable, de 4 à 8 sacs de ciment et de l'eau en abondance. Cette recette ne devait pas correspondre toujours exactement à un mètre cube, mais elle faisait prise et durcissait. Avec des coefficients de sécurité à la rupture de l'ordre de trois dans des ouvrages simples, les risques étaient minimes.

- Dans les années 1940, on sait que pour obtenir un béton, il faut minimiser le pourcentage de vides. M. Duriez précise ainsi qu'il convient d'aboutir à une ossature dont la surface spécifique soit minimale tout en donnant un béton qui, mis en place avec le dosage en ciment prescrit et le minimum d'eau nécessaire au mouillage de tous les grains, ciment compris, forme un ensemble homogène sans vide
- Dans les années 1980, on découvre le moyen de réduire ces vides avec l'ajout de microparticules et d'adjuvants de types plastifiants, ainsi naissent les bétons hautes performances.
- *Pour améliorer les performances d'un béton, il convient d'en réduire la porosité en agissant sur le squelette granulaire (granulométrie) par l'addition de particules ultrafines type "fumée de silice", l'ajout d'un adjuvant superplastifiant/haut réducteur d'eau et par la réduction du rapport eau/ciment.*

IV.1.2. Béton hautes performances (BHP)

IV.1.2.1. Définition

- **Un béton hautes performances (BHP) (ou béton à hautes performances)** est un béton caractérisé par une très forte résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure à 50 MPa à 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais (notamment en termes de viscosité), à court ou à long terme.
- Le béton hautes performances est apparu à la fin des années 1980.
- L'emploi des "superplastifiants/haut réducteur d'eau" permet de réduire l'eau du béton à consistance égale entraînant la suppression d'un volume important non mobilisé par l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment.
- Le rapport eau/ciment est ainsi de 0,30 à 0,40 alors qu'il est habituellement de 0,45 à 0,60 pour un béton ordinaire

IV.1.2.2. La composition d'un béton hautes performances est en général la suivante :

750 à 950 kg/m³ de gravillons, 700 kg/m³ de sable, 350 à 500 kg/m³ de ciment de classe 52.5 N ou R et d'une addition type "fumée de silice".

L'ajout d'un "superplastifiant/haut réducteur d'eau" à hauteur de 1 à 2 % du poids de ciment permet de réduire le volume d'eau nécessaire à une valeur de 140 à 160 litres/m

IV.1.3. Les bétons à très hautes performances (BTHP)

IV.1.3.1. Définition

- L'utilisation de particules ultrafines de moins d'un micron de largeur contribue à réduire encore plus la porosité, mais est essentiellement utilisée pour les bétons à très hautes performances (BTHP)
- Les particules ultrafines utilisées sont la plupart du temps des fumées de silice, contenant plus de 90 % d'oxyde de silicium, sous-produit de l'industrie du ferrosilicium. Ces fumées de silice ont une double action. Outre le fait de réduire les vides, elles jouent aussi un rôle de catalyseur avec la chaux vive, lié à leur caractère pouzzolanique

IV.1.4. Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUHP)

IV.1.4.1. Définition

Ce type de béton combine les avantages des bétons très hautes performances et les bétons renforcés de fibres. En comparaison aux bétons normaux, ils contiennent plus de ciment, un ratio eau/ciment plus bas, des granulats à large distribution granulométrique et des fibres

IV.4.1.2. Propriétés

IV.4.1.2.1. Manœuvrabilité

Du fait de la présence **de superplastifiants**, le béton **hautes performances est très facilement manœuvrable**.

- Les valeurs d'affaissement sont mesurées au cône où à la table à chocs pour une classe S4 ou F5 (fluide) dans la plupart des cas.
- La fluidité d'un tel béton permet une facilité de mise en œuvre avec en particulier un bon remplissage des coffrages et un enrobage complet des armatures, y compris dans les zones où le ferrailage est très dense.
- Cette facilité de mise en œuvre permet en outre de réduire les délais d'exécution et autorise des bétonnages complexes dans des conditions d'accès difficiles, comme les pompages sur une grande hauteur (cas des piles du viaduc de Millau)



IV.4.1.2.2. Durabilité

La porosité et la perméabilité de ces bétons améliorent par ailleurs la durabilité.

- Il en est de même pour la résistance aux agressions chimiques comme celles que peuvent subir les bétons en milieu marin ou en milieu agressif (ciment de classe PM-ES) et la résistance au gel.
- La résistance aux agents agressifs (ions chlore, sulfates, eau de mer, acides ...),
- le faible risque de corrosion des armatures,
- la forte résistance au cycle gel-dégel et à l'écaillage
- la faible perméabilité est autant de propriétés qui qualifient ce béton comme étant durable

IV.4.1.3. Caractéristiques

IV.4.1.3.1. Résistance à la compression

Les bétons sont classés selon leur résistance à la compression à 28 jours. Les bétons hautes performances ont une résistance élevée.

Classe	Résistance à la compression à 28 jours (en MPa)
Béton ordinaire	16 à 40
Béton à hautes performances	45 à 60
Béton à très hautes performances	65 à 100
Béton à ultra hautes performances	> 150 (EIFFAGE avec le BSI peut atteindre 195 MPa) et BOUYGUES 250 Mpa

IV.4.1.3.2. Fluage et fluidité

Le fluage est très inférieur à celui d'un béton usuel. Le coefficient de fluage, égal au rapport de la déformation différée sur la déformation instantanée est compris entre 1 et 1,5 pour les BHP alors qu'il est de 2 pour les bétons ordinaires

IV.4.1.7. Contrôle

le Béton hautes performances est soumis aux mêmes types d'essais que les bétons ordinaires dans le cadre de leur conformité à la norme NF EN 206-1, par exemple :

- Consistance mesurée au cône d'Abrams

- Résistance à la compression

Il y a aussi divers essais complémentaires permettent de mesurer les propriétés du Béton hautes performances aussi bien au stade de mise au point de la formulation, que lors des convenances, ou des contrôles sur chantier.

- Étalement à la table à secousse
- Rhéomètre
- Méthode des coulis de l'AFREM
- Méthode du Mortier de Béton Equivalent (MBE)

IV.4.1.8. Applications

- Les grandes résistances à court terme de 24h à 3 jours selon CCTP permettent un décoffrage rapide ainsi que des mises en précontraintes rapides.
- les BHP sont utilisés pour des ouvrages: précontraints, préfabriqués, coulés en place
- Les propriétés élevées au jeune âge conduisent à préconiser l'utilisation de ce BHP pour les ouvrages soumis à de fortes sollicitations mécanique (bâtiments de grande hauteur, ponts, réservoirs, centrales nucléaires, etc)⁹.
- La résistance en milieu agressif conduit à les préconiser pour les travaux en milieu marin ou agressif.
- Enfin lorsque le béton doit être pompé sur une grande hauteur, le BHP est recommandé du fait de sa grande manœuvrabilité

IV.2. Bétons à bas-pH

Les bétons bas pH intéressent en premier lieu les pays **qui souhaitent opter pour un stockage géologique profond dans la gestion de leurs déchets nucléaires**. Ainsi des formulations ont-elles été développées au Japon, au Canada, en Suède, en Finlande et en Espagne.

IV.2.1. Béton Canadian LHHPC (low heat high performance concrete)

Le béton LHHPC [GRA 98] a été développé par l'AECL (Energie Atomique du Canada) dans le cadre du projet TSX (Tunnel Sealing eXperiment) qui a pour objectif de montrer la faisabilité du scellement d'une galerie de site de stockage profond et de comparer les propriétés hydrauliques du béton et de l'argile.

IV.2.1.1. Principes de formulation

La formulation du béton LHHPC a été mise au point en respectant les principes suivants :

- la teneur en CEM I est diminuée jusqu'à une valeur telle que l'échauffement au sein du matériau pendant l'hydratation n'excède pas 20°C,

- la fumée de silice est ajoutée en quantité suffisante pour que la portlandite libérée par l'hydratation du ciment Portland soit consommée en totalité par réaction pouzzolanique,
- un filler siliceux faiblement pouzzolanique (silice broyée) est introduit afin d'augmenter la compacité du matériau,
- le rapport E/L est maintenu aussi élevé que possible afin de favoriser l'hydratation du liant tout en conservant des propriétés acceptables pour le matériau durci,
- le ciment Portland utilisé est résistant aux sulfates.

Le Tableau récapitule la composition du béton LHHPC. Le liant est composé de **50% de CEM I et de 50% de fumée de silice**.

	Béton LHHPC (dosage en kg/m³)
Ciment Portland	97
Fumée de silice	97
Silice broyée	194
Superplastifiant	10,3
Sable	895
Gravier	1040
Eau	97
Rapport E/L	0,5

IV.2.1.2. Propriétés

- Le malaxage et la mise en place de ce béton s'effectuent avec les outils classiques du génie civil.
- Son élévation de température, mesurée au cours d'essais échelle 1 au coeur de blocs de bétons de 20 m³, est faible (21°C) en raison de son faible dosage en ciment.
- Après 90 jours de cure, le pH à l'équilibre d'une solution d'eau déminéralisée en contact avec le béton LHHPC broyé (dans un rapport massique 1/1) est de 10,6. L'expérience réalisée dans des conditions identiques avec un béton de ciment Portland conduirait à un pH supérieur à 13.
- La résistance à la compression du béton LHHPC dépasse 70 MPa à l'échéance de 28 jours : le matériau peut donc être classé dans la catégorie des bétons à hautes performances.
- Le béton LHHPC peut être utilisé dans des constructions de structures massives qui demandent une faible chaleur d'hydratation du matériau tout en gardant la résistance en compression d'un béton à hautes performances standard

IV.2.2. Béton japonais HFSC (high fly ash silica fume cement)

L'Institut japonais de Développement du Cycle Nucléaire (JNC) conduit un programme de formulation et de caractérisation de bétons dont la solution interstitielle présenterait un pH voisin de 11.

IV.2.2.1. Principes de formulation

- Afin de **diminuer le pH** de la solution interstitielle par rapport aux ciments **Portland conventionnels**, une partie du clinker est remplacée par des composés pouzzolaniques ou hydrauliques : fumée de silice, cendres volantes, laitier de haut fourneau [IRI 99].
- Différentes formulations sont testées et après hydratation pendant 28 jours, les matériaux sont broyés et mis en contact avec de l'eau ultrapure (volume d'eau / masse de solide = 40 mL/g). Le pH des solutions est mesuré à l'équilibre.
- Deux liants semblent intéressants car leur pH d'équilibre est proche de 11. Le liant

HSF (30% CEM I à prise rapide – 20% fumée de silice – 50% cendres volantes) et le liant **OSF** (40% CEM I – 20% fumée de silice – 40% cendres volantes).

IV.2.2.2. Propriétés

Les pâtes préparées à partir de ces liants présentent une viscosité un peu supérieure à celle du ciment Portland, une prise plus lente et une chaleur d'hydratation nettement diminuée (de 329 J/g au bout de 7 jours à 176 J/g pour HSF et 230 J/g pour OSF).

Les résistances à 90 jours des deux bétons sont supérieures à 90 MPa. L'élévation de température est réduite par rapport à celle du béton de ciment Portland, mais reste significative en raison du fort dosage en liant

Type de ciment	Etalement (mm)	Air entraîné (%)	Rc à 91 jours (MPa)	Retrait de dessiccation (µm/m)		Élévation de température en conditions adiabatiques (°C)
				28 jours	91 jours	
HSF	73,5	1,4	93,5	387	550	46,3
OSF	72,5	1,3	105,7	377	516	50,2
CEM I	-	-	-	403	588	68,0

Tableau I - 21 : Propriétés du béton auto-plaçant

IV.2.3. Le béton bas pH suédois

L'Institut Suédois de Recherche sur le Ciment et le Béton effectue depuis 1998 des études de formulation et de caractérisation de bétons bas pH pour le compte de SKB (société suédoise de gestion des déchets radioactifs) .

IV.2.3.1. Principes de formulation

Les principes de formulation retenus sont comparables à ceux du béton canadien LHHPC :

- choix d'un ciment Portland faiblement alcalin,
- diminution du dosage en ciment par ajout d'un ultra filler, qui permet également d'améliorer la compacité,
- introduction de la fumée de silice afin de consommer toute la portlandite résultant de l'hydratation du ciment Portland, dosage en eau élevé afin d'hydrater en totalité le liant

- Le liant du béton suédois [HUG 05] est composé de 16,7% de fumée de silice et de 83,3% CEM I.

Les compositions des différents matériaux élaborés sont récapitulées dans le Tableau suivant

IV.4.2.3.2. Propriétés

Les formulations 33 à 37 peuvent être mises en œuvre sans difficulté avec les outils classiques du génie civil, tandis que la formulation 38, la moins dosée en eau, nécessite une bonne efficacité de malaxage.

Malgré un dosage en eau élevé, les bétons présentent une forte résistance à la compression et rentrent dans la catégorie des bétons à hautes performances. Ces résultats inattendus sont attribués à la très forte compacité de l'assemblage granulaire.

Tableau I - 24 : Propriétés des bétons bas pH développés en Suède

Référence	Eau / ciment	Eau / liant	Retrait de dessiccation ($\mu\text{m/m}$)	Résistance à la compression (MPa)
33	0,78	0,65		28 jours : 63,4
34	0,88	0,73		28 jours : 54,5
35	0,98	0,82		28 jours : 44,1
36	0,98	0,82		28 jours : 47,7
37	1,08	0,90		28 jours : 40,5
36F	0,98	0,82	- 290 : 21 jours - 600 : 231 jours	28 jours : 46,6 1 an : 77,8
38F	0,76	0,63	- 240 : 21 jours - 490 : 231 jours	28 jours : 71,1 1 an : 104,4
39F	0,76	0,63		28 jours : 73,8

- un pic de pH lié à la solubilisation des alcalins, qui atteint 11,7, dans le cas où le matériau âgé de 28 jours est introduit sous forme broyée dans de l'eau déminéralisée (volume d'eau / masse de solide = 1,675 L/kg),
- une stabilisation ultérieure, après renouvellement de la solution, à une valeur comprise entre 8,5 et 9,6.