

CHAPITRE IV. Matériaux de construction

IV.1. Béton à Hautes Performances

IV.1.1. Introduction

La résistance à la compression est généralement considérée comme la principale propriété caractéristique du béton. Depuis la découverte du béton, les études ont été axées sur la recherche de méthodes permettant d'améliorer cette caractéristique. Des progrès considérables ont été enregistrés dans ce domaine au cours de ces dernières décennies.

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) ou bien les bétons à hautes résistances ont d'abord été utilisés pour leur haute résistance. Cette caractéristique facilement mesurable a fait des progrès spectaculaires à partir des années quatre-vingt. Elle est passée de 30 à 35 MPa, à plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances, voire plus (150 à 200 MPa pour des bétons fibrés à ultra hautes performances BFUP).

Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté.

Ces bétons sont, en fait, des matériaux à très haute compacité.

IV.1.2. Définition des BHP

Le terme BHP est utilisé dans la littérature pour se référer à une famille de bétons spéciaux, lesquels sont supérieurs au béton conventionnel (classique ou usuel) d'un point de vue une ou plusieurs propriétés telles que l'ouvrabilité, la résistance et la durabilité.

Un béton à hautes performances (BHP) 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, à court ou à long terme.

Hautes performances signifient aussi facilité de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. Les BHP ont une porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et, de façon générale, présentent une durabilité accrue.

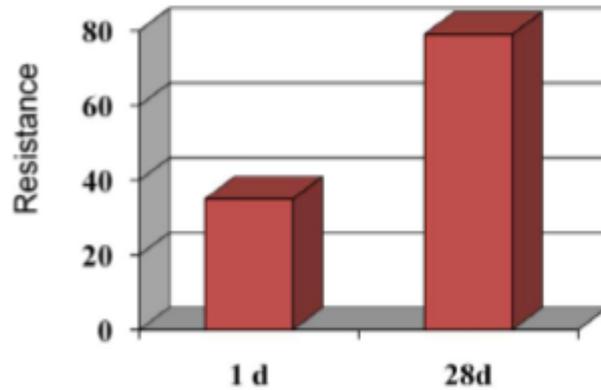


Figure IV.1. Exemple des résistances à la compression des BHP à 1 et 28 jours.

IV.1.3. Origine des BHP

Les bétons à hautes performances ont vu le jour au début des années 1960 dans la région de Chicago (USA). Ils ont été utilisés en quantités non négligeables dans plusieurs structures majeures.

IV.1.4. Exemples d'ouvrages réalisés en BHP à Chicago :

- ❖ Lake Point Tower ($f_c = 53\text{MPa}$) : est un gratte-ciel résidentiel à Chicago, Il mesure 197 m construit en 1965-1968



Figure IV.2. Lake Point Tower.

- ❖ River Plaza ($f_c = 77\text{MPa}$) : est un gratte-ciel de 160 m situé à Chicago, l'achèvement des travaux de gratte-ciel été en 1977.



Figure IV.3. River Plaza.

IV.1.5. Caractéristiques des BHP

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérisent par :

- ❖ Une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre ;
- ❖ Un rapport Eau / Liant inférieur à 0,4.

Ils présentent une structure très dense, une faible porosité et une très bonne résistance à la pénétration d'agents agressifs.

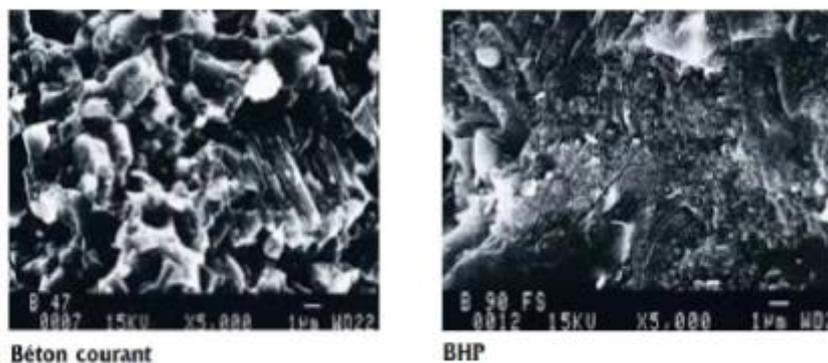


Figure IV.4. Un béton courant et un BHP à l'échelle microscopique (grossissement x 5 000).

- ❖ L'augmentation de la résistance est cependant limitée. À partir d'un rapport eau-ciment trop faible, le béton ne peut plus être mis en œuvre. Les vides et les pores qui en résultent réduisent à nouveau la résistance.

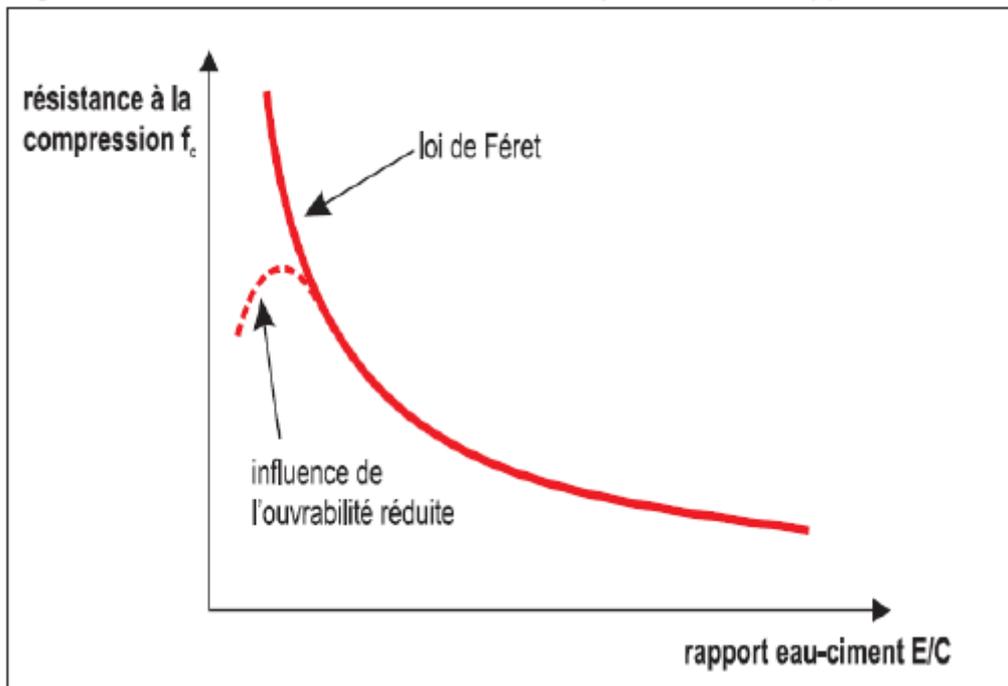


Figure IV.5. Relation entre la résistance à la compression et l'eau de gâchage.

- ❖ Plus le taux d'hydratation augmente, plus le ciment est hydraté, plus la quantité d'eau liée croît et, par conséquent, plus la quantité d'eau libre diminue.

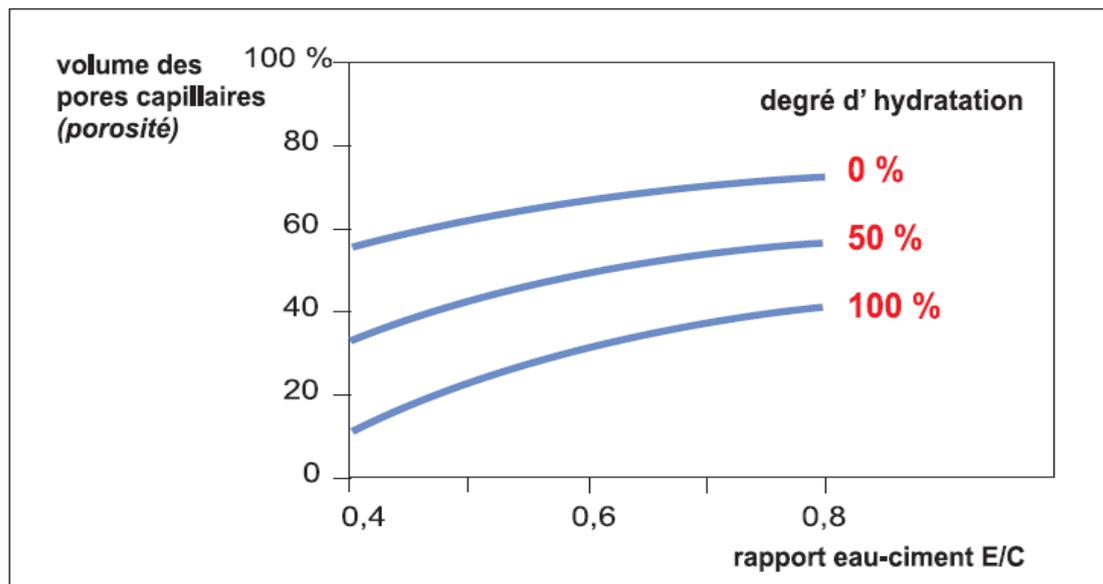


Figure IV.6. Relation entre la porosité et E/C pour différents degrés d'hydratation

IV.1.6. Classification des BHP

Les bétons sont classés, en fonction de la résistance caractéristique, en trois catégories :

- ❖ Les bétons hautes performances (BHP).
- ❖ Les bétons très hautes performances (BTHP).
- ❖ Les bétons exceptionnels (BFUP).

Le tableau suivant illustre ce classement.

Tableau IV.1. Classification des bétons à hautes performances.

	BHP	BTHP	BFUP
Résistance à 28 jours (MPa)	50 ÷ 100	100 ÷ 150	> 150
Emploi	Très fréquemment en bâtiment	Poutres de grande portée ; Immeubles de grande hauteur.	Réservée actuellement aux laboratoires

IV.1.7. Principes de formulation des BHP

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vide. On cherchera donc, pour formuler un BHP, à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire.

La limitation de la porosité implique essentiellement deux conditions :

- ❖ une très faible teneur en eau ;
- ❖ une granulométrie comportant des éléments fins en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.

Deux démarches sont généralement associées pour optimiser la formulation d'un BHP

IV.1.7.1. Défloculation des grains de ciment

L'emploi des super-plastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale.

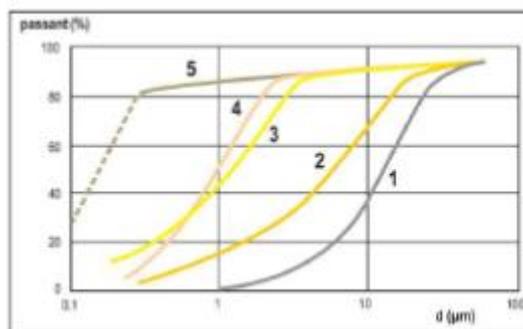
Les rapports Eau/Liant sont de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton usuel (soit une réduction de la teneur en eau de plus de 30 %).

Les super-plastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment, ce qui augmente leur réactivité, facteur en particulier de performances à court terme.

IV.1.7.2. Optimisation du squelette granulaire

Les performances des BHP peuvent encore être optimisées par l'extension du spectre granulaire grâce, en particulier à l'ajout de particules ultrafines. Les ultrafines les plus utilisées sont les fumées de silice. Elles ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les micros vides inter-granulaire.

On adaptera également chaque classe granulaire afin d'obtenir un mélange à très haute compacité (les éléments fins remplissant les espaces entre les plus gros granulats).



1- Ciment 2- Fines calcaires 3- Ultrafines calcaires 4- Ultrafines siliceuses 5- Fumée de silice

Figure IV.7. Granulométrie des matières fines.

IV.1.8. Les constituants des bétons à haute performance BHP

Les constituants du BHP font l'objet des principales spécifications suivantes :

- ❖ **Ciments** : conformes à la norme NF EN 197-1 de types CEM I ou CEM II ou CEM III et de classes de résistance conseillées 42,5 ou 52,5 (N ou R). Le dosage varie généralement de 400 à plus de 600Kg/m³
- ❖ **Granulats** : conformes à la norme NF EN 12620 « Granulats pour bétons » et à la norme XP P 18-545 « Granulats pour bétons hydrauliques », les granulats utilisés pour les BHP ont une taille maximale de 10 à 16mm.
- ❖ **Adjuvants** : plastifiants réducteur d'eau et super-plastifiants haut réducteur d'eau conformes à la norme NF EN 934-2.
- ❖ **Additions** : conformes aux diverses normes en vigueur – cendres, laitiers de haut fourneau, fillers calcaires, filler siliceux, éventuellement ultrafines (fumées de silice).
- ❖ **La fumée de silice** : La fumée de silice est un produit minéral amorphe obtenu essentiellement lors de la fabrication du silicium et de ses alliages. Le silicium est obtenu par réduction du quartz en présence de carbone à 2 000 °C dans des

fours à arc électrique. Les fumées contiennent du monoxyde gazeux (SiO) qui s'oxyde et se condense en particules vitrifiées amorphes extrêmement fines. Ces particules sont lisses et sphériques (100 000 billes de fumées recouvrent entièrement un grain de ciment). Leur couleur est le plus souvent gris clair.

IV.1.9. Propriétés des bétons à haute performance BHP

Les diverses propriétés des BHP découlent de leur faible porosité, gage de durabilité.

IV.1.9. 1. Résistances mécaniques

Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, compte tenu de la rapidité de la cinétique de montée en résistance, et très élevées à long terme (avec une montée en résistance se poursuivant au-delà de 28 jours).

Un BHP de 60 MPa à 28 jours peut offrir des résistances mécaniques de 15 MPa à 24 heures, voire davantage, et 40 MPa à 7 jours. Le gain est aussi important en termes de résistance en traction ou au cisaillement.

IV.1.9. 2. Module d'élasticité

Le module d'élasticité du béton est essentiellement déterminé par les propriétés des granulats et de la matrice de mortier. Au fur et à mesure que la matrice se consolide et se rigidifie, le béton présentera également une rigidité accrue. Le module d'élasticité du béton à hautes performances est dès lors toujours lié à la résistance à la compression. Le module d'élasticité des BHP est supérieur à celui des bétons traditionnels.

IV.1.9. 3. Retrait

Le retrait de dessiccation à l'état durci est plus faible compte tenu du faible dosage en eau. Le retrait endogène (ou d'auto-dessiccation), compte tenu de la finesse de la microstructure et de la forte réduction du rapport E/C, est d'un coefficient plus élevé (150 à 250×10^{-6}) pour un BHP que pour un béton traditionnel (60×10^{-6}).

IV.1.9. 3. Fluage

Les BHP présentent un fluage plus faible que les bétons traditionnels (surtout avec des formulations à base de fumées de silice). La cinétique de fluage propre est très

rapide (le fluage est accéléré et se manifeste dès les jeunes âges du béton) et se stabilise plus vite. Le fluage de dessiccation est très faible.

L'utilisation de BHP avec fumée de silice conduit donc à des réductions de déformations différées et des redistributions d'efforts plus faibles.

IV.1.9. 4. Imperméabilité

Leur faible porosité capillaire confère aux BHP une très faible perméabilité.

La faible perméabilité des BHP leur confère une bonne résistance à la pénétration et au transfert dans la masse du béton des agents agressifs en phase gazeuse ou liquide (eaux de mer, eaux sulfatées, solutions acides, etc.).

IV.1.9. 4. Résistance à la carbonatation

La carbonatation est due à l'action de l'oxyde carbonique CO_2 avec les composants du ciment. Le CO_2 se déplace à travers le réseau capillaire poreux de la matrice cimentaire, le premier composé qui se forme est le CaCO_3 (carbonate de calcium)

D'une manière générale, les bétons haute performance offrent une meilleure résistance à la carbonatation que les bétons ordinaires en raison de leurs très grandes compacités et de leur dense microstructure.

IV.1.9. 5. Résistance au feu

Même si la durabilité du BHP est en règle générale nettement supérieure à celle du béton conventionnel, la résistance au feu est cependant un élément sur lequel il convient d'attirer l'attention. En raison de la structure très dense des pores, la pression de vapeur, qui apparaît à l'intérieur du béton à des températures excédant $100\text{ }^\circ\text{C}$, peut difficilement être réduite. La vapeur ne peut en effet pas être rapidement évacuée à l'extérieur, en raison de la structure très dense du matériau. Par rapport au béton conventionnel, la résistance du béton à haute résistance diminuera dès lors plus rapidement si la température est supérieure à $100\text{ }^\circ\text{C}$.

IV.1.10. Performances des BHP

IV.1.10.1. Des propriétés exceptionnelles à l'état frais

Du fait de la présence de super-plastifiants, le béton à hautes performances est particulièrement aisément manouvrable. Les valeurs d'affaissement au cône sont supérieures à 15 dans la majorité des cas.

Cette fluidité apporte de nombreux avantages :

- garantie d'un bon remplissage des moules et des coffrages et de l'enrobage parfait des armatures ;
- amélioration de l'écoulement du béton,
- cette facilité de mise en œuvre permet la réduction du délai d'exécution de l'ouvrage et gain de productivité,
- exécution de bétonnages complexes dans des conditions d'accès difficiles, comme les pompages sur une grande hauteur.

Le BHP présente aussi :

- une bonne stabilité à l'état frais, ce qui garantit l'absence de ségrégation ;
- une faible viscosité qui autorise le pompage sur de longues distances.

IV.1.10.2. Des performances élevées aux jeunes âges

Les caractéristiques physico-chimiques et la cinétique spécifique de durcissement des BHP, leur confèrent des résistances mécaniques importantes aux jeunes âges (par exemple, 15 MPa à 12 heures ou 30 MPa à 24 heures), ce qui autorise :

- des décintrements et des décoffrages rapides ; l'optimisation des cycles de coffrage/décoffrage et des séquences de production ;
- des délais avant mise en tension des armatures de précontraints raccourcis ;
- la fabrication d'éléments préfabriqués, dans certains cas, sans utilisation de traitement thermique.

Il en résulte une simplification et une approche différente de l'organisation des chantiers, une augmentation de la productivité et des gains significatifs sur les délais de construction des ouvrages.

IV.1.10.3. Des résistances mécaniques importantes à long terme

Les BHP offrent des performances mécaniques élevées à long terme en compression, traction, flexion et cisaillement. Ces performances se traduisent en particulier par :

- une résistance importante aux agents agressifs ;
- un faible risque de corrosion des armatures ;
- une forte résistance aux cycles de gel/dégel ;
- une faible perméabilité ;
- une meilleure adhérence acier/béton ;
- un fluage inférieur à celui des bétons traditionnels ;
- une augmentation du module d'élasticité ;
- Une diminution du poids des structures (à portées équivalentes) ou augmentation des portées (à poids propre équivalent) tout en limitant les déformations ;

Ces gains de performance se traduisent par un coût d'entretien réduit

IV.1.11. Domaines d'utilisation des BHP

L'apparition des bétons haute performance sur le marché permet d'ouvrir de nouvelles perspectives pour le matériau béton, ainsi :

- On peut concevoir des poteaux avec des sections convenables pour les immeubles de grande hauteur (IGH).
- Augmenter considérablement la portée des ponts.
- Construire des immeubles plus durables, plus économiques et surtout plus écologiques.
- Des pièces préfabriquées très courtes, (voussoirs pour pont, etc.) dont le délai de décoffrage est très court ;
- Des ouvrages en milieu marin (digues, plates-formes pétrolières,).
- Les ouvrages de génie nucléaire (centrale nucléaire).

IV.1.12. Exemples de compositions de BHP utilisées pour la réalisation de 2 ponts

Tableau IV.2. Composition utilisé pour fabrication du pont de Joigny en France.

PONT DE JOIGNY (Sans fumée de silice)	
Ciment CEM1 52.5	450 kg
Granulat (6/20)	1027kg
Sable (0/4)	648 kg
Sablon	105 kg
Eau	160 litres
Super plastifiant	11,25 kg
Retardateur	4.5 kg

Tableau IV.3. Composition utilisée pour la construction du pont de Jonche (France).

PONT DE JONCHE (avec fumée de silice)	
Ciment CEM1 52.5	420 kg
Fumée de silice	35 kg
Gravillon (6/10)	250 kg
Gravillon (10/14)	730 kg
Sable (0/4)	660 kg
Sablon	140 kg
Eau	152 litres
Super plastifiant	7.3 kg

IV.1.13. Intérêt des BTHP et BFUP pour les produits préfabriqués en usine

Les Bétons à Très Hautes Performances (BTHP) et les Bétons à Ultra Hautes Performances (BFUP) résultent d'une synthèse des progrès réalisés ces trente dernières années sur l'optimisation du squelette granulaire, l'adjuvantation et l'utilisation des fibres. Concernant la résistance à la compression et selon la définition donnée dans les recommandations de l'AFGC, les BFUP dépassent 150 MPa. Par définition, les performances des BTHP se situent entre celles des Bétons à Hautes Performances (BHP) et celles des BFUP. Les résistances mécaniques des BTHP sont donc comprises entre 100 et 150 MPa. Mais ne retenir que la résistance à la compression comme élément de comparaison serait réducteur. En fait, ces deux familles de nouveaux bétons diffèrent des bétons traditionnels par bien d'autres propriétés telles que leur résistance à la flexion, aux chocs, à l'abrasion, aux agressions chimiques, au gel, plus généralement leur tenue dans le temps, ainsi que leurs caractéristiques esthétiques.

IV.2. Les bétons à bas pH (*Béton peu réactif dans un environnement argileux*)

Le béton à faible chaleur d'hydratation, retrait modéré, ouvrabilité plastique, à haute résistance mécanique, et à faible alcalinité ($\text{pH} \leq 11$) pour le stockage des déchets radioactifs.

Dans un site de stockage argileux en couches géologiques profondes (-500 m de profondeur) où pourraient être entreposés certains *déchets nucléaires*, l'association de matériaux cimentaires classiques (type Portland) dont la solution interstitielle est très basique (pH de 13 à 13,5) et d'argile pourrait *dégrader les propriétés de cette dernière*. (*Les propriétés imperméables de l'argile*) par l'attaque alcaline de l'argile. De plus, l'importante augmentation de température induite par l'hydratation du ciment dans un ouvrage massif pourrait provoquer des *microfissures néfastes à la durabilité du matériau* (retrait).

L'utilisation de ces types de béton permet de limiter la dégradation des propriétés du matériau argileux.

Une alternative consisterait à utiliser des liants dits « *bas pH* » (pH de la solution interstitielle ≤ 11) peu réactifs par rapport à leur environnement. Des pouzzolanes (constituants riches en silice tels que les cendres volantes et la fumée de silice) et du laitier sont ajoutés au ciment Portland pour diminuer le pH de la solution interstitielle du matériau à 11.

L'une des principales préoccupations, dans le contexte d'un scellement mixte (*béton / argile*), est *la dégradation chimique et physique de l'argile* sous l'effet, entre autres, du pH élevé de la solution interstitielle contenue dans les pores d'un matériau cimentaire classique (type Portland).

Des recherches ont donc été engagées pour mettre au point *un liant présentant une meilleure compatibilité avec l'argile*. Une alternative pourrait consister à utiliser des liants dits « *bas pH* » (afin de limiter les perturbations chimiques induites par un fluide alcalin dans des matériaux argileux). L'évolution chimique du béton n'étant contrôlée que par celle de la pâte de ciment dans la mesure où les granulats ne sont pas réactifs.

Pour obtenir un pH de 11, il faut :

- ❖ limiter autant que possible la teneur en alcalins dans la solution interstitielle ;
- ❖ consommer la portlandite ;

- ❖ diminuer le rapport Ca/Si des C-S-H pour que leur pH soit de 11.

Ces conditions peuvent être atteintes en ajoutant au ciment (choisi pour ses faibles teneurs en alcalins) des pouzzolanes (constituants riches en silice). En effet, l'ajout des pouzzolanes à des ciments Portland classiques présente plusieurs avantages :

- ❖ la portlandite, formée lors de l'hydratation du ciment Portland, est convertie en C-S-H

par une réaction pouzzolanique : $\text{Ca(OH)}_2 + x \text{SiO}_2 \rightarrow y \text{C-S-H}$.

- ❖ le rapport Ca/Si des C-S-H diminue, ce qui diminue leur pH d'équilibre et accroît leur capacité de sorption des cations (donc des alcalins).

Donc l'ajout des pouzzolanes diminue le pH de la solution interstitielle.

IV.3. Béton à poudre réactive

IV.3.1. Introduction

La recherche vers des bétons de plus en plus performants se poursuit depuis les années 1980. On trouve dans le monde entier un nombre croissant de réalisations en bétons hautes performances (BHP), puis très hautes performances (BTHP) en particulier généralisées pour les ouvrages d'art, et les bétons de poudre réactive (BPR) ou les bétons à ultra hautes performances (BUHP) qui présentent des propriétés remarquables de performances mécaniques et de durabilité.

Grâce au développement du béton à poudre réactive (BPR), la technologie du béton atteint de nouveaux sommets.

Les caractéristiques mécaniques exceptionnelles de ce matériau offrent en effet de nombreuses possibilités et en font une alternative réelle au bois ou à l'acier pour des applications spécifiques.

IV.3.2. Définition du béton à poudre réactive (BPR)

Les bétons de poudre réactive (BPR) ou les bétons à ultra hautes performances (BUHP) sont apparus en 1995 pour satisfaire aux exigences de résistance tout en conservant une bonne ouvrabilité.

Les bétons à poudre réactives (BPR) constituent une nouvelle famille de matériaux de construction dont la production est similaire à celle des bétons ordinaires. C'est un

matériau cimentaire à matrice à ultra haute performance, est caractérisé par une forte teneur en fumée de silice et par un très faible rapport E/C.

C'est un matériau dont les plus gros granulats, en l'occurrence du sable, ont une dimension maximale d'environ 600 μ m.

Ces bétons permettent de construire autrement, là où les bétons classiques ne répondent plus aux contraintes exigées techniques et/ou architecturales : grands ouvrages, bétons architecturaux, environnements agressifs, respect du paysage, réparation avec contraintes de poids...

Sans nécessiter d'équipement spécifique pour leur fabrication, ils présentent des qualités exceptionnelles :

- Ils ont un caractère auto plaçant,
- Ils permettent parfois des temps d'exécution de chantier plus courts,
- Leurs performances mécaniques autorisent la diminution d'épaisseur et donc du poids des structures, Leur durabilité très importante permet de ne pas envisager de cout d'entretien.

La première application mondiale est la passerelle piétonnière de Sherbrooke réalisée en 1997.



Figure IV.8. Passerelle piétonnière de Sherbrooke réalisée en 1997.

IV.3.2. Principes

- Suppression des gros granulats (hétérogénéité des composants granulaires des bétons usuels).
- Introduction de composants de différentes classes granulaires.
- l'emploi de fibres métalliques de petites dimensions et de haute limite élastique.
- les techniques de fabrication et de mise en place sont celles utilisées pour les bétons traditionnels avec un allongement important du temps de malaxage.
- Application d'une pression sur le BPR pendant sa prise.
- Exposition du matériau à un traitement thermique

En faisant varier:

- le type des constituants ;
- la proportion relative des constituants ;
- le taux de fibres (2 à 2,5 % en volume) ;
- le rapport E/C (eau/ciment).

On obtient une formulation typique du BPR :

Tableau IV.4. Formulation de 1 m³ de BPR

Ciment	Sable	Quartz broyé	Fumées de silice	Fibres métalliques	Adjuvant (extrait sec)	Eau totale
710 kg	1 020 kg	215 kg	230 kg	160 kg	10 kg	140 L

- Sans traitement thermique, les propriétés évoluent au fur et à mesure de l'avancement de l'hydratation du ciment.
- Après traitement thermique, les propriétés du matériau sont stables dans le temps et peuvent être caractérisées par une valeur unique.

IV.3.3. Propriétés mécanique

Sans traitement, la résistance moyenne en compression atteint 180 MPa à 28 jours. Après traitement, elle atteint plus de 200 MPa dès l'âge de 4 jours.

En appliquant en plus une pression sur le BPR pendant sa prise, sa résistance à la compression peut alors atteindre 350 MPa.

IV.3.4. Durabilité du BPR

IV.3.4.1. Porosité

Le BPR présente une absence totale de porosité capillaire, celle qui est à l'origine des principaux mécanismes de diffusion dans les matériaux à matrice cimentaire.

IV.3.4.2. Perméabilité

La très faible porosité et l'absence d'eau libre dans les pores capillaires ont pour conséquence directe de résister au gel-dégel et de résister à l'abrasion.

Le BPR est plus résistant au gel-dégel qu'un BHP à air entraîné spécialement formulé à cet effet, et trois fois plus résistant à l'abrasion qu'un béton classique

IV.3.5. Génie civil et bâtiment

Exemple de Passerelle de Seonyu à Séoul

Elle est constituée d'une seule travée de 120 mètres de long et de 4,3 mètres de large, avec un tablier dont l'épaisseur ne dépasse pas 3cm. La résistance est de l'ordre de 300 MPa



Figure IV.9. Passerelle de Seonyu à Séoul

IV.4. Les coulis d'injection

Le coulis est un mélange d'eau, de ciment, d'adjuvants et parfois de granulats fins. On s'en sert dans les cavités étroites comme les fissures dans la roche ou les trous afin de les combler et de consolider deux objets adjacents pour former une masse.

Coulis de ciment pré formulé à base de ciments spéciaux sélectionnés et de poudre minérale active.

- Hyper fluide ;
- Prêt à l'emploi, ne demande que l'ajout d'eau ;
- Très fine granulométrie ;
- Excellente adhérence aux supports sains ;
- Mise en place par pompage ou gravitairement ;
- Consistance adaptable à l'utilisation ;
- Pompable sur grande distance.

Le rôle du coulis d'injection est essentiel lorsqu'il s'agit de protéger des maçonneries qui comportent des fissures ou une désagrégation des mortiers de montage par exemple. Il permet de consolider ces maçonneries existantes qu'il est souvent difficile de remplacer ou de traiter.

Le choix du mortier à préparer s'effectue en fonction de la dureté du matériau à traiter.

Dans ce cas précis de restauration du bâti ancien, on utilisera de préférence un mortier de chaux, afin de préserver durablement le mur et les matériaux qui le constituent. La résistance n'est pas le phénomène recherché pour la consolidation des supports et la correction des désordres structurels énoncés.

IV.4. 1. Domaines d'utilisation

- Destiné aux scellements d'ancrage ;
- Renforcement mécanique ;
- Injections dans le béton ;
- Consolidation de sols (cette technique permet d'améliorer la résistance mécanique, la cohésion et diminuer la perméabilité d'un terrain). Elle permet aussi de consolider les *fondations d'ouvrages* mitoyens qui peuvent être *déstabilisées* par l'excavation d'une fouille à proximité ;
- L'étanchement (l'objectif est de créer des écrans (verticaux ou horizontaux), *limitant les circulations d'eau dans le terrain* (par exemple : écran étanche sous un barrage)) ;
- Remplissage de cavités (à combler les vides naturelles du terrain ou artificielles telles des vides annulaires, comblement de fissures dans des supports anciens) ;
- La compensation (la compensation permet, lors du creusement par exemple de tunnels, en injectant le sol situé sur l'ouvrage, *de limiter et de compenser les tassements résultant du dé-confinement du terrain*). *On distingue trois modes d'injection :*
- l'injection par *imprégnation des vides* existants par un coulis fluide ;
- l'injection *sous pression* qui provoque l'ouverture des fissures dans lesquelles se place le coulis ;
- l'injection *par serrage* d'un coulis épais.

IV.4. 2. Préparation des supports

Avant application du produit sur le support, on veillera à ce que celui-ci soit parfaitement propre, sans parties friables non gras, exempt d'huile, de graisse ou autre salissure qui nuisent à un bon accrochage.

Les méthodes pour y parvenir peuvent être le bouchardage, fraisage, piquage ou toute autre méthode suffisamment efficace pour atteindre une valeur d'adhérence $>$ à 1 MPa en moyenne.

Ainsi préparé, le support sera abondamment pré-mouillé jusqu'à saturation. Eventuellement chasser les flaques d'eau résiduelles.

Si malgré tout, le support devait rester douteux, une barbotine d'accrochage serait indispensable.

IV.4. 3. Préparation du mélange

Introduire les $2/3$ de l'eau de malaxage dans le malaxeur (de préférence un malaxeur puissant à effet dispersant). Verser la poudre en pluie.

Malaxer pour obtenir un mélange homogène.

Compléter avec l'eau restante pour obtenir la consistance désirée (ne jamais dépasser le dosage prescrit).

Le malaxage doit durer 3 à 5 minutes (en fonction de la puissance du malaxeur).

Maintenir le mélange en mouvement dans la cuve et protéger celle-ci de l'échauffement dû au soleil.

IV.4. 3. Mise en œuvre

Tout produit qui commence à durcir, ne doit plus être utilisé.

Le produit peut être coulé, pompé, appliqué manuellement ou à la machine.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Teneur en eau	8 l/20 kg	10 l/20 kg
Début de prise	4h30	5h55
Fin de prise	4h50	6h15

Teneur en eau	8 l/20 kg	10 l/20 kg
Exsudation après 3 h (%)	1,33	3,33
Exsudation après 24 h (%)	0	0
Variation de volume (%)	-1,33	-3,33
Masse volumique à l'état durci (g/cm ³)	1,89	-1,79
Rendement (kg de poudre /m ³ de coulis)	1340	1160

Résistances (N/mm ²)		Teneur en eau (l/20kg)				
		8	8,5	9	9,5	10
En flexion	24 heures	4,7	5,7	4,2	4,4	3,9
	7 jours	7,9	8,3	7,6	7,3	5,8
	28 jours	9,4	8,9	8,0	8,1	6,7
En compression	24 heures	18,3	16,0	12,4	11,2	8,9
	7 jours	37,4	33,1	28,9	26,0	23,8
	28 jours	43,5	38,2	33,3	30,3	26,6

* Temps de prise mesuré selon la norme EN 480-2(aiguille de vicat) Essais réalisés à 23 ±2°C.

** Mesures effectuées selon la norme EN 445.

*** Résistances mesurées sur prisme 4X4X16 selon la norme EN 196-1 (conservation sous eau).

IV.4. 4. Les différents coulis

Tout d'abord, les coulis se divisent en deux grandes catégories :

- **Coulis cimentaires** : les coulis cimentaires sont vendus en poudre et doivent être préparés sur place. Ce sont des coulis très poreux nécessitant l'application de scellant. Il existe deux types de coulis cimentaires : avec sable et sans sable. le coulis avec sable contient du ciment, du sable, des adjuvants et de l'eau alors que le coulis sans sable contient uniquement du ciment, des adjuvants et de l'eau.

Le coulis avec sable sert généralement à remplir les vides tandis que le coulis sans sable sert au remplissage autour des pieux, des ancrages et des câbles de post-tension..

- **Coulis non cimentaire (de résines réactives)** : dans cette catégorie, on regroupe les coulis pré-mélangés, les coulis époxy et coulis constitués d'autres résines

IV.4.5. La projection

Fabriqués sur chantier, ou plus généralement préposés, les mortiers projetés comportent, outre le liant et le sable habituels, des adjuvants spécifiques améliorant

l'adhérence, des charges (silice, carbonate, etc.), et parfois des fibres (verre, polypropylène ou acier).

Projeté à l'aide de machines le plus souvent à air comprimé, le mortier est plus compact, adhère mieux au support et se prête bien à son application sur des parties d'ouvrages difficiles d'accès et de forme irrégulière. La suppression de manipulations délicates et pénibles, ainsi que les gains de productivité, expliquent le succès du mortier projeté dans de nombreuses applications :

- enduits monocouches, enduits isolants ;
- revêtements de voûtes, en galeries, consolidation de talus ;
- travaux de réparation, etc.