

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de : Génie Civil & Hydraulique

Polycopié de cours

BETONS INNOVANTS 1

Destiné aux étudiants en Master 1 Matériaux en Génie Civil



Elaboré par : Dr KECHKAR Chiraz

Année 2021

Avant-propos

Ce document est un développement du cours « bétons innovants 1 » qui a comme objectif de concevoir des matériaux innovants pour des applications ciblées de génie civil et la mise en perspective d'un matériau aux propriétés très variées définies à priori dans le cadre d'un projet de construction.

Comme un support pédagogique, Il est destiné particulièrement, aux étudiants de la 1ere année master « semestre 2 » option matériaux en génie civil. Le polycopié est rédigé en respectant le programme élaboré par le ministère Algérien de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, il est composé de six chapitres.

Certes, que les bétons innovants est un sujet très vaste. Seuls sont donc retenus les points importants, sans entrer dans trop de détails. Pour une meilleure compréhension, un langage scientifique assez simple a été utilisé.

Dr. KECHKAR C.

Table de matière

Avant-propos	1
Table de matière	
Introduction générale	1

CHAPITRE 1. PROPRIETES ET PERFORMANCES DES MATERIAUX

1. <i>Introduction</i>	3
2. <i>Propriétés du béton à l'état frais</i>	3
2.1. <i>Ouvrabilité</i>	3
2.2. <i>Air occlus</i>	5
3. <i>Propriétés du béton à l'état durci</i>	5
3.1. <i>Les propriétés mécaniques</i>	5
a) <i>Résistance mécanique</i>	5
b) <i>Déformations sous charge instantanée : module d'élasticité</i>	5
c) <i>Déformations sous charge de longue durée : le fluage</i>	6
3.2. <i>Les propriétés physiques</i>	6
a) <i>Masse volumique du béton durci</i>	6
b) <i>La porosité</i>	6
c) <i>Retrait</i>	6
d) <i>Dilatation</i>	7
3.3. <i>Les propriétés chimiques</i>	7
a) <i>La corrosion</i>	7
- <i>Gonflement du au sulfate</i>	7
- <i>Réaction alcalis-granulats</i>	8
- <i>Carbonatation</i>	8

CHAPITRE 2. BÉTONS A HAUTE PERFORMRMANCE

1. <i>Introduction</i>	10
2. <i>Définition des BHP</i>	10
3. <i>Origine des BHP</i>	11
4. <i>Caractéristiques des BHP</i>	12
5. <i>Classification des BHP</i>	13

6. Principes de formulation des BHP.....	13
- Défloculation des grains de ciment	13
- Optimisation du squelette granulaire	14
7. Les constituants des bétons à haute performance BHP	14
8. Propriétés des bétons à haute performance BHP	15
a) Résistances mécaniques	15
b) Module d'élasticité	15
c) Retrait	15
d) Fluage.....	16
e) Imperméabilité.....	16
f) Résistance à la carbonatation.....	17
g) Résistance au feu	17
9. Performances des BHP	17
- Des propriétés exceptionnelles à l'état frais	17
- Des performances élevées aux jeunes âges	18
- Des résistances mécaniques importantes à long terme	18
10. Domaines d'utilisation des BHP.....	19

CHAPITRE 3. BETONS AUTOPLAÇANTS

1. Introduction	20
2. Définition du béton Auto-plaçant	20
3. Les avantages des bétons auto-plaçant	20
4. Domaines d'utilisation privilégiés des BAP	21
5. Le béton auto-plaçant tant que matériau	21
6. Principes de formulation des BAP	22
7. Les principaux constituants des BAP	22
a) Matériaux de base	22
b) Additions minérales	23
c) Adjuvants chimiques	23
8. Pratique actuelle de la formulation.....	24
9. Caractérisations des BAP à l'état frais	25
a. Détermination de la consistance (Slump flow)	26
b. Détermination du risque de blocage à l'aide de la L-Box	27
c. Détermination de la vitesse d'écoulement à l'aide du V-Funnel	28
d. Détermination de la résistance à la ségrégation par l'évaluation de la stabilité au tamis	29
10. Caractérisation des BAP à l'état durci	30
a) La résistance mécanique	30
b) Le module élastique	31
c) Durabilité	31

11. Fabrication des BAP	31
12. Transport des BAP	31
13. La mise en place des BAP	32

CHAPITRE 4. BETON DE FIBRES

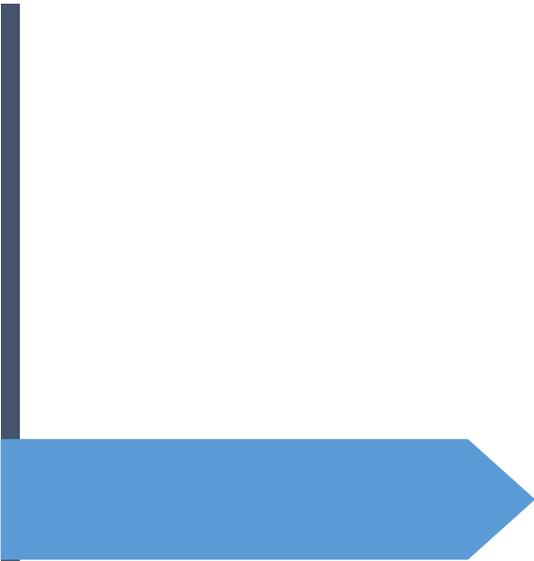
1. Introduction.....	33
2. Définition du béton de fibres	33
3. Définition des fibres	34
4. Caractéristiques et propriétés des fibres	34
5. Utilisation des fibres dans le béton	34
5.1. Amélioration des caractéristiques mécaniques	34
5.2. Contrôle de la fissuration de retrait	35
6. Composition du béton fibré	35
7. Les avantages et inconvénients du béton fibré	36
8. Les types des fibres	36
8.1. Fibres d'acier	37
8.2. Les fibres de verre	38
8.3. Fibres de polypropylène	39

CHAPITRE 5. BETON A POUVRE REACTIVE

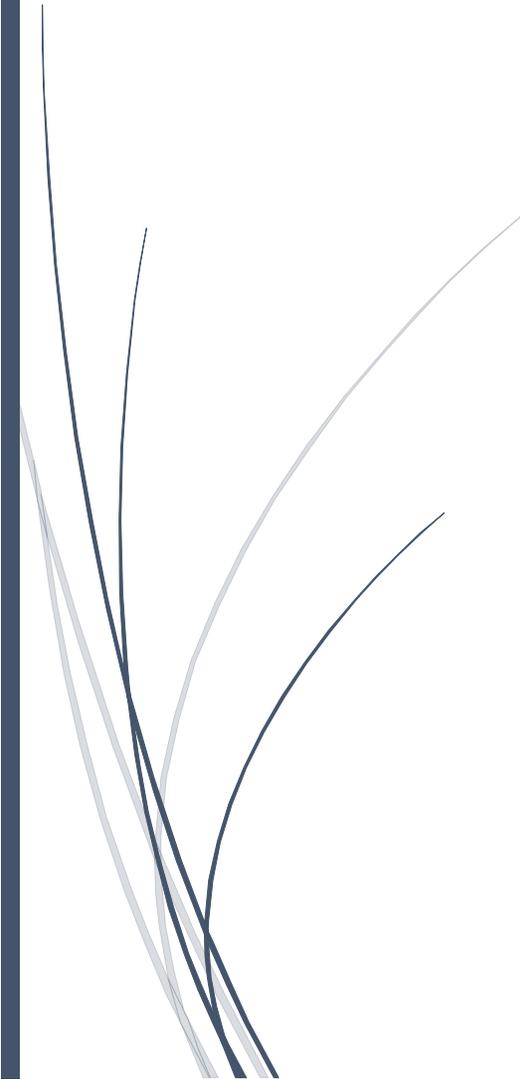
1. Introduction.....	41
2. Définition du béton à poudre réactive BPR	41
3. Les constituants du BPR	42
3.1. Le ciment	42
3.2. Granulats	42
3.3. Rapport Eau / Liant	43
4. Principes de formulation	44
5. Les avantages et les inconvénients de BPR	45
6. Propriétés mécaniques du BPR	45
6.1. Résistance en compression	45
6.2. Résistance en traction directe	46
7. Durabilité du BPR	46
7.1. Porosité	47
7.2. Carbonatation	47
8. Conception des structures en BPR	48
9. Fabrication et mise en œuvre	48
9.1. Réception et stockage des composants	48
9.2. Études préalables	48
10. Applications	49

CHAPITRE 6. BETON A BASE DE POLYMERES

1. Introduction.....	51
2. Définition du béton polymère	51
3. Définition d'un polymère	52
4. Classification des polymères selon les propriétés	52
5. La composition principale d'un béton polymère	53
a) Le liant (la résine)	53
b) Les granulats	53
6. Caractéristiques intrinsèques du béton polymère	53
6.1. Caractéristiques mécaniques	53
6.2. Physiques et chimiques	54
7. Avantages et les inconvénients du Béton Polymère	54
8. Les différentes applications d'un béton polymère	55
8.1. L'utilisation des bétons polymère dans les bâtiments domaine de génie civil	55
8.2. L'utilisation des bétons polymère dans l'horticulture	56
8.3. L'utilisation des bétons polymère pour les revêtements des chaussés et planchers	56
8.4. L'utilisation des bétons polymère dans les travaux de drainage et hydrauliques	57
8.5. L'utilisation des bétons polymère dans l'industrie.....	57
Références	58



INTRODUCTION GENERALE



Introduction générale

De tout temps l'architecture a été le reflet de la culture d'une société, le témoin du progrès technique d'une époque et le savoir-faire de l'homme traduisant ses besoins et ses aspirations soit par les types, les hauteurs ou les formes complexes de la construction. Pour répondre à ses besoins l'apparition d'un matériau qui est considéré comme l'un des plus utilisés dans le monde entier (le béton).

A travers l'histoire, le béton ordinaire n'a pas pu répondre aux nouvelles exigences structurelles (traction,) d'où plusieurs étapes importantes ont contribué à améliorer cet aspect parmi lesquels l'introduction des barres d'acier. Plus tard, ils ont conçu le béton précontraint qui va s'opposer plus efficacement aux contraintes de traction appliquée à l'ouvrage. Mais ceci n'empêche pas d'éliminer les problèmes rencontrés au cours de la construction (poids lourd, faible résistance à la traction, fragilité du béton,.....) ce qui incite les chercheurs à introduire des nouveaux éléments pour répondre à ces exigences.

Ces dernières années, les bétons ont connu, une évolution technologique considérable. La compréhension des phénomènes physiques, chimiques et physico-chimiques qui sous-tendent le comportement du béton, les évolutions de la chimie minérale et organique en particulier ont permis des avancées spectaculaires en matière de formulation, de maîtrise de la rhéologie des bétons à l'état frais et de durabilité des bétons à l'état durci.

Les nouveaux bétons offrent des résistances mécaniques exceptionnelles, répondent à tous les enjeux actuels en matière de mise en œuvre, de sécurité, de santé, de confort et d'esthétique, en alliant compétitivité économique, durabilité, et respect de l'environnement. Bien que des travaux antérieurs aient pu mettre en évidence leurs avantages et leurs limites intrinsèques, des études sont toujours en continuelle augmentation.

Le cours *BETONS INNOVANTS 1* portera sur l'identification et formulation de ces nouveaux bétons avec leurs différentes caractéristiques, leurs avantages, inconvénients et leurs domaines d'utilisation. Il est constitué de six chapitres :

Chapitre 1 : *Propriétés et performances des matériaux.*

Chapitre 2 : *Béton à hautes performances.*

Chapitre 3 : *Béton autoplaçant.*

Chapitre 4 : *Béton de fibres.*

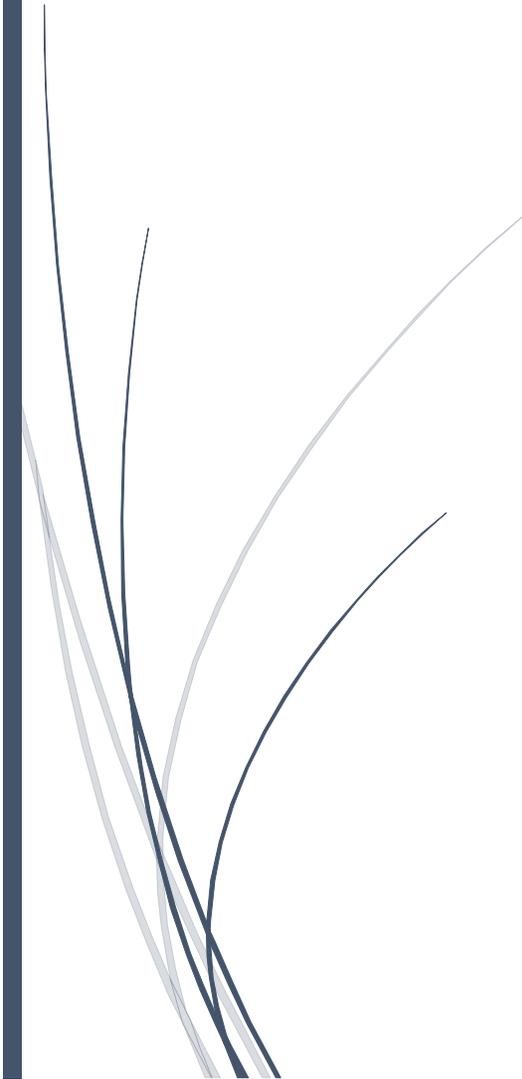
Chapitre 5 : *Béton à poudre réactive.*

Chapitre 6 : *Béton à base de polymères.*



CHAPITRE 1

**PROPRIETES ET
PERFORMANCES DES
MATERAUX**



CHAPITRE 1 : PROPRIETES ET PERFORMANCES DES MATERIAUX

1. Introduction :

De nos jours, le béton fait partie de notre cadre de vie, c'est l'un des matériaux de construction le plus utilisé dans le monde. Il est présent dans tous les secteurs de la construction : bâtiments, ouvrages d'art, monuments et éventuellement dans les éléments de décoration...Il permet également la réalisation de produits de préfabrication, d'éléments de structures et autres ; tels que : tuyaux, blocs, poutrelles, pavés, planchers, cloisons, ...

Ses qualités et ses performances répondent aux différents besoins en matière de bâtiments et de génie civil en respectant les exigences de sécurité, d'esthétique et de durabilité.

Le béton est un matériau minéral obtenu en mélangeant du ciment, de l'eau et des granulats. Il a un comportement évolutif : il est d'abord fluide ce qui lui permet de prendre toutes les formes possibles, puis progressivement il devient dur et très résistant. C'est un matériau qui paraît rustique et simple mais qui est en réalité très complexe et possède de multiples qualités. Il est associé à d'autres matériaux, de l'acier sous forme d'armatures passives ou de précontraintes ou des fibres.

2. Propriétés du béton à l'état frais :

2.1. Ouvrabilité

Le béton étant un matériau moulable, il doit présenter, à l'état frais, des caractéristiques lui permettant de bien remplir les coffrages et de bien enrober les armatures. Cette aptitude est appelée ouvrabilité. Elle est qualifiée par la mesure de la consistance. Dans la pratique, un béton est considéré comme ayant une ouvrabilité correcte, s'il présente une consistance adéquate pour les conditions de mise en œuvre considérées. La consistance et son maintien éventuel dans le temps constituent donc les paramètres essentiels à mesurer sur le béton à l'état frais : une consistance non conforme aux conditions de mise en œuvre ne peut en effet que conduire à la présence de vides, de nids de cailloux, ou encore de phénomènes de ségrégation, altérant les caractéristiques visées du béton, à l'état durci, et par voie de conséquence à sa durabilité.

Il existe un grand nombre d'appareils de mesure de l'ouvrabilité du béton reposant sur des principes différents. Parmi lesquelles on a :

- Le maniabilimètre du LCPC,
- L'étalement à la table à chocs,
- L'affaissement au cône d'Abrams : Cet essai est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre.

Cet essai est réalisé à l'aide d'un tronc de cône en acier galvanisé de 10 et 20 cm de diamètres intérieurs sur une hauteur de 30 cm, d'une plaque en acier à la surface dure et non absorbante et d'une tige d'acier de 16 mm diamètre dont l'extrémité est arrondie.

Le cône est placé sur la plaque (figure I.1) puis rempli en trois couches de béton frais. Chaque couche est piquée 25 fois à l'aide de la tige. La tige doit être enfoncée jusqu'aux couches précédentes afin de correctement lier les différentes strates.

Une fois le cône entièrement rempli et après avoir été arasé (figure I.1) il est levé doucement, verticalement avec une légère rotation pour obtenir le démoulage. L'affaissement du béton peut ensuite être mesuré.

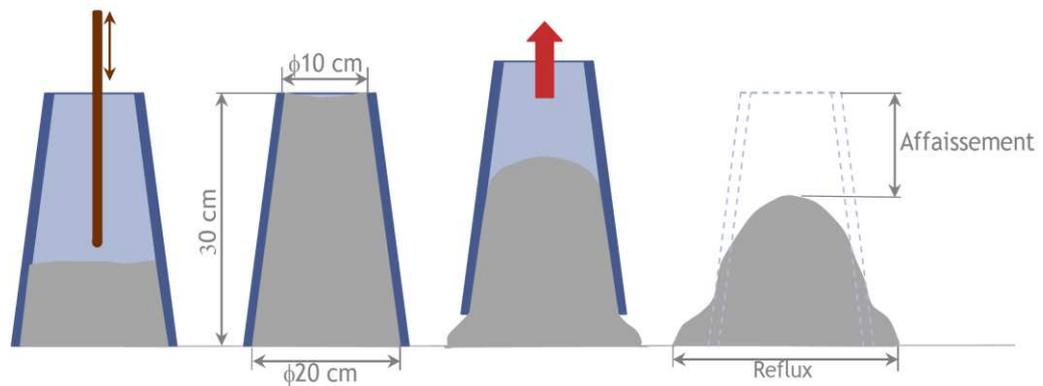


Figure I.1. Schéma d'une mesure au cône d'Abrams.

Selon la valeur de l'affaissement, le béton peut être classé en 05 classes de consistance :

Tableau I.1. Classement des bétons selon la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams – norme NF EN 206-1

Classe	Consistance du béton	Affaissement (mm)
S1	Ferme	10 – 40
S2	Plastique	50 – 90
S3	Très plastique	100 – 150
S4	Fluide	160 – 210
S5	Très fluide	≥ 220

2.2. Air occlus

Le béton frais contient toujours des pores d'air, même après un compactage minutieux. Un béton avec un diamètre maximal du granulat de 32 mm et une consistance plastique possède normalement 1 à 2 % de son volume de pores. Pour du béton compacté et confectionné avec des granulats courants ou relativement denses, jusqu'à un diamètre maximal de 63 mm, la méthode de mesure de la teneur en air est la méthode du manomètre (figure I.2). Pour les bétons avec un granulat léger, on doit choisir une autre méthode de mesure.



Figure I.2. Le manomètre.

3. Propriétés du béton à l'état durci :

3.1. Les propriétés mécaniques

a) Résistance mécanique :

Une bonne résistance à la compression est la performance bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette résistance est généralement caractérisée par la valeur mesurée à vingt-huit jours sur des éprouvettes cylindriques 16x32cm (16cm de diamètre et 32cm de hauteur). La résistance du béton dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier le type et le dosage du ciment, la porosité du béton et le facteur E/C (rapport du dosage en eau au dosage en ciment).

Le Béton présente une excellente résistance à la compression, mais une faible résistance à la traction, et donc aussi à la flexion a peu près 1/10 de sa valeur de compression.

b) Déformations sous charge instantanée : module d'élasticité

Comme tous les autres matériaux, le béton a un comportement élastique linéaire pour des charges modérées de courte durée, c'est-à-dire que ses déformations sont proportionnelles aux charges appliquées. Le module d'élasticité instantané E_i au jour j d'un béton courant est lié à sa résistance en compression au même âge par une relation empirique telle que :

$$E_i = 11000 \sqrt[3]{R_{cj}} \quad (\text{en MPa}) \quad [\text{I.1}]$$

R_{cj} = résistance à la compression au jour J (en MPa).

Pour un béton ordinaire, E_i est le plus souvent compris entre 30000 et 35000 MPa.

c) Déformations sous charge de longue durée : le fluage

La déformation instantanée qu'il subit au moment de l'application de la charge est suivie d'une déformation lente ou différée qui se stabilise après quelques années. C'est ce que l'on appelle le fluage.

Le fluage est pratiquement complet au bout de 3 ans. Au bout d'un mois, les 40 % de la déformation de fluage sont effectués et au bout de six mois, les 80%.

Estimation de la déformation de fluage : $\Delta l = 4$ à 5 ‰ longueur.

Cette déformation varie surtout avec la contrainte moyenne permanente imposée aux matériaux.

3.2. Les propriétés physiques

a) Masse volumique du béton durci

La masse volumique d'un béton ordinaire utilisé dans les chaussées, les bâtiments et autres structures usuelles est comprise entre 2240 à 2500 kg/m³. Elle dépend de la quantité et de la densité des matériaux, des quantités d'air emprisonné et entraîné.

On rencontre aussi des bétons de masse volumique différente :

- Béton lourd d'une masse volumique apparente supérieure à 2.6 t/m³
- Béton léger de masse volumique apparente inférieure à 2 t/m³.

b) La porosité

Une caractéristique essentielle du béton durci est sa porosité (rapport du volume des vides au volume total). Les études de Féret (début du XXe siècle) avaient déjà établi le lien entre la porosité du béton et sa résistance. L'importance de cette caractéristique sur la résistance du béton aux agents agressifs, sur la carbonatation et sur la tenue au gel a été démontrée depuis. C'est donc un facteur déterminant de la durabilité du béton.

c) Retrait

C'est la diminution de longueur d'un élément de béton. On l'assimile à l'effet d'un abaissement de la température qui entraîne un raccourcissement.

C'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment, on peut l'assimiler à l'effet d'un abaissement de température entraînant un raccourcissement.

Selon le BAEL 91 et en fonction des conditions climatiques, les valeurs moyennes de retrait en mm/m sont :

- $1,5 \times 10^{-4}$ dans mes climats très humides,
- 2×10^{-4} en climat humide,
- 3×10^{-4} en climat tempéré sec,
- 4×10^{-4} en climat chaud et se ,
- 5×10^{-4} en climat très sec ou désertique.

Le durcissement sous l'eau diminue beaucoup les effets de retrait. C'est pourquoi il convient de tenir les pièces humides en les arrosant pendant leur durcissement (cure du béton) à une époque où le béton très jeune n'a encore qu'une faible résistance en traction et se fissurerait facilement sous l'effet du retrait.

d) Dilatation

On admet, en moyenne, un coefficient thermique de 1×10^{-5} . Ce coefficient est assez difficile à préciser ; il dépend en particulier de la nature et de la grosseur du granulat ainsi que des qualités propres du béton ; il pourrait aller, d'après certains, de $0,6 \times 10^{-5}$ à $1,4 \times 10^{-5}$ par °C.

En prenant comme coefficient de dilatation 1×10^{-5} .

3.3. Les propriétés chimiques

a) La corrosion :

Les principaux phénomènes entraînant la dégradation des bétons sont :

- Gonflement dû au sulfate

Les eaux souterraines contiennent parfois des sulfates en solution (les eaux séléniteuses contiennent du sulfate de calcium); un gonflement peut alors être occasionné. Si la teneur en sulfate atteint une certaine concentration ; l'aluminate tricalcique et le sulfate de calcium se combinent pour donner un trisulfate « étringite » hydraté qui constitue un sel gonflant par suite de fixation d'un grand nombre de molécules d'eau.

Les ciments qui résistent le mieux aux sulfates sont donc ceux qui contiennent peu d'aluminate tricalcique comme le CPJ-CEMIII/A et B ainsi que les ciments très chargés en laitier (CHF-CEM III/B, CLK-CEM III/C ...)

A remarquer qu'on ajoute au clinker, du gypse qui n'est autre que du sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) dans le but de régulariser la prise du ciment en la retardant, mais la réaction gonflante se produit alors au sein du béton qui est encore plastique, ce qui n'a pas d'effet destructif par désagrégation comme dans le cas où l'eau séléniteuse s'attaque à un béton déjà durci.

- Réaction alcalis-granulats

Dans les granulats, certains constituants amorphes et mal cristallisés de la silice (SiO_2) sont sensibles aux alcalis et peuvent en présence d'humidité réagir avec un hydroxyde alcalin provenant du ciment (NaOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Il se forme des silicates alcalins hydratés plus volumineux entraînant la désagrégation du béton en présence d'humidité, qui se traduit par des fissurations, du faïençage à mailles plus ou moins serrés, des gonflements provoquant des déformations éventuelles parfois très importantes de la structure, des écaillages, des exsudations, des cratères superficiels.

Ces désordres qui certes n'apparaissent pas tous, peuvent dans certains cas entraîner à plus ou moins longue échéance la ruine totale de l'ouvrage. Sont en particulier sensibles à ce phénomène, les granulats contenant de l'opale (une silice hydratée) ; cette réaction alcaline se produit également avec les granulats contenant de la dolomie ou du mica. Ces phénomènes qui jusque vers les années 1970 avaient été remarqués surtout en Amérique du Nord ou au Moyen-Orient.

Donc, il est indispensable, lors de l'emploi de granulats extraits de carrières nouvelles pour lesquelles il n'existe pas de références solides, de procéder à des études sur le gisement, afin de s'assurer que le risque d'alcali-réaction est nul.

- Carbonatation

La carbonatation du béton est due à l'action de l'acide carbonique CO_2 (dioxyde de carbone) qui se trouve dans l'atmosphère (en faible quantité environ 0,5%) sur la chaux libérée par l'hydratation des carbonates de calcium CaCO_3 .

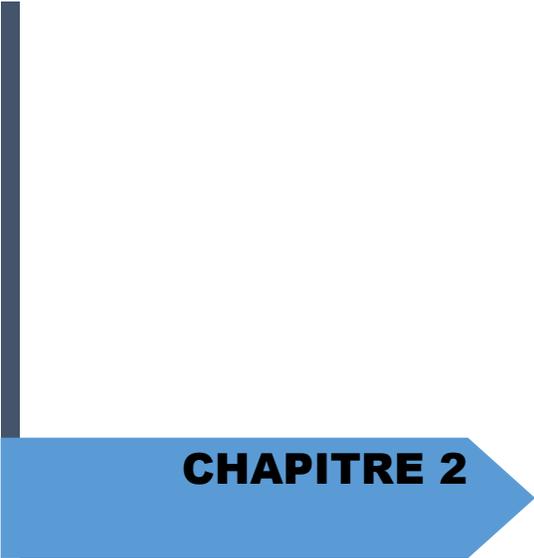


Cette carbonatation qui progresse dans le béton à partir des faces en contact avec l'atmosphère fait baisser le PH du béton (de l'ordre de 13) à des valeurs très inférieures (11,5 à 9), neutralisant ainsi progressivement du béton et son rôle « passivant » sur les armatures qui, n'étant plus protégées, se corrodent.

Lorsque le front de carbonatation atteint l'armature métallique, celle-ci est atteinte de rouille qui fait augmenter le volume de l'acier, conduisant à l'éclatement du béton d'enrobage, ce qui provoque des délaminations, ou comme ici des épaufrures qui mettent à nu les armatures oxydées.

La vitesse de carbonatation dépend de plusieurs facteurs :

- Humidité ambiante ;
- Température ;
- Compacité du béton ;
- Concentration de CO₂ dans l'environnement.



CHAPITRE 2

**BETON A HAUTES
PERFORMANCES**

CHAPITRE 2 : BÉTON A HAUTES PERFORMANCES

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.

2. Définition des BHP

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.

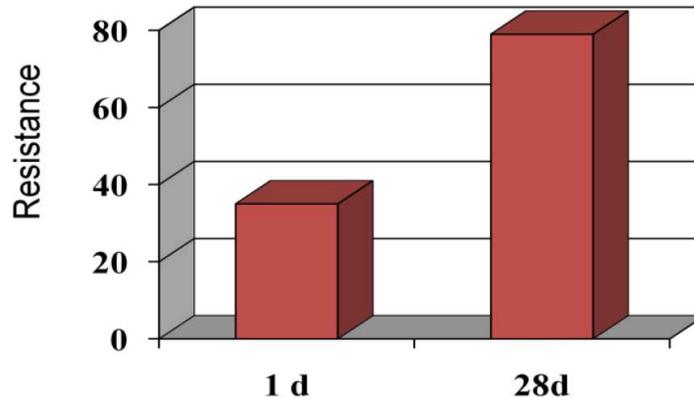


Figure II.1. Exemple des résistances à la compression des BHP à 1 et 28 jours.

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.

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 II.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.



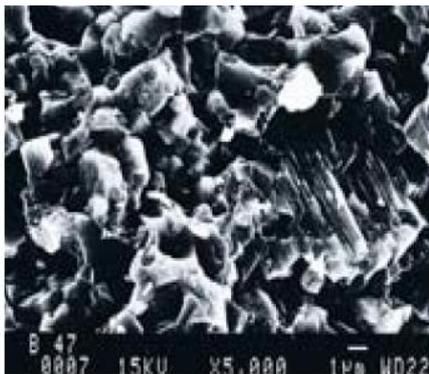
Figure II.3. River Plaza.

4. 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.



Béton courant



BHP

Figure II.4. Un béton courant et un BHP à l'échelle microscopique (grossissement $\times 5\,000$).

5. 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 II.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

6. 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 :

- **Défloculation des grains de ciment**

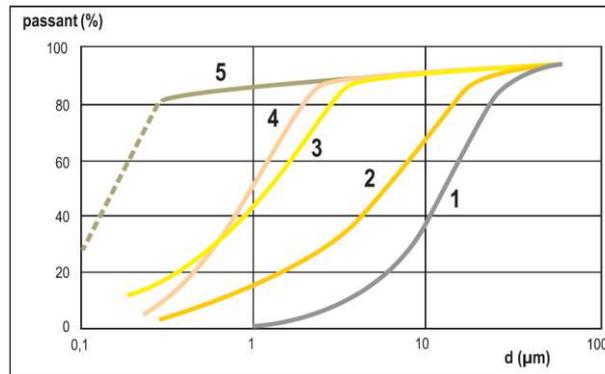
L'emploi des super-plastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale. Les rapports Eau/Liant sont de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton usuel (soit une réduction de la teneur en eau de plus de 30 %).

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.

- 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 II.5. *Granulométrie des matières fines.*

7. 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.

8. Propriétés des bétons à haute performance BHP

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

a. 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.

b. 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.

c. 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}).

Tableau II.2. Retrait de dessiccation et retrait endogène en fonction de f_{ck} et de l'humidité relative (HR) suivant la norme EN 1992-1-1 :2004.

f_{ck}		20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
Retrait endogène (10^{-6})		25	38	50	63	75	88	100	113	125	150	175	200
HR = 50%	Retrait de dessiccation (10^{-6})	746	706	668	632	598	566	536	507	480	430	385	345
	Retrait total (10^{-6})	771	743	718	695	673	654	636	620	605	580	560	545
HR = 60%	Retrait de dessiccation (10^{-6})	668	632	598	566	536	507	480	455	301	385	345	309
	Retrait total (10^{-6})	693	670	648	629	611	595	580	567	426	535	520	509
HR = 70%	Retrait de dessiccation (10^{-6})	560	530	501	475	449	425	402	381	361	323	289	259
	Retrait total (10^{-6})	585	567	551	537	524	513	502	493	486	473	464	459
HR = 80%	Retrait de dessiccation (10^{-6})	416	394	372	353	334	316	299	283	268	240	215	193
	Retrait total (10^{-6})	441	431	422	415	409	403	399	395	393	390	390	393
HR = 90%	Retrait de dessiccation (10^{-6})	231	219	207	196	185	175	166	157	149	133	119	107
	Retrait total (10^{-6})	256	256	257	258	260	263	266	270	274	283	294	307

d. 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.

Tableau II.3. Coefficient de fluage en fonction de f_{ck} et de l'humidité relative (HR) et du délai de mise en charge suivant la NBN EN 1992-1-1.

f_{ck}		20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
HR = 50%	Mise en charge après 5 jours	3.91	3.60	3.21	2.82	2.52	2.27	2.08	1.91	1.77	1.55	1.38	1.25
	10 jours	3.62	3.34	2.97	2.61	2.33	2.11	1.92	1.77	1.64	1.44	1.28	1.16
	15 jours	3.44	3.17	2.82	2.48	2.21	2.00	1.83	1.68	1.56	1.36	1.22	1.10
	20 jours	3.30	3.04	2.71	2.38	2.12	1.92	1.75	1.61	1.50	1.31	1.17	1.05
	30 jours	3.10	2.85	2.54	2.23	1.99	1.80	1.64	1.51	1.40	1.23	1.09	0.99
	50 jours	2.84	2.62	2.33	2.05	1.83	1.65	1.51	1.39	1/29	1.13	1.00	0.91
HR = 80%	Mise en charge après 5 jours	2.69	2.48	2.24	2.00	1.82	1.66	1.54	1.43	1.34	1.20	1.08	0.99
	10 jours	2.50	2.30	2.07	1.86	1.68	1.54	1.43	1.33	1.25	1.11	1.00	0.92
	15 jours	2.37	2.18	1.97	1.76	1.60	1.46	1.35	1.26	1.18	1.05	0.95	0.87
	20 jours	2.27	2.09	1.89	1.69	1.53	1.40	1.30	1.21	1.13	1.01	0.91	0.845
	30 jours	2.13	1.97	1.77	1.59	1.44	1.32	1.22	1.14	1.06	0.95	0.86	0.78
	50 jours	1.96	1.80	1.62	1.45	1.32	1.21	1.12	1.04	0.98	0.87	0.79	0.72

e. 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.).

f. 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.

g. 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 $100\text{ }^\circ\text{C}$.

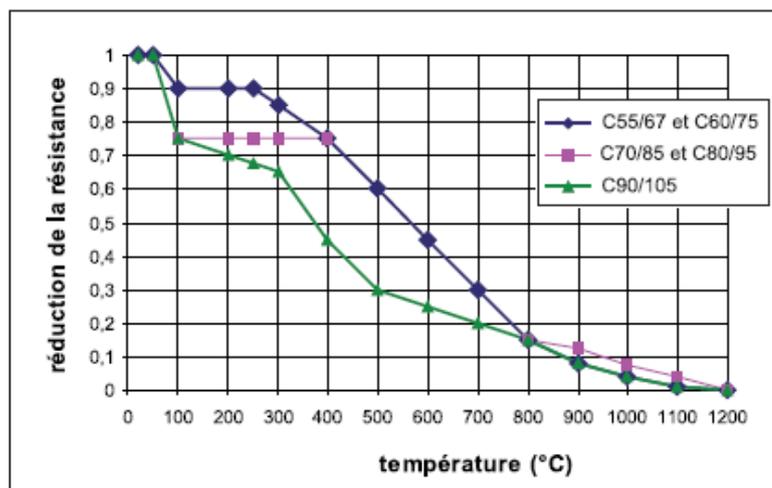


Figure II.4. Diminution de la résistance à la compression des bétons à haute résistance selon l'EC2 Feu.

9. Performances des BHP

- **Des propriétés exceptionnelles à l'état frais**

Du fait de la présence de super-plastifiants, le béton à hautes performances est particulièrement aisément manœuvrable. 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.

- **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 décentrement 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 précontrainte 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.

- **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.

10. 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 :

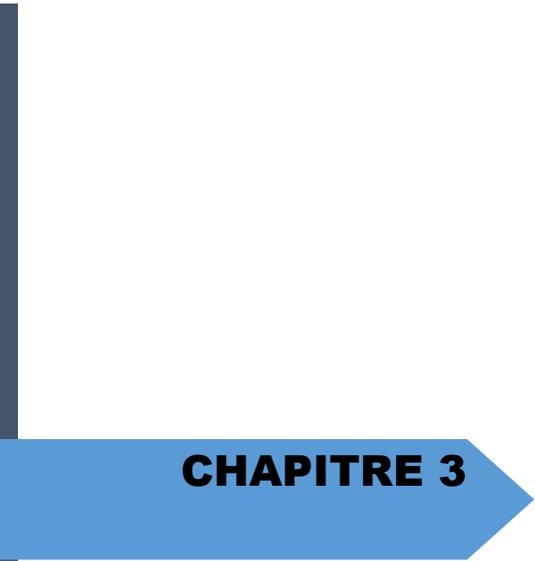
- On peut concevoir des poteaux avec des sections convenables pour les immeubles de grande hauteur (IGH).
 - Augmenter considérablement la portée des ponts.
 - Construire des immeubles plus durables, plus économiques et surtout plus écologiques.
 - Des pièces préfabriquées très courtes, (voussoirs pour 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).
- Exemples de compositions de BHP utilisées pour la réalisation de 2 ponts

Tableau II.4. 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

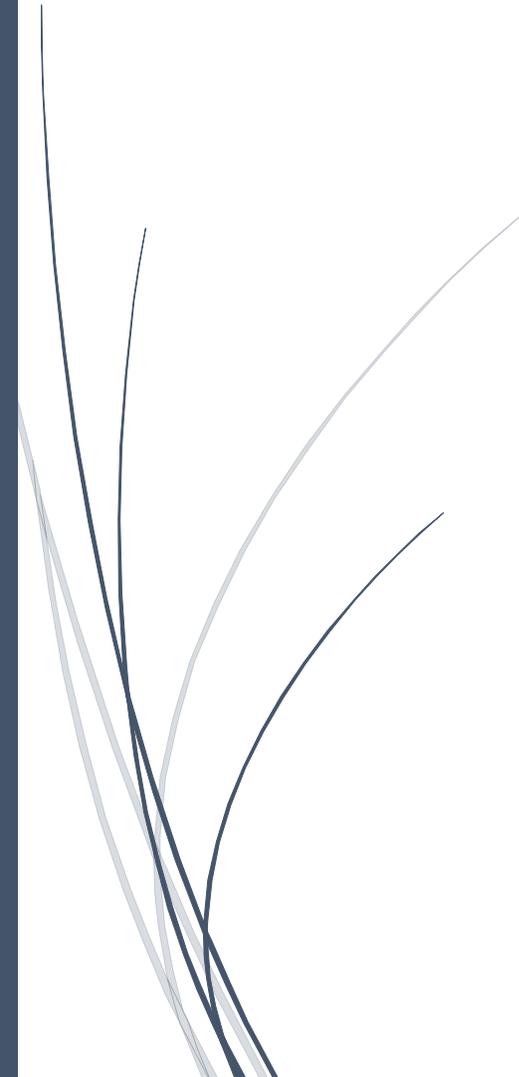
Tableau II.5. Composition utilisée pour la construction du pont de Jonche (France).

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



CHAPITRE 3

BETONS AUTO-PLACANTS



CHAPITRE 3 : BETON AUTO-PLAÇANT

1. Introduction

Pendant plusieurs années commençantes en 1983, le problème de la durabilité des structures en béton était un sujet d'intérêt majeur surtout au japon, il est considéré comme un problème majeur auquel la société japonaise fait face. Surtout que le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de béton très fluide, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme solution possible à ce problème.

Un béton fluide permettant :

- une mise en place aisée ;
- un bon remplissage des coffrages et des moules ;
- un parfait enrobage des armatures ;
- une forte compacité.

2. Définition du béton Auto-plaçant

Le béton auto-plaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, mis en place sans vibration. Le compactage se faisant uniquement par le poids du béton, et confère à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques.

La technologie des BAP se veut innovante remplacera à terme la technique classique des bétons vibrés dans bon nombre d'applications.

3. Les avantages des bétons auto-plaçant

- Amélioration des conditions de travail suite à l'absence de nuisances sonores
- Facilité et rapidité de la mise en œuvre
- Une économie de mains d'œuvre et excellent remplissage des coffrages
- Béton de qualité et surface plane, régulière
- Possibilité de bétonner des formes complexes

4. Domaines d'utilisation privilégiés des BAP

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant :

- des densités de ferrailage importantes ;
- des formes et des géométries complexes : voiles courbes, etc. ;
- des voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, etc. ;
- des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
- des exigences architecturales et de qualité des parements particulières ;
- des accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration.

5. Le béton auto-plaçant tant que matériau

Les BAP sont utilisés, puisqu'ils sont mis en place sans vibration, pour leur aptitude à remplir les coffrages les plus densément armés sans intervention extérieure. Cette caractéristique est communément appelée « capacité de remplissage ».

La capacité de remplissage dépend de deux facteurs : la déformabilité et la résistance à la ségrégation.

Les recherches ont montré l'existence d'une relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement du béton. Pour de faibles valeurs de l'affaissement, l'écoulement aurait tendance à s'arrêter à cause d'une augmentation de la friction entre les particules du béton.

Pour des valeurs d'affaissement plus élevés au contraire, les granulats peuvent se séparer plus facilement du mortier et l'écoulement peut être bloqué par la formulation de ponts de granulats reposant sur les obstacles : c'est la ségrégation.

Pour avoir une capacité de remplissage maximale, il faut donc avoir une déformabilité maximale et une ségrégation minimale.

La résistance à la ségrégation dépend essentiellement de deux facteurs : la viscosité du mortier (ou de la pâte de ciment) et du volume des gros granulats. En effet, les recherches montrent qu'une diminution de la viscosité du béton s'accompagne d'une augmentation de la ségrégation.

L'entraînement des granulats par le mortier est favorisé par les forces de viscosité, une augmentation de la viscosité minimise donc la ségrégation.

Le volume des gros granulats ainsi que leur taille maximale jouent un rôle non négligeable dans la résistance à la ségrégation. En effet, les collisions et les frictions inter-granulaires, qui sont à l'origine du blocage de l'écoulement autour des obstacles, augmentent avec le volume des gros granulats dans le béton.

La composition des BAP doit donc inclure des constituants supplémentaires et des dosages différents par rapport à ce qui est pratiqué pour les bétons vibrés pour présenter ces qualités de déformabilité et de résistance à la ségrégation. Nous abordons dans le paragraphe suivant la composition et la formulation de ces bétons.

6. Principes de formulation des BAP

La formulation des BAP fait appel à quatre principes fondamentaux :

- Fluidification de la pâte : cette fluidification est obtenue sans ajout d'eau
- Limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l'écoulement et la fluidité
- Stabilisation du mélange pour éviter le ressuage et les risques de ségrégation ;
- Maintien de la rhéologie pendant la Durée Pratique d'Utilisation souhaitée.

7. Les principaux constituants des BAP :

Les constituants des BAP peuvent être assez différents de ceux des BO. Ils peuvent différer tant par leurs proportions que par leur choix. Étant donné le mode de mise en place des BAP, les constituants entrant dans la fabrication du BAP, selon leur utilisation, en trois catégories ; les matériaux de base (ciment, granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques.

a. Matériaux de base :

Les granulats, le ciment et l'eau forment les éléments de base de tous types de béton.

Ils sont qualifiés ainsi puisqu'ils sont historiquement les seuls constituants des bétons de nos ancêtres et parce qu'ils ont toujours les plus grosses proportions relatives dans le mélange de BAP.

- Les granulats :

Les granulats roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. Afin d'empêcher tout risque de blocage du BAP par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm. Le mélange pour béton (granularité) est caractérisé par une teneur élevée en sable et en éléments fins. Le passant au tamis de 2 mm devrait être idéalement compris entre 38 et 42%. De même, la proportion de farines (< 0,125 mm) ne devrait pas être trop faible, l'optimum étant situé entre 4 et 8%. Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment. Afin d'assurer une bonne stabilité du BAP

(éviter toute ségrégation), il est recommandé de choisir un sable spécialement optimisé, au besoin recomposé. Partir de plusieurs fractions.

- Le ciment :

En principe, tous les types normalisés de ciment conviennent pour la fabrication de BAP. Cependant, l'utilisation du ciment portland (contenant seulement le clinker) nous donne toute latitude pour varier et contrôler les quantités introduites des additions minérales.

- L'eau de gâchage :

Toute eau du réseau public d'eau potable convient pour la fabrication de béton Auto-plaçant.

Etant donné que le dosage en eau influence de manière considérable la viscosité et la capacité d'auto-plaçant du béton, il est indispensable de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Il est ainsi très important de mesurer et de prendre en compte l'humidité des granulats et tout spécialement du sable. Cas échéant, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants.

b. Additions minérales

Les BAP sont caractérisés par une fluidité importante et surtout une diminution de la ségrégation et du ressuage (par rapport au béton vibré).

Pour obtenir ces propriétés et pour un meilleur arrangement granulaire, on ajoute de fortes teneurs en additions minérales

Nous présentons ci-dessous les différentes additions minérales éventuelles qu'on peut incorporer dans les compositions des BAP :

1. Les fillers calcaires
2. Les pouzzolanes naturelles
3. Le laitier de haut fourneau
4. La fumée de silice
5. Les cendres volantes,...

c. Adjuvants chimiques :

- Les super-plastifiants :

Ce sont des réducteurs d'eau à haute efficacité, et se présentent généralement sous forme de liquide. Ils sont composés de longues molécules organiques de masse élevée.

Le mode d'action des super-plastifiants est extrêmement complexe. Il peut être expliqué comme suit:

Lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment tendent à s'agglomérer sous forme d'amas (floculation). Par conséquent, cette floculation piège un certain volume

d'eau entre les grains de ciment (eau captive) qui n'est plus disponible pour assurer une bonne maniabilité au béton.

Les super-plastifiants en s'adsorbant à la surface des grains de ciment brisent cette dynamique. Ils neutralisent les différentes charges et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules et, par conséquent, la dispersion des grains de ciment libère. De l'eau qui est maintenant disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la maniabilité.

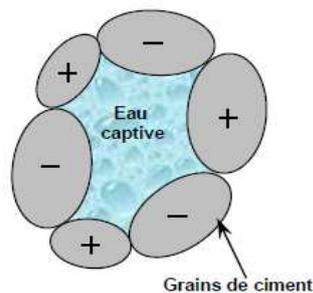


Figure III.1. Pâte de ciment non adjuvannée.

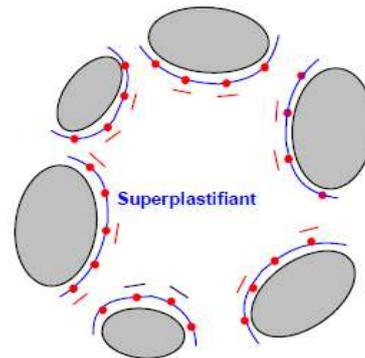


Figure III.2. Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant.

- Les agents colloïdaux (agent de viscosité) :

Généralement les fluidifiants diminuent la viscosité du béton, ce qui rend le matériau plus sensible vis-à-vis du phénomène de ségrégation. Les agents de viscosité (qui se présentent généralement sous forme de poudre) ont, eux, la propriété essentielle de modifier le comportement rhéologique des milieux aqueux dans lesquels ils sont utilisés (ce rôle modificateur peut aller du simple épaissement jusqu'à la gélification) et peuvent être utilisés avec intérêt dans la composition des BAP.

8. *Pratique actuelle de la formulation :*

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de béton est l'industrie du bâtiment, qui utilise principalement des bétons de 25 à 35MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances "ordinaires" sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer).

En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en super-plastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût.

Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formulateur.

1. Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
2. Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
3. La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
4. Le dosage en super-plastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages.

Ainsi en termes de constituants, là aussi on constate une différence entre le béton traditionnel (BO) et le BAP, en effet celui contient plus comme le montre la figure suivante :

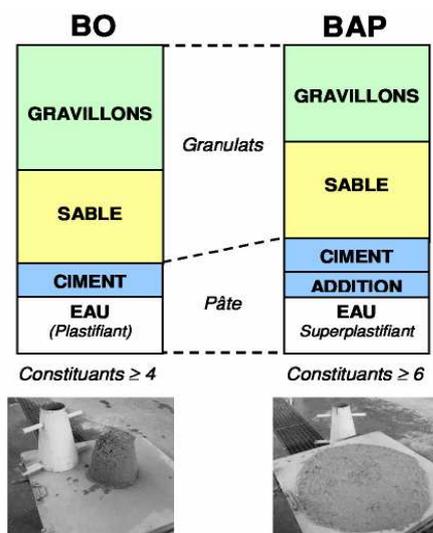


Figure III.3. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.
Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.

9. Caractérisations des BAP à l'état frais :

Avant d'accepter une composition comme celle d'un BAP, il faut s'assurer que le béton résultant possède effectivement les qualités qu'on espère. Pour cela, il existe de nombreux essais permettant d'évaluer les différentes caractéristiques du béton à l'état frais.

Parmi les essais les plus utilisés pour la caractérisation des bétons auto-plaçants à l'état frais sont :

a. Détermination de la consistance (slump flow)

C'est un essai dérivé de l'essai d'affaissement. Au lieu mesurer l'affaissement, on mesure le diamètre moyen de la galette formé par le béton lors de l'étalement.

Matériel utilisé :

- une plaque carré d'au moins 90 centimètres de côté ,
- cône d'Abrams,
- Mètre ou règle de 90 centimètres.

Mode opératoire :

- placer la plaquette sur un support stable et horizontal,
- humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon),
- placer le cône d'Abrams au centre de la plaque, et faire le remplir avec le béton en versant de manière continue, jusqu'à la rase supérieure du cône,
- araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide,
- soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées,
- une fois que le béton est s'étalé sur la table, mesurer le diamètre final sur deux cotés perpendiculaire D1 et D2,
- noter le résultat des deux valeurs, exemple : « 68/70 cm ». Si les deux valeurs diffèrent de plus de 5 cm, l'essai doit être invalidé et reconduit,
- le résultat final est la moyenne des deux valeurs obtenues.

$$Slumpflow = \frac{D1 + D2}{2} \quad (III.1)$$

On vise habituellement un étalement compris

Tableau III.1. Essai d'étalement (slump flow)

Classe	ETALEMENT en (mm)
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

- la **classe SF1** est souvent appropriée :
 - aux structures en béton non ou faiblement armées, bétonnées par le haut, avec un libre déplacement du point de remplissage
- la **classe SF2** est appropriée à de nombreuses applications courantes
- la **classe SF3** est normalement produite avec un diamètre maximum des granulats peu élevé (inférieur à 16 mm) et est utilisée pour des applications verticales dans des structures qui comportent un ferrailage dense, ou qui sont de formes complexes.

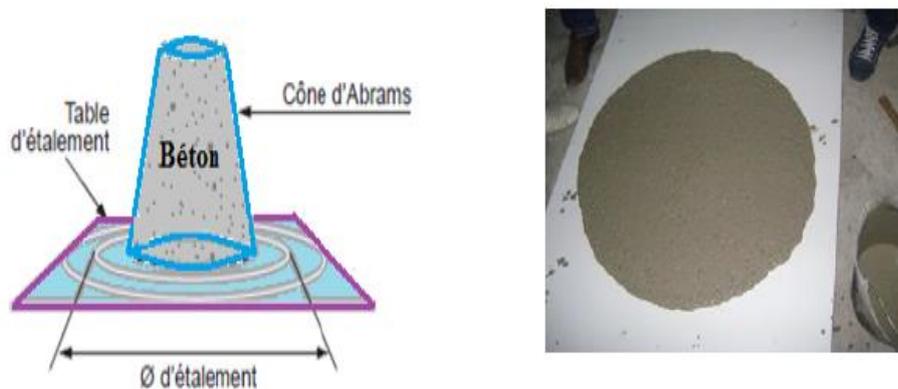


Figure III.4. Essai d'étalement.

b. Détermination du risque de blocage à l'aide de la L-Box

Ces essais permettent de tester la mobilité du mélange frais en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables. Le principe de cet essai est le suivant :

- la partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton,
- Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute, puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage,
- Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 .

Tableau III.2. Taux de remplissage dans la boîte en L.

Classe	Taux de remplissage
PL1	$\geq 0,80$ avec 2 armatures
PL2	$\geq 0,80$ avec 3 armatures

- **PL1** pour les structures avec un intervalle d'écoulement compris entre 80 mm et 100 mm

- **PL2** pour les structures avec un intervalle d'écoulement compris entre 60 mm et 80 mm

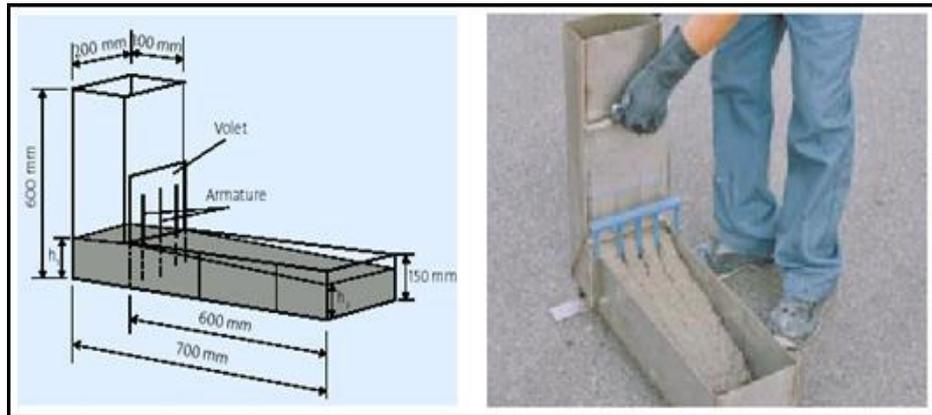


Figure III.5. Schéma de la boîte en L.

c. Détermination de la vitesse d'écoulement à l'aide du V-Funnel

Matériel utilisé :

- Un entonnoir dont les dimensions sont définies à la figure,
- Chronomètre.

Mode opératoire :

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante:

- S'assurer que le clapet de fermeture à la base de l'entonnoir soit fermé,
- Remplir l'entonnoir en béton jusqu'en haut,
- araser si nécessaire à l'aide d'une truelle,
- ouvrir le clapet de fermeture, le béton va se couler,
- mesurer le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé.

Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto-plaçant.

Tableau III.3. Classification des BAP selon la norme NFP 12350-9.

Classe	Temps (seconde) relatif à l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V
VF1	< 9,0
VF2	9,0 à 25,0

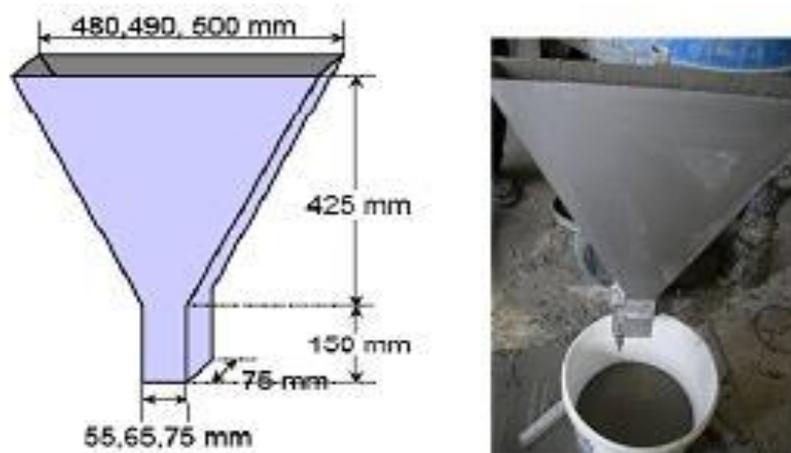


Figure III.6. Essais des Entonnoirs.

d. Détermination de la résistance à la ségrégation par l'évaluation de la stabilité au tamis

Matériel utilisé :

- seau 10 L + couvercle,
- tamis 5 mm + fond,
- bascule précision minimale 20g, portée minimale 20 kg.

Mode opératoire :

- après le malaxage du béton, verser le béton dans le seau, temps d'attente entre l'arrêt de malaxage et le prélèvement < 30 s,
- couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation, et attendre 15 min
- peser le fond et le tamis à vide,
- peser le fond seul,
- poser tamis + fond sur la bascule, et faire la tare,
- après 15 min, verser sur le tamis un poids de béton égal à 4,8 kg,
- noter le poids réel lu de l'échantillon,
- attendre 2 min, puis faire la tare,
- peser le fond avec la laitance. On a $P_{laitance} = P_{fond+laitance} - P_{fond}$
- calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon

$$\pi = \frac{P_{laitance}}{P_{echantillon}} \times 100 (\%) \quad (II.2)$$

Tableau III.4. *Stabilité au tamis.*

Classe	Pourcentage de laitance
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

- **classe SR1** est généralement applicable aux dalles de faible épaisseur et peut également être utilisé dans les applications verticales avec une distance maximale de cheminement de 5 m et un intervalle d'écoulement supérieur à 80 mm.
- **lasse SR2** est mieux adapté dans les applications verticales si la distance de cheminement est supérieure à 5 mètres et si l'intervalle d'écoulement est supérieur à 80 mm.

**Figure III.8.** *Essai de la stabilité au tamis.*

10. Caractérisation des BAP à l'état durci

Lorsque le BAP est formulé et mis en œuvre de manière adéquate, ses propriétés à l'état durci (résistance, déformation, durabilité) ne se différencient guère de celles d'un béton ordinaire vibré. Généralement ces propriétés d'après plusieurs chercheurs, sont meilleures, en particulier lorsque le béton spécifié doit répondre à des exigences courantes, ce qui est généralement le cas dans le domaine du bâtiment.

a) La résistance mécanique

Les chercheurs montrent que, en utilisant les fillers, la résistance mécanique s'accroît aux jeunes âges. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les super-plastifiants, favorisent l'hydratation du ciment et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets

ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours. puis deviennent moins significatifs par la suite.

Cet effet tend à s'annuler au-delà de 28 jours. Les bétons auto-plaçants présentent une même résistance mécanique que celui d'un béton ordinaire (béton vibré).

b) Le module élastique

Plusieurs recherches concernant le module d'élasticité des BAP montrent qu'il est souvent proche à celui de BO, lorsque les deux types de béton ont la même résistance.

c) Durabilité

Les BAP, formulés avec les mêmes composants que les bétons traditionnels, sont soumis aux mêmes propriétés de transfert et mécanismes d'altération vis-à-vis des agressions externes (attaques sulfatiques, gel...) et internes (carbonatation, pénétration des chlorures). Ils présentent donc une durabilité au moins équivalente à celle des bétons vibrés.

11. Fabrication des BAP

- En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP.
- Lors de l'introduction des différents constituants dans le malaxeur, on appliquera les mêmes consignes que celles recommandées pour les bétons vibrés,
- Le temps de malaxage est légèrement plus long que pour un béton classique, afin que le mélange, riche en éléments fins et en adjuvants, soit le plus homogène possible.
- L'un des points les plus importants de la fabrication est le contrôle strict de la teneur en eau du mélange.

12. Transport des BAP

En raison de sa fluidité élevée, le béton auto-plaçant doit être transporté en camion malaxeur. Le tambour du malaxeur doit tourner lentement pendant toute la durée du transport. Dans le cas d'un terrain en forte pente, la fermeture du tambour avec un couvercle est recommandée.

Comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité du béton peut se modifier durant le transport, la manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres : le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température.

Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier. Avant le déchargement, le béton doit être malaxé à nouveau pendant environ 5 minutes à vitesse de rotation maximale.

13. La mise en place des BAP

Par rapport au béton vibré la mise en place du BAP est grandement facilitée, elle peut être réalisée par une seule personne et selon 03 méthodes différentes :

- ✓ *La première méthode:* Mise en œuvre à la benne à manchette traditionnelle , Le béton est mis en œuvre par le haut du coffrage. La manche est glissée dans le coffrage pour réduire la hauteur de chute
- ✓ *La deuxième méthode:* la mise en œuvre par pompage en pied de coffrage, cette méthode est adaptée en particulier pour les éléments verticaux de grande hauteur. Elle supprime toute intervention en partie haute des coffrages.
- ✓ *La troisième méthode* est la mise en place par pompage, Le tube plongeur doit être suffisamment introduit dans le coffrage pour limiter au maximum la hauteur de chute. il est fortement conseillé de limiter la hauteur maximale de chute du béton à 5 mètres.
Cette méthode est aussi adaptée au bétonnage d'éléments verticaux.



CHAPITRE 4

BETON DE FIBRES

CHAPITRE 4 : BETON DE FIBRES

1. Introduction

Le béton est un matériau dont les performances en traction sont faibles par rapport à celles en compression. Pour l'utilisation efficace d'un tel matériau, il a été nécessaire de le renforcer par des aciers qui reprennent les efforts de traction : le béton armé. Le renforcement de la zone tendue du béton par des armatures en acier a permis le développement de ce matériau dans le bâtiment et les travaux publics. Cette solution, outre toutes ses qualités (résistance, formulation relativement simple, facilité de mise en œuvre...), présente néanmoins deux inconvénients : ce matériau est fortement hétérogène et son comportement en traction reste du type fragile. De plus, sa mise en œuvre se heurte parfois à la complexité du ferrailage.

Cependant, l'incorporation des fibres au sein du béton améliore son comportement de façon à augmenter ces caractéristiques mécaniques. Ce procédé a donné naissance à un nouveau matériau qui présente une bonne résistance à la traction, un comportement post-rupture satisfaisant et un caractère plus ou moins homogène dans tout le volume de la matrice : béton de fibre.

Certains auteurs l'appellent nouveau matériau mais en fait depuis 1960, des recherches importantes ont été faites sur ce nouveau matériau qu'est le béton de fibres, notamment en ce qui concerne les propriétés mécaniques et le procédé de mise en œuvre de ce matériau.

2. Définition du béton de fibres

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. Les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement homogène. Les fibres ont pour rôle principal de maîtriser la fissuration et de reprendre les efforts au droit des fissures éventuelles.

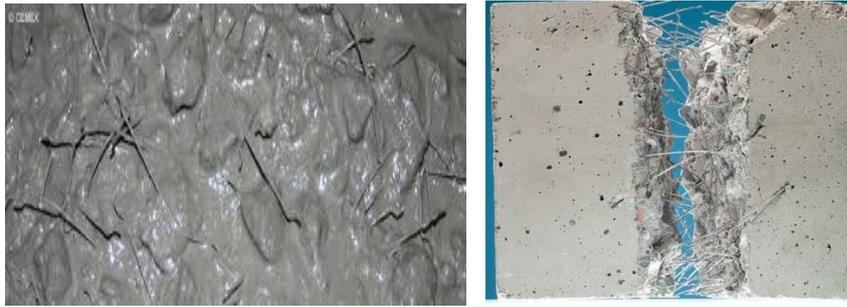


Figure IV.1. Béton de fibre.

3. Définition des fibres

Les fibres sont définies comme des éléments discontinus, de nature variable, des formes sensiblement cylindriques, d'un diamètre et longueur variable.

4. Caractéristiques et propriétés des fibres

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés spécifiques : dimensions (diamètre inférieur en général à 1 mm, longueur en général inférieure à 60 mm...), formes (lisses, crantées, ondulées, à crochet...), résistances mécaniques (résistance à la traction), ce qui génère des performances mécaniques et des propriétés très variées.

5. Utilisation des fibres dans le béton

Les fibres de différentes compositions incorporées au béton ont pour effet d'augmenter la résistance résiduelle du béton. Dans certains cas, l'utilisation de fibres permet de renforcer la structure. En général, les fibres permettent une meilleure répartition des contraintes mécaniques. Les propriétés majeures liées à l'utilisation de fibres sont :

5.1. Amélioration des caractéristiques mécaniques

L'utilisation de fibres augmente la ductilité du béton, c'est-à-dire ses caractéristiques en postfissuration. De plus, l'utilisation de fibres peut apporter une amélioration en flexion, en tension, en torsion et en

cisaillement ainsi qu'à la résistance aux impacts et à la fatigue. Un béton fibré continue donc à supporter des charges après la formation de fissures.

Il est important de se rappeler que la distribution uniforme des fibres dans le mélange est la condition essentielle pour obtenir une amélioration des caractéristiques mécaniques du béton fibré.

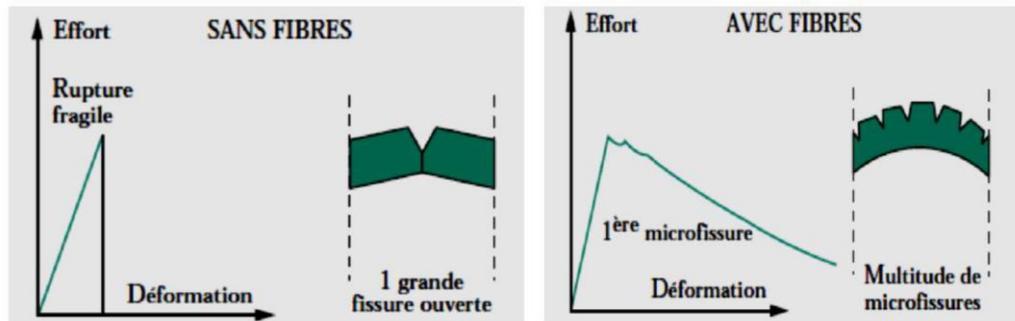


Figure IV.2. Comportement fragile du béton ordinaire et comportement ductile du béton fibré.

5.2. Contrôle de la fissuration de retrait

Pour optimiser le contrôle de la fissuration, les fibres doivent être distribuées de manière homogène dans le béton tout en ayant un dosage adéquat. L'utilisation de fibres aide donc à diminuer la fissuration causée par le retrait plastique.

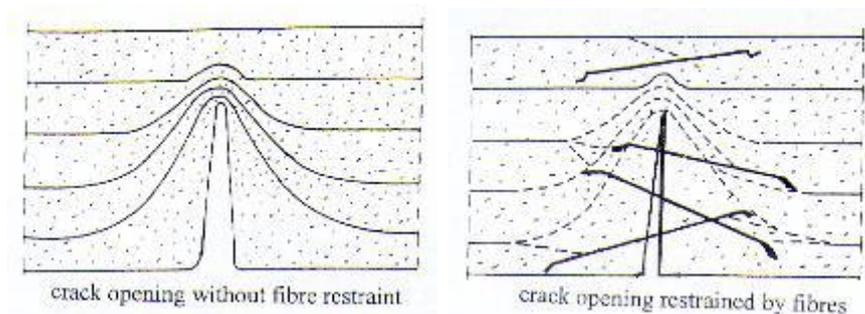


Figure IV.3. Effet de retardement de la fissuration du béton avec fibres.

6. Composition du béton fibré

La composition du béton fibré est très proche de celle du béton ordinaire. Lors de la formulation du béton fibré, la quantité de fibres varie selon l'application et le type des fibres.

Pour obtenir une maniabilité correcte (un mélange fluide), les bétons fibrés ont souvent besoin d'adjuvants tels que les super-plastifiants. Ces derniers permettent d'obtenir un béton ouvrable, même en présence des fibres.

En résumé, un béton fibré est toujours composé des éléments suivants :

- ✓ Liants hydrauliques
- ✓ Fibres
- ✓ Sables de quartz.
- ✓ Graviers.
- ✓ Adjuvants spécifiques

7. Les avantages et inconvénients du béton fibré

a) Les avantages

Les fibres offrent une meilleure cohésion au béton, augmentent sa résistance, améliorent sa déformabilité et réduisent les effets de retrait ainsi que les microfissures.

De façon générale, voici quelques avantages observés au niveau du béton :

- Une facilité de mise en œuvre ;
- Une longue durée de vie et un poids léger ;
- Le remplacement total ou partiel des armatures passives ;
- La baisse du risque de fissuration ;
- Une bonne résistance au feu, à l'abrasion, aux chocs, à la traction et à la flexion.

b) Les inconvénients du béton fibré

- Le béton fibré est plus cher que le béton ordinaire.
- L'incorporation de fibres diminue l'ouvrabilité du béton, l'ajout de superplastifiant est alors recommandé.
- Il est interdit d'utiliser des fibres structurelles en zone de risque sismique modéré et plus.

8. Les types des fibres

Nous distinguons de différents types de fibres répartis en trois grandes familles à savoir :

- Fibres métalliques : elles se composent de l'acier, de l'inox et de la fonte. Elles participent à la résistance du béton à la traction et à la flexion ;

- Les fibres organiques : dans cette catégorie, vous trouverez l'acrylique, polypropylène, le carbone, etc. Leur présence réduit le risque de fissuration ;
- Les fibres minérales : celles-ci rassemblent le basalte, le mica, le verre, etc. Outre leur bonne isolation thermique, elles permettent aussi de fabriquer des parois minces.

8.1. Fibres d'acier

Les fibres d'acier, qui sont sans doute les plus utilisées dans le domaine du génie civil. En effet, les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interfaciale entre fibre et matrice.

Il existe de nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur section (ronde, carrée, rectangulaire), leur diamètre, leur longueur et leurs modes d'élaboration. Elles peuvent être rectilignes, ondulées, ou présentés des élargissements aux extrémités, soit en crochets pour améliorer l'accrochage. dans le même but, elles peuvent présenter des aspérités, des crans surfaces.

En général, la longueur des fibres varie de 25 à 60 mm et le diamètre varie de 0,5 à 1,3 mm. La fabrication des fibres métalliques s'effectue selon plusieurs méthodes en relation avec leurs formes géométriques multiples.

La résistance en traction de ces fibres varie généralement entre 1000 et 3000MPa.

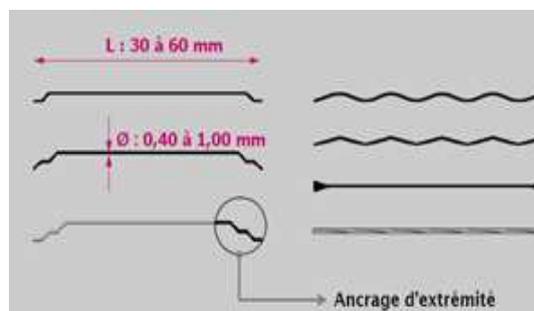


Figure IV.4. Propriétés géométriques des fibres en acier.

- Applications

Du fait de leurs propriétés, les fibres trouvent un vaste domaine d'applications là où on veut réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, augmenter la résistance aux chocs et tirer parti de l'amélioration de la résistance en traction pour diminuer le dimensionnement des pièces :

- dallages, parkings, pistes
- bétons projetés en galeries, tunnels, talus
- éléments préfabriqués divers : tuyaux, caniveaux, garages

- pieux de fondation.

- *Les bétons de fibres métalliques*

Le mélange des fibres métalliques au béton doit être particulièrement soigné, certaines fibres ayant tendance à s'agglomérer (phénomène communément appelé « formation d'oursins »), pour éviter ce problème on doit limiter D_{max} des gros granulats, augmenter la proportion de granulats fins et contrôler la vitesse d'introduction des fibres, l'incorporation des fibres peut être faite soit au malaxage, soit au moment du coulage soit à la projection.

L'emploi de superplastifiant est en particulier recommandé pour compenser la diminution d'ouvrabilité provoquée par l'incorporation de fibres.



Figure IV.5. Formation d'oursins.

Pour avoir une répartition homogène des fibres dans l'entièreté, La mise en œuvre et le compactage doivent être étudiés pour le béton considéré et en fonction de sa maniabilité qui diffère généralement de celle des bétons classiques sans fibres.

Les dosages en fibres sont de l'ordre de 0.3 à 2% en volume, soit 25 à 160 Kg/m³.

8.2. Les fibres de verre

Les fibres de verre sont, grâce à leurs qualités mécaniques et leur rigidité, des renforts très efficaces du béton. Elles se dispersent facilement dans la matrice cimentaire, ce qui permet de réaliser des produits de formes très variées.

En s'opposant à la propagation des microfissures dans le béton, elles améliorent la résistance en traction du béton et sa ductilité.



Figure IV.6. *Fibres de verre.*

- Propriétés des fibres de verre
 - Les caractéristiques mécaniques élevées : 3000 MPa pour la résistance à la traction.
 - Une excellente résistance au feu (jusqu'à 800 C) ce critère ajouté à un coefficient de dilatation du même ordre que celui de la pâte de ciment confère aux bétons de fibres de verre une bonne résistance au feu.

- Elaboration des bétons de fibres de verre

Ce procédé consiste à fabriquer un mortier dans un malaxeur et à y ajouter 4 à 5 % en poids de fibres de verre coupées (entre 15 à 60 mm de longueur), ce mélange peut être moulé ou pressé, mais dans tous les cas la vibration doit être de faible amplitude pour maintenir une répartition homogène des matériaux

- Applications

Sur chantier les mortiers de fibres de verre s'utilisent pour les enduits extérieurs monocouches ainsi que pour certains procédés d'isolation thermique.

En préfabrication les domaines d'application sont très vastes :

- panneaux de façade minces de 10 à 15 mm d'épaisseur ou panneaux sandwich à isolant incorporé
- éléments de bardage et éléments décoratifs
- mobilier urbain
- éléments divers : coffrets, coffrages, habillages,
- produit d'assainissements : tuyaux, caniveaux

8.3. *Fibres de polypropylène*

Ce sont des fibres industrielles (plastiques) minces, de différents couleurs, chimiquement inertes et ne réagissent pas avec les composants de mélange du béton. La résistance des fibres de polypropylène à la

tension est très forte, ainsi son élasticité. Le poids spécifique est faible et ces fibres n'absorbent pas de l'eau.



Figure IV.7. *Fibres polypropylène.*

- Propriétés des fibres de polypropylène

Si leurs caractéristiques mécaniques ont des valeurs plus faibles que celles des fibres métalliques, il faut cependant mentionner leur insensibilité chimique, leur souplesse, qui rend aisée leur incorporation au béton et leur allongement à la rupture (15 à 20 %), qui favorise la « ductilité » du béton.

Comme la plupart des matières plastiques, les fibres de polypropylène sont peu résistantes au feu : leur température de fusion est d'environ 160 C° mais leur fusion n'affecte pas la résistance du béton.

- Les bétons de fibres de polypropylène

La fabrication du béton avec fibres de polypropylène ne soulève aucune difficulté, la répartition des fibres se faisant facilement et ne nécessitant pas de précaution particulière lors de malaxage.

Les fibres de polypropylène améliorent la maniabilité du béton et sa cohésion.

Ces propriétés sont intéressantes pour les pièces à démoulage immédiat (bordures, tuyaux) en même temps qu'elles améliorent l'aspect et la précision des angles, des tranches ou arêtes des pièces moulées ou des dallages.

Le grand avantage des bétons de fibres de polypropylène est leur bonne résistance à la fissuration due au « premier retrait » ainsi que leur résistance aux chocs.

Les dosages couramment pratiques sont de l'ordre de 0.05 à 0.2 % en volume (0.5 à 2 Kg de fibres par m³ de béton)

- Application

Des propriétés précédentes découlent les applications des bétons de fibres de polypropylène :

- Dallages industriels et chaussées
- Pièces préfabriquées (panneaux décoratifs)
- Mortiers projetés
- Enduits.



CHAPITRE 5

**BETON A POUUDRE
REACTIVE**

CHAPITRE 5 : BETON A POUDRE REACTIVE

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.

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 coût d'entretien.

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

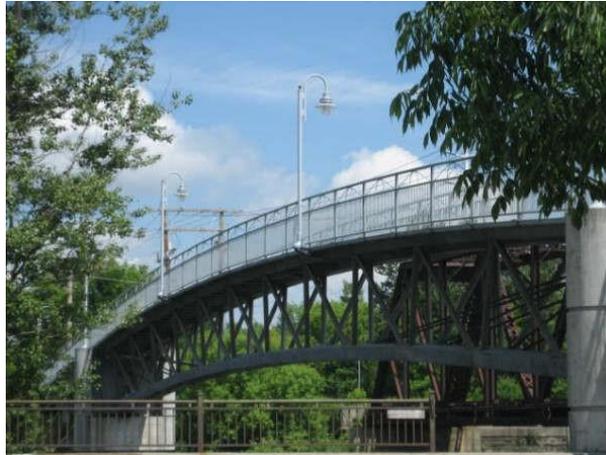


Figure V.1. Passerelle piétonnière de Sherbrooke réalisée en 1997.

3. Les constituants du BPR

3.1. Le ciment

Les formulations de Béton de poudre réactive se caractérisent par l'emploi d'une grande quantité de ciment allant de 700 kg/m³ jusqu'à plus de 1000 kg/m³. Cette quantité considérable de ciment, à laquelle vient s'ajouter aussi des ultrafines, a pour but de diminuer au maximum les vides, et d'augmenter, par conséquent, la compacité du mélange.

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton BUHP est conforme à la norme NF EN 197-1. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine. Pour bénéficier pleinement de l'activité pouzzolanique des fines d'addition, on privilégie souvent les ciments sans ajouts (CEM I) par rapport aux ciments avec ajouts.

3.2. Granulats

3.2.1. Sable fin

Le sable constitue le plus gros granulats du BPR, sa taille moyenne est inférieure à 600 µm. Un meilleur choix de ce composant garantirait une bonne interface pâte granulats. Ceci faciliterait le contrôle de la

rhéologie et améliorerait les performances mécaniques du matériau. En effet, l'utilisation des grains de forme arrondie, présentant une faible adsorption d'eau, favorise la rhéologie du béton.

3.2.2. Additions

Conformément à la norme NF EN 206, toutes les additions présentant une finesse supérieure à celle du ciment peuvent être utilisées en substitution d'une partie du ciment. Concernant le BPR, les additions les plus utilisées sont : la fumée de silice, le quartz broyé, et, plus récemment, le métakaolin. Les additions ont trois fonctions essentielles dans la matrice cimentaire du BPR : par effet filler, elles comblent les vides entre les grains de ciment, les fibres et le sable ; elles améliorent la rhéologie du mélange et enfin, elles forment des produits d'hydratation par leur effet pouzzolanique.

3.2.3. Les super-plastifiants

Compte tenu des très faibles rapports Eau/Liant des BPR, la quantité d'eau est insuffisante pour obtenir une maniabilité correcte permettant une bonne mise en œuvre de ces bétons. L'emploi d'adjuvants de la famille des super-plastifiants, généralement hauts réducteurs d'eau, est donc indispensable pour fluidifier le mélange, mais aussi pour disperser les grains.

Les super-plastifiants sont des dispersants qui fonctionnent sur le même principe que les plastifiants réducteurs d'eau mais d'une façon plus efficace, telle qu'il est possible en principe de défloculer complètement les grains. Ce sont des polymères de synthèse fabriqués spécialement pour l'industrie du béton.

3.2.4. Fibres

Les fibres sont ajoutées aux bétons pour augmenter la résistance à la traction et apporter un caractère ductile aux bétons fragiles par nature. En général, les fibres métalliques, synthétiques, de verre ou végétales peuvent être incorporées dans le béton. En ce qui concerne les BPR, elles peuvent être de nature métallique ou organique. Certaines fibres organiques permettent également d'augmenter la résistance au feu des BPR.

Généralement, l'impact des fibres sur le comportement à l'état frais des bétons est de nature à augmenter le dosage en liant et en adjuvant pour contrecarrer la perte de fluidité. Le choix se fait en fonction du type d'application visée. En effet, la prénorme matériaux BFR (PR NF P18-470) préconise l'utilisation des fibres métalliques pour les BPR structuraux, et les fibres synthétiques dans le cas de BPR non structuraux.

3.3. Rapport Eau/Liant

Pour ce qui concerne la teneur en eau, les BP sont obtenus en choisissant un faible rapport Eau/Liant, inférieur à 0,20, dans le but de réduire au maximum la porosité du matériau et la connectivité des pores résiduels.

4. Principes de formulation

La formulation du BPR est guidée par les principes suivants :

- les effets mécaniques induits par l'hétérogénéité des composants granulaires des bétons usuels sont fortement réduits par la suppression des gros granulats et par l'amélioration importante des propriétés mécaniques de la pâte liante ;
- l'introduction de composants de différentes classes granulaires respectant le principe de desserrement, suivant lequel les granulats fins occupent un volume supérieur à l'indice des vides des granulats de classe supérieure, permet de minimiser l'indice des vides global du matériau et la quantité d'eau nécessaire au gâchage ;
- l'emploi de fibres métalliques de petites dimensions et de haute limite élastique permet d'utiliser pleinement les qualités de la matrice du BPR en terme de contrainte d'adhérence ;
- les techniques de fabrication et de mise en place sont celles utilisées pour les bétons traditionnels avec pour seule contrainte particulière un allongement important du temps de malaxage.

Enfin, il est possible de supprimer tout retrait en appliquant après prise un traitement thermique à 90 C°, qui permet par ailleurs une amélioration supplémentaire des propriétés mécaniques.

4.1. Formulation type du BPR

La formule de base des BPR exprimée en proportions massiques par rapport à la quantité de ciment est la suivante :

- ciment portland : 1
- sable : 1,1
- fumée de silice : 0,25
- quartz broyé : environ 0,75 de la masse du sable (optimal)
- super-plastifiant : 0,01
- E/C : 0,1 à 0,15
- Fibres d'acier : diamètre 0,15mm, longueur de 3 à 12 mm en fonction de l'application

5. Les avantages et les inconvénients de BPR

Le BPR répond plus particulièrement aux exigences suivantes :

- Durabilité et durée de vie allongée,
- Meilleure performance aux chocs et à l'abrasion,
- Délai rapide et temps d'arrêt de la circulation minimal Construction l'hiver par la résistance au gel et dégel,
- Performance sismique grâce à ses propriétés de ductilité,
- Impact minimal sur l'environnement,
- Finitions personnalisées, aspect élané,
- Une durée de vie optimisée pour les décennies,
- Un excellent choix pour la fabrication d'éléments structurels durables et nécessitant peu d'entretien.

Le principal inconvénient du matériau BPR est leur coût très élevé, ne permet pas de l'utiliser en vrac.

6. Propriétés mécaniques du BPR

L'utilisation de la fumée de silice dans la formulation des BPR permet d'optimiser l'empilement granulaire et ainsi d'améliorer l'adhésion des différents constituants d'un béton, ce qui a un impact direct sur ses propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques d'un BPR sans traitement thermique sont différentes de celles d'un BPR ayant subi un traitement thermique. Sans (ou avant) traitement thermique, les propriétés évoluent au fur et à mesure de l'avancement de l'hydratation du ciment, comme pour les bétons classiques. On les caractérise alors par leur valeur à 28 jours. Après traitement thermique, les propriétés du matériau sont stables dans le temps et peuvent être caractérisées par une valeur unique.

6.1. Résistance en compression

La résistance en compression du BPR est mesurée sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 70 mm et de hauteur 140 mm, dont les deux faces ont été préalablement rectifiées. Cette opération de rectification est primordiale pour obtenir un parallélisme parfait des faces, éviter toute flexion parasite et diminuer l'écart type des essais.

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.

L'utilisation du concept de confinement dans un tube métallique mince permet d'augmenter encore la résistance en compression ; en appliquant en plus une pression sur le BPR pendant sa prise (le tube jouant alors le rôle de la chemise du piston) on compense les effets de retrait et on applique une légère étreinte latérale passive sur le béton : sa résistance à la compression peut alors atteindre 350 MPa.

6.2. Résistance en traction directe

La résistance en traction est directement liée au dosage en fibres et plus précisément au dosage et à l'orientation locaux des fibres dans la zone sollicitée en traction. Ces paramètres sont représentés par un coefficient d'orientation moyen α , qui varie de 0 (aucune fibre dans la direction de sollicitation) à 1 (toutes les fibres sont dans la direction de sollicitation).

La figure V.2 illustre les trois types de comportement que l'on obtient en fonction de ce dosage local : le type I est caractéristique d'un BPR contenant faible dosage en fibres. Les types II et III caractérisent un BPR contenant des fibres moyennement et bien orientées, respectivement.

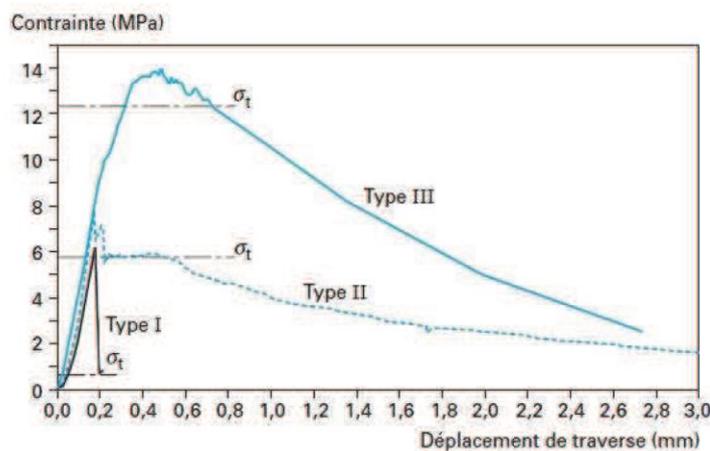


Figure V.2. Comportement du BPR en traction directe

7. Durabilité du BPR

Les premiers essais de durabilité réalisés sur le BPR remontent à 1991 et ont permis d'acquérir un nombre important de données. L'origine des propriétés de durabilité du BPR est à chercher dans la qualité de la

microstructure : la suppression des gros granulats et l'introduction de composants de différentes classes granulaires (fumée de silice ...) ont pour effet de diminuer la porosité et d'augmenter l'homogénéité du matériau.

7.1. Porosité

La porosité est un paramètre essentiel pour la durabilité des matériaux à base cimentaire car la taille des pores et leur connectivité déterminent la résistance du matériau à la pénétration d'agents agressifs.

La porosité entre 6 nm et 100 μm a été mesurée à l'aide d'un porosimètre à mercure. On observe pour le BPR une absence totale de porosité capillaire, celle qui est à l'origine des principaux mécanismes de diffusion dans les matériaux à matrice cimentaire.

La porosité accessible à l'eau du BPR, mesurée selon le mode opératoire AFREM, vaut 2 %.

7.2. Carbonatation

Lors de l'étude, un certain nombre d'essais d'orientation ont révélé que le coefficient de carbonatation d'un BUHP était 10 fois inférieur à celui d'un béton à hautes performances (BHP), voire 25 fois inférieur à celui d'un béton traditionnel (figure V.3). En théorie, cela signifie que la durée de vie du BUHP dépassera largement celle d'un béton traditionnel, puisqu'il se dégradera moins vite.

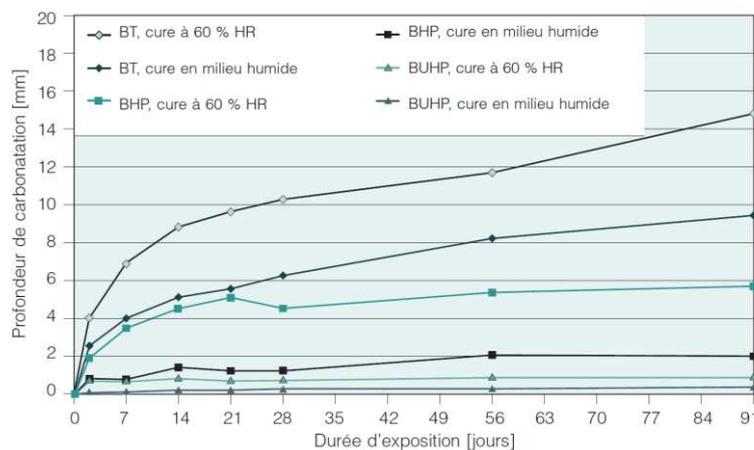


Figure V.3. Profondeur de carbonatation d'un béton témoin (BT), d'un béton à hautes performances (BHP) et d'un béton à ultra-hautes performances (BUHP), suivant leur durée d'exposition à une atmosphère en CO_2 de 1 %.

Des résultats similaires ont été obtenus en ce qui concerne la diffusion de chlorures. L'essai de résistance aux sulfates n'a révélé aucune déformation dans les mélanges de BUHP, contrairement aux mortiers de référence (courbe exponentielle avec une dilatation de 0,3%, soit 3 mm/m, après 12 mois).

8. Conception des structures en BPR

La résistance en traction et la ductilité du BPR permettent de l'employer dans les structures sans armatures passives. La dissymétrie de performances en traction et compression est compensée par l'utilisation de précontrainte (par pré- ou post-tension) dont le but est de reprendre les efforts principaux de traction. Les efforts secondaires de traction (cisaillement, efforts localisés, diffusion des charges concentrées...) sont quant à eux repris par les fibres.

Cette conception de structures sans aciers passifs ouvre la voie pour les concepteurs à l'emploi de nouvelles formes, les contraintes liées au façonnage et à l'enrobage des armatures ayant disparu.

9. Fabrication et mise en œuvre

La fabrication et la mise en œuvre du BPR ne nécessitent pas de matériels spéciaux, mais doivent respecter un certain nombre de règles particulières.

9.1. Réception et stockage des composants

Dans le cas où le BPR est fabriqué à partir d'un premix, il suffit de stocker les sacs à l'abri des intempéries.

Si l'on utilise séparément chacun des composants, ceux-ci ne doivent pas subir de variations importantes de composition et il convient de vérifier leurs caractéristiques par lot, au départ des usines productrices et à l'arrivée sur le site de fabrication du BPR. Les poudres doivent être livrées sèches et stockées dans des enveloppes fermées (sacs étanches pour petites quantités, silos pour grandes quantités). Les fibres doivent également être livrées et conservées aussi sèches que possible, et stockées à l'abri des intempéries.

9.2. Études préalables

Chaque formule de BPR, comme pour un béton classique, doit faire l'objet d'une épreuve d'étude et d'une épreuve de convenance. L'utilisation d'un premix permet de réduire leur volume.

- Épreuve d'étude : c'est l'étude de laboratoire qui détermine une formulation de base, en fonction du cahier des charges prévu pour le chantier et des matériaux disponibles.
- Épreuve de convenance : c'est la phase la plus importante des études. Elle consiste à choisir, à partir de la formulation de base déterminée à l'épreuve d'étude, la formule définitive avec les moyens

réellement utilisés pour le chantier, c'est-à-dire les dosages et leurs tolérances ainsi que les cycles de fabrications.

En outre, l'épreuve de convenance permet d'ajuster le mode et les moyens de mise en œuvre du BPR, pour parvenir au résultat souhaité, pour chaque pièce coulée.

10. Applications

En exploitant de façon optimale une ou plusieurs propriétés du matériau – résistance mécanique, durabilité, capacité de moulage, stabilité dimensionnelle – il est possible de développer des applications où le BPR se présente comme un concurrent de nombreux matériaux, dont l'acier, l'aluminium et la fonte. Ses applications dépassent alors le simple cadre du bâtiment et du génie civil.

- **Génie civil et bâtiment :**

- structures triangulées : la passerelle de Sherbrooke est une structure triangulée de 60 m de portée. Elle illustre un des modes d'emploi du BPR : recherche de la légèreté alliée à une grande rigidité, sans sacrifier à l'esthétique ;
- poutres et poutrelles légères ;
- poteaux confinés ;
- dalles de ponts mixtes ;
- panneaux de façade ;
- voussoirs de tunnels.

- **Industrie :**

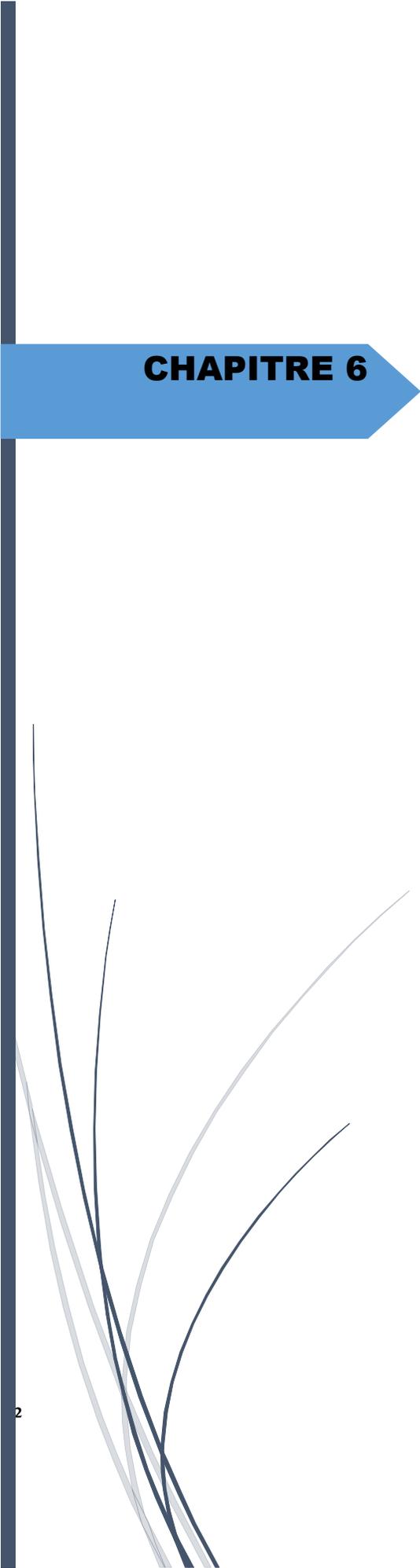
- bâtis pour machines-outils ;
- dalles d'usure ;
- pièces pour l'emboutissage.

- **Traitement des déchets. Environnement :**

- container pour le stockage de déchets radioactifs ;
- dalles filtres pour l'épuration des eaux usées ;
- coulis de blocage de déchets.

- **Protection. Sécurité :**
 - blindages légers
 - coffres-forts

Les nombreuses qualités des BFUP, permettent d'envisager une multitude d'applications aussi bien en structure de génie civil (poutres précontraintes par pré ou post tension, canalisations, conteneurs, ouvrages offshore, couvertures de grande portée, silos, réservoirs, cuves de rétention, tours de refroidissement, murs de soutènement, dalles, structures triangulées, voussoirs de tunnels, etc.) qu'en bâtiment (poutres, poteaux élancés, planchers de grande portée, etc.) et leur utilisation dans des applications innovantes jusque-là inaccessibles au matériau béton et réservées à d'autres matériaux .



CHAPITRE 6

**BETON A BASE DE
POLYMERES**

CHAPITRE 6 : BETON A BASE DE POLYMERES

1. Introduction

Ces dernières années, les innovations techniques dans l'industrie du bâtiment ont progressé considérablement, car la recherche et le développement des matériaux de construction à rendement élevé et multifonctionnels ont été activement poursuivis pour faire face aux problèmes posés par les industriels du bâtiment. En particulier, cette tendance est marquée par nouvelles frontières dans l'industrie du bâtiment, ou la réalisation de grands ouvrages tels que les grands gratte-ciel, les tunnels sous la mer, et les développements bas lunaires dans les pays avancés. Ceci est dû grâce au développement courant des matériaux de construction de faible coût, écologique et d'économiser de l'énergie. Parmi ces nouveaux bétons, on a le béton-polymères.

2. Définition du béton polymère :

Le béton polymère (BP) est un matériau fabriqué en remplaçant totalement ou partiellement le ciment par un polymère. La recherche et le développement des bétons et mortiers polymères ont connu un grand essor dans différents pays occidentaux depuis les années 1980. Comme le remplacement du ciment Portland par un polymère entraîne une augmentation sensible du coût du béton, il ne faudrait le faire que si l'on recherche des caractéristiques supérieures, si le coût de la main d'œuvre est moins élevé ou si les besoins en énergie lors de la fabrication et de la mise en œuvre sont moindres.



Figure VI.1. Béton polymères.

3. Définition d'un polymère

Polymère ou matière plastique : c'est une vaste gamme de matériaux extraits artificiellement de substances organiques et formés par échauffement, ils sont appelés plastiques, car à une certaine étape ils sont plastiques.

Chimiquement : c'est une substance composée de molécules de masse moléculaire élevée (macromolécules), généralement constituée par la répétition d'atome ou de groupes d'atomes,

Exemple :

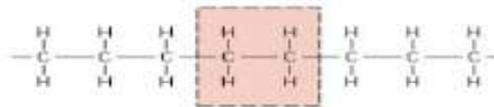
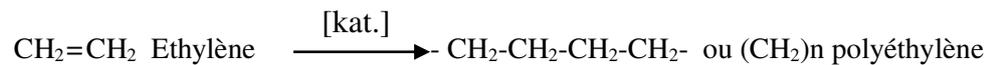


Figure VI.2. Formule chimique du polyéthylène.

4. Classification des polymères selon les propriétés

Il existe 03 groupes de polymères synthétiques :

- Thermoplastes ou thermoplastiques : exemple le polychlorure de vinyle (PVC) : $(\text{CHCL}-\text{CH}_2)_n$: utilisé pour la tuyauteries d'eau potable ou usée, pour les gaines de ventilation, les profilés de menuiserie (fenêtres), les revêtements muraux ou de sol. Et les polystyrènes utilisés pour les isolations thermiques.
- Elastomères : comme le caoutchouc silicone et le caoutchouc naturel utilisé pour l'étanchéité et pour la diminution des vibrations dans les bâtiments.
- Thermodurcis ou thermodurcissables : exemple la Résine polyester insaturé (UP) et la Résine époxyde (EP) : Les résines sont des matières plastiques thermodurcissables, c'est-à-dire qu'elles durcissent (à température ambiante) grâce à l'association d'un accélérateur et d'un catalyseur qui provoquent une exo-thermie (élévation de la température de la résine).

5. *La composition principale d'un béton polymère :*

Le béton de résine commence à prendre place dans le marché des matériaux de construction de grande diffusion. Désigné sous l'appellation de béton de résine synthétique, de béton de résine plastique ou de béton de polymère.

Le béton de résine (polymère) est formé par un squelette granulaire (les granulats) et un liant polymère (résine) parfois thermoplastique mais dans la plupart des cas thermodurcissable.

a) Le liant (la résine)

Les résines sont des produits synthétiques ayant une adhésivité exceptionnelle. Par polymérisation, les résines durcissent rapidement en présence d'un catalyseur. Du fait de ces propriétés, nous pouvons les utiliser comme « liant » dans la confection de certains bétons.

En raison de leur faible coût, les liants de résine les plus utilisés sont ceux à base de polymère de polyester insaturé.

b) Les granulats

Ils forment le squelette du béton et ils jouent donc un rôle très important dans la composition et la fabrication des bétons en général et le béton de résine en particulier. Ils influent les propriétés mécaniques et physiques du produit fini.

Les granulats utilisés dans la plupart des cas sont des sables de quartz de granulométrie différente. Le gravier utilisé (max 16 mm) et en partie le sable (0,1 à 0,7 mm) sont considérés comme des granulats à granulométrie supérieure tandis que la farine (0,1 à 0,3 mm) et les particules encore plus petites (< 0,1 mm) sont considérées comme des granulats fins

Le bon choix des granulats entraîne une augmentation du module d'élasticité, de la résistance en flexion et en compression ainsi que de la dureté.

6. *Caractéristiques intrinsèques du béton polymère :*

6.1. Caractéristiques mécaniques

La qualité principale du Béton Polymère est sa résistance mécanique. Après polymérisation, il atteint une résistance à la compression et à la flexion très importante par rapport à un béton hydraulique standard.

Ceci permet de réaliser des éléments plus fins, tout aussi résistants mais surtout beaucoup plus légers

Le béton polymère représenté les caractéristiques mécaniques suivantes :

- Valeur de compression d'un béton polymère : 80 – 110 MPA.
- Valeur de flexion par traction d'un béton polymère : 20 – 24 MPA
- Module d'Young d'un béton polymère : 21 300 MPA.
- Abrasion : 1,15

6.2. Physiques et chimiques

- Une bonne résistance aux phénomènes de gel/dégel ;
- Légèreté accrue par rapport aux ouvrages en béton classique ;
- Résistance au sel marin et au sel de déneigement ;
- Résistance totale aux agressions des effluents et ce sans aucun traitement : résistance du ph 1 à 14 ;
- Résistance totale à l'H₂S ainsi qu'aux produits chimiques ;
- Possibilité de teindre le produit en pleine masse ou de le colorer.

7. Avantages et les inconvénients du Béton Polymère

Voici quelques-unes des principales caractéristiques du béton polymère :

- Le Béton Polymère possède des caractéristiques mécaniques supérieurs à un béton classique ce qui permet d'obtenir des épaisseurs et un poids moindre par rapport à des ouvrages en béton armé, facilitant ainsi la manutention et la pose.
- Capacité de production et de livraison très importante, le béton polymère est sec en 20 minutes et obtient sa résistance maximale en 16 heures.
- 100 % étanche dans la masse.
- Vieillessement sans fissuration ni décrochage, ce qui rendra vos projets esthétiques durables dans le temps.
- Résistance totale au sel marin et au sel de déverglaçage.
- Résistance totale aux phénomènes de Gel/Dégel (aucune présence d'eau + parfaite étanchéité).
- Aucune présence d'acier dans le béton polymère, de ce fait aucun risque d'éclatement, de chute de morceaux ou de coulure de rouille pour un aspect esthétique garantie à long terme.
- Résistance totale aux agressions et ce sans aucun traitement : résistance du ph 1 à 14, à l'H₂S, à un très grand nombre d'acides et aux hydrocarbures (voir tableau à la fin du dossier).
- Le phénomène d'auto curage est accentué par un aspect parfaitement lisse sur les surfaces techniques évitant tout risque de dépôts, même lors de débits très faibles ;

- Excellente tenue à l'abrasion : notre coefficient d'abrasion (≥ 1) permet de conserver les qualités hydrauliques de nos ouvrages durant des décennies. Le béton polymère est donc compatible avec des vitesses d'écoulement élevées.
- Possibilité de teinter le béton polymère en pleine masse et de la couleur voulu.

Les inconvénients du béton polymère par rapport au béton traditionnel sont :

- Le cout de la matière première (principalement le liant) est plus élevé (jusqu'à 8 fois) comparé à celui des bétons hydrauliques.
- Ces bétons se caractérisent par une mauvaise odeur et une toxicité provenant de la partie.
- liante du matériau c'est-à-dire la résine et le durcisseur pendant le malaxage et la mise en œuvre.
- résistent beaucoup moins bien à la chaleur que le béton ordinaire.

8. Les différentes applications d'un béton polymère :

Béton polymère est utilisé pour de nombreux types de projets de construction spécialisés.

Comme d'autres types de béton, il peut être utilisé pour assembler deux composants différents ou de fournir une structure ou une base. Le matériau est utilisé dans la construction électrique ou industrielle où le béton doit durer longtemps et être résistant à de nombreux types de corrosion.

8.1. L'utilisation des bétons polymère dans les bâtiments domaine de génie civil

Utilisé essentiellement dans la production du marbre artificiel, l'industrie de façades , s'est enrichie avec l'utilisation du béton polymère comme matériau de revêtement avec des différentes formes de ces dernières de plus en plus complexes de point de vue architecturale et les exigences économiques et techniques plus stricts.



Figure VI.3. Façades en béton polymère.

8.2. L'utilisation des bétons polymère dans l'horticulture

Le béton polymère est utilisé pour fabriquer des petites formes et des bacs pour les plants. Ces conteneurs sont à déplacer selon les conditions météorologiques et c'est ici que réside l'avantage de profiter de béton polymère plus léger et robuste.



Figure VI.4. Quelques applications du béton polymères (Vasque –chaise).

8.3. L'utilisation des bétons polymère pour les revêtements des chaussées et planchers

Les planchers qui sont réalisés par le béton polymère dans les établissements industriels sont constamment exposés à des actions mécaniques permanentes exercées par les engins de transport, les vibrations, les impacts, l'abrasion, l'action des agents chimiques. De même pour les chaussées, le mouvement intensifs des véhicules lourdes essentiellement réduit énormément

Le freinage à temps et cause l'usure de la surface du béton. Les investigations basées sur des essais en laboratoires et in-situ pour une période de 10 ans ont démontré l'efficacité de cette technique si la résine est bien choisie.



Figure VI.5. Le pont mythique (New York Mania)



Figure VI.6. Plancher en béton polymère.

8.4. L'utilisation des bétons polymère dans les travaux de drainage et hydrauliques

L'utilisation du béton polymère pour la fabrication des différents systèmes de drainage et le réseau de canalisation, est très répandue comme résultat de la faible absorption d'eau et une résistance exceptionnelle au gel-dégel. Par conséquent, les éléments fabriqués en béton polymère peuvent avoir jusqu'à 15 mm d'épaisseur (réduction de 1/3 du poids par rapport au béton cimentaire)



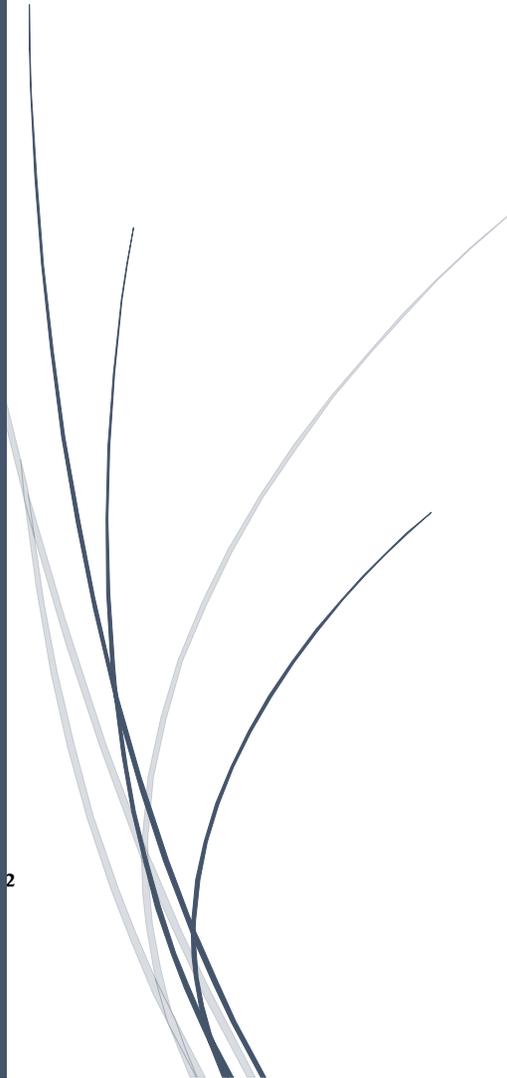
Figure VI.7. Canal de drainage en béton polymère.

8.5. L'utilisation des bétons polymère dans l'industrie

Le béton polymère est fortement recommandé dans la construction des usines chimiques et dans la fabrication des équipements minière (électrolytiques, réservoirs, puits).



REFERENCES



Références

- [1] ZAIDI S., LABADLIA K., « l'influence des adjuvants sur la composition des bétons autoplaçants », mémoire de master, Université 08 MAI 1945 Guelma, Juin 2016.
- [2] Connaissances fondamentales, « les essais sur bétons frais, laboratoire de la matière ». Janvier/Février 2010, n° 26, béton [s].
- [3] Guide pratique du béton, « Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables ». Editeur: Holcim (Suisse) SA , 6ème édition 2015.
- [4] COLLECTION TECHNIQUE CIM BÉTON G11, « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre ». FICHES TECHNIQUES, TOME 2, 2013.
- [5] DREUX G., FESTA J., « Nouveau guide du béton et de ses constituants » Huitième Editions Eyrolles. 1998.
- [6] DE SCHUTTER G., APERS J., « Le béton à hautes performances », bulletin publié par : fédération de l'industrie cimentaire Belge FEBELCEM, 2007.
- [7] COLLECTION TECHNIQUE CIM BÉTON B90G, Cahier des modules de conférence pour les écoles d'architecture : « Des bétons courants vers les bétons aux nouvelles performances », 2006
- [8] ASSOCIATION FRANÇAIS DE GENIE CIVIL, « Béton auto-plaçant : Recommandation provisoires», document scientifique et technique, AFGC juillet 2000.
- [9] LA NORME NF EN 206-9, « Règles complémentaires pour le béton auto-plaçant », 2010.
- [10] Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton, réalisé par Association béton Québec en collaboration avec les manufacturiers des fibres métalliques et fibres synthétiques, 2005
- [11] CHERKAOUI K., « Caractérisation de la microstructure et comportement à court et long terme d'un Béton de Poudre Réactive Extrudable », thèse de doctorat Discipline : Physico-chimie. Université d'Evry-Val d'Essonne, 2010
- [12] CHADLI M., « Etude des performances des bétons de poudres réactives fibrés », Thèse de doctorat en Génie Civil. Université Mohamed khider , Biskra, 2019.
- [13] REGIS A., « Béton de poudres réactives », article de techniques de l'ingénieur. Relu et validé le 10 février 2015. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/les-betons-dans-la-construction-42221210/beton-de-poudres-reactives-c2216/definition-du-bpr-c2216niv10001.html>
- [14] ZANACHE N., BEZAZI A., BOUCHELAGHEM H., BOUMAAZA M., AMZIANE S., SCARPA F., « Etude statistique et Caractérisation Mécanique des Bétons Polymères Sollicités en Flexion », 22ème Congrès Français de Mécanique, Lyon, 24 au 28 Août 2015.
- [15] CHERCHARI S., « Étude comparative du comportement d'un béton polymère à matrice organique thermdurcissable et thermoplastique ». Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2016.
- [16] BENKERROUCHE A., OURIDA M., « Formulation et caractérisation d'un béton polymère renforcé par des fibres végétales et filler de brique ». Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2017.