

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Mohammed Khider - Biskra -



Faculté d'architecture, Génie Civil, Hydraulique`
Département de Génie Civil et hydraulique

POLYCOPIE

Bétons innovants 1



Destiné aux étudiants de 1ere année Master option : Matériaux en génie civil

Zeghichi Leila

Année 2025 -2026

Avant-propos

Le présent polycopié est constitué de cours du deuxième semestre du programme LMD, destiné aux étudiants de la première année Master Matériaux en génie civil au sein du département de Génie Civil & Hydraulique de l'Université Mohammed Khider - Biskra -

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le monde en raison de ses performances exceptionnelles, il permet les défis audacieux en ce qui concerne les formes, les conceptions architecturales complexes ; ces innovations ne cessent pas d'étonner les maitres d'ouvrages. La facilité de mise en œuvre du béton et son faible cout (en comparaison avec d'autres matériaux) le rend le plus consommé par l'homme après l'eau.

Ce document présente un cours sur les bétons innovants. Il introduit les différents types de bétons comme : les bétons à hautes, les bétons autoplaçants,dont le but est de familiariser les étudiants avec ces nouveaux bétons, en mettant l'accent sur leurs aspects techniques.

Le polycopié se limite à neuf chapitres, dans le premier chapitre on présente les différentes propriétés des matériaux, le second chapitre traite les bétons hautes performances, le troisième expose les bétons autoplaçants. Dans le quatrième chapitre on s'intéresse aux bétons fibrés puis dans le chapitre cinq les bétons de poudre réactive sont détaillés avec des exemples de réalisation. Le sixième chapitre traite les bétons de polymère, le septième expose les bétons légers suivis par les bétons lourds dans le huitième chapitre. Le dernier chapitre est consacré aux bétons à granulats recyclés.

Enfin le document est clôturé par une liste de références servant à la rédaction de ce polycopié.

Table des matières

Introduction :	1
1. Définition :	1
Figure 1.1 : définition du matériau	1
2. Classification des matériaux:.....	1
3. Les propriétés des matériaux :	3
5. Les performances des matériaux :	6
Introduction :	10
Comment obtenir un tel béton ?	10
2- Composition de BHP :	11
3. Choix des matériaux :	14
5. Les propriétés des BHP :	15
6. Les performances des BHP :	16
7. Les avantages des BHP et BTHP :	17
8. Les inconvénients des BHP et BTHP :	17
9. Domaine d'utilisation des BHP et BTHP :	17
Introduction :	19
1. Définition des BAP :	19
2. Comportement des BAP :	19
3. Composition des BAP :	19
4. Les constituants des BAP :	20
5. Propriétés des BAP à l'état frais.....	21
6. propriétés des BAP à l'état durci :	24
7. Formulation des BAP :	24
8. Fabrication des BAP.....	25
9. Domaines d'application :	26
10. Avantages :	26
Introduction :	29
1. Définition :	29
2. Les fibres :	29
2.1. Rôle des fibres :	29
2.2. Types de fibres :	30
3. Composition de béton fibré :	32
4. Formulation du béton de fibres.....	33
Figure 4.4 : comportement ductile des bétons fibrés.....	34
5. l'adhésion fibre – matrice :	34

7. Propriétés des bétons fibrés :.....	35
Introduction :	40
1. Définition :	40
2. Principes fondamentaux :	40
4. Performances et propriétés spécifiques :	43
5. Formulation des BPR :	44
6. Structure minérale des BPR :	45
7. Réalisations en BPR :.....	46
Introduction :	50
1. Définition :	50
2. Types du béton de polymère :	50
3. Composition du béton polymère :	51
4. Les caractéristiques principales des bétons polymères :	54
4.1. Caractéristiques mécaniques d'un béton BP	54
4.2 Caractéristiques chimiques d'un béton polymère :	55
4.3. Caractéristiques physiques d'un béton polymère :	55
5. Propriétés de béton polymère :	55
6. Les avantages d'un béton polymère :	56
8. L'utilisation des bétons polymère dans le domaine de génie civil :	56
1. Définition.....	58
2. Type des bétons légers :	58
2.1.1.1 - Les granulats légers naturels :	59
A. Granulats minéraux :	59
2 .1.2 Caractéristiques des granulats légers :	62
2.2. Béton caverneux :	62
2.3.Béton cellulaire :	62
2.3.1 : structure du béton cellulaire :	63
4. Les propriétés des bétons légers :	64
4.2. La légèreté :	64
4.3. La résistance à la compression :	64
4.4. Conductivité thermique :	65
5. Classification des bétons légers :	66
6. Différence entre les bétons classiques et les bétons légers :	66
7. Domaine d'utilisation des bétons légers :	67
8. Avantages du béton léger :	67
9. Désavantages de béton léger :	68
1. Définition :	71
2. Compositions des bétons lourds	71

3. Composition des bétons lourds :	73
4. Propriétés des bétons lourds :	74
5. Fabrication et mise en œuvre :	75
6. Domaines d'application :	75
1. Définition :	77
2. Intérêt de l'utilisation du béton recyclé :	77
3. Description du granulat recyclé :	78
4. Préparation des granulats recyclés.....	79
5. Les propriétés des granulats recyclés :	79
6. Les propriétés du béton de granulats recyclés :	80
7. traitement des GR :	83
8. Domaine d'utilisation des granulats recyclés :	84
Références :	85

Chapitre 1 :
Propriétés et performances des matériaux

Introduction :

Les matériaux sont utilisés pour fabriquer des objets ; ils présentent les propriétés qui les caractérisent ; donc les propriétés des matériaux déterminent le domaine de leur application.

1. Définition :

Un matériau est un ensemble de substances élémentaires qui, une fois assemblés, permettent de réaliser des objets. Ainsi l'acier contient de fer et de carbone ; le verre est constitué de sable et de la potasse, le ciment est constitué d'un mélange de calcaire et d'argile.

Ces matériaux présentent tous les propriétés physiques et mécaniques qui les caractérisent. L'acier se caractérise par sa résistance et sa conductivité ; les céramiques par leurs résistance à la chaleur,

Un matériau est le résultat d'une synthèse entre la mise en œuvre, la microstructure, les propriétés intrinsèques et la performance comme indiqué sur la figure.1.1

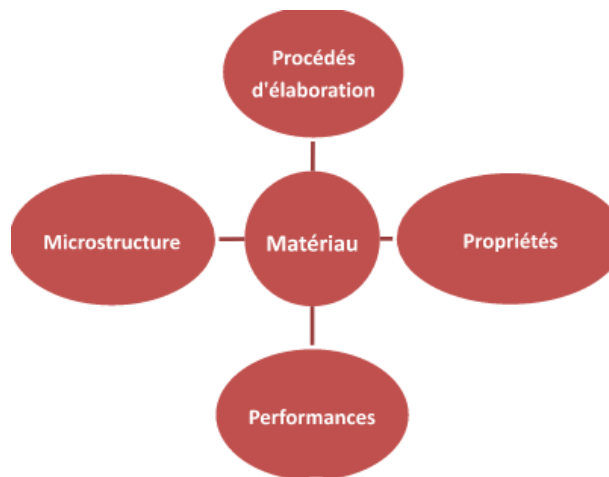


Figure 1.1 : définition du matériau

2. Classification des matériaux:

Dans la science des matériaux, selon la composition et la structure, les matériaux sont classés comme suit :

- Métaux et alliages
- Polymères
- Céramiques et verre
- Composites
- Matériaux naturels

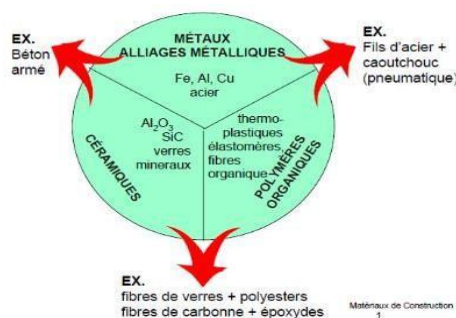


Figure 1.2 : classification des matériaux

2.1. Métaux et alliages :

-**Le métal** : est un corps simple d'un éclat particulier, bon conducteur de chaleur et d'électricité. Dans la nature, les métaux sont sous forme de sels très stables, le plus souvent des oxygènes ou des sulfures ; Il faut une grande quantité d'énergie pour les réduire et obtenir l'état de métal. L'état cristallin procure aux métaux des propriétés mécaniques importantes (ductilité).

-**Un alliage** : est une combinaison d'un élément métallique avec un ou plusieurs métaux par fusion afin d'améliorer ses caractéristiques mécaniques (acier = fer + 0.2 à 2% de carbone)

2.2 Les céramiques :

Ce sont des matériaux inorganiques, non métalliques nécessitent de haute température lors de leur fabrication ; ils sont obtenu par réaction d'un métal et d'un metalloïde léger ; la cohésion de ces solides repose sur des liaisons ion covalente (très forte liaison).

On peut séparer les céramiques en deux grandes familles :

- **les céramiques naturelles** : sable, quartz,.....les roches

- **les céramiques de synthèse** : verre, terre cuite,....

2.3 Les polymères :

Les polymères organiques proviennent de la polymérisation de molécules organiques légères souvent simples (les monomères) ; se sont des macromolécules constituées d'un enchainement d'un grand nombre d'unités de répétition d'un ou plusieurs monomères.

Ethylene: $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$.

Polyéthylène: $\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2$ $[\text{CH}_2 - \text{CH}_2]_n$

Polypropylène : $[\text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_3]_n$

Selon le comportement thermique les polymères sont classés en :

-Les thermoplastiques : (PE –PVC- PC).

-Les thermodurcissables : silicone - Polyuréthane

-Elastomères.

2.4 Les matériaux composites :

Ils sont obtenus par mélange de matériaux provenant chacun de l'une des trois classes précédentes, qui conjuguent leurs propriétés pour améliorer les performances d'un objet.

Les propriétés des composites se trouvent modifiées de façon continue par la proportion de chaque composant ; ils forment un compromis de comportement mécanique entre les composants de propriétés opposées, l'un est très dur et l'autre mou, mais le premier est fragile, le second est très tenace.

L'industrie aéronautique n'est plus concevable sans les matériaux composites et même l'industrie automobile les utilise de plus en plus.

Les composites sont généralement composés d'une matrice et un renfort.

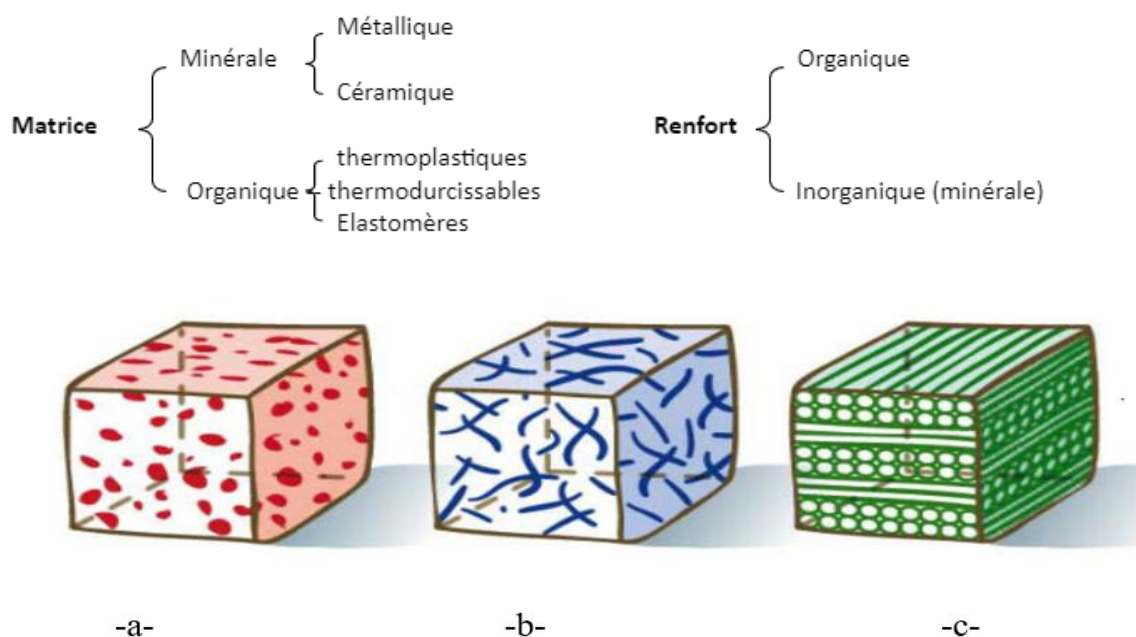


Figure 1.3 : matériaux composites a : à particules b: à fibres c: laminé

2.5 Les matériaux naturels :

- Les roches : ils constituent les matériaux les plus pondéreux utilisés par l'homme, ils servent aux ouvrages du génie civil (murs...)
- Le bois et ses dérivés : les espèces de bois sont nombreux et variés et légers renouvelables dans la nature.
- Les fibres végétales

Les différentes classes de matériaux sont classées dans le tableau 1 :

Tableau 1.1 : classification des matériaux

Métaux et alliages	Fer et aciers- aluminium et alliages – cuivre et alliages – nickel et alliages – titane et alliages
Polymères	Polyéthylène (PE) –polystyrène (PS) –polychlorure de vinyle (PVC)- nylon ou polyamide (PA) – caoutchouc naturel (CN)
Céramiques et verres	Alumine – manganèse – verre de silice ou les silicates – carbure de silicium –ciment et béton
Composites	Polymères renforcés par fibre de verre (PRFV) Polymères renforcés par fibre de carbone (PRFC) Polymères chargés
Matériaux naturels	Bois – cuir – laine – soie – roches – craie – sable – silex – agrégats

3. Les propriétés des matériaux :

Les matériaux possèdent plusieurs caractéristiques qui leur sont propres ; et qui sont prises en compte lors de la fabrication d'un objet et de son utilisation. Elles permettent :

- D'identifier une substance ou un objet
- De déterminer l'usage qui peut être fait d'une substance ou d'un objet
- De prévoir l'effet d'une substance ou d'un objet sur l'environnement.

Les classes de propriétés des matériaux sont résumées dans le tableau 2 :

Tableau 1.2 les différentes propriétés des matériaux

Propriétés physiques : Une propriété physique est une propriété qui se manifeste sans que la nature d'une substance ne soit modifiée	-Masse volumique - point de fusion - point d'ébullition
Propriétés mécaniques : Une propriété mécanique est une propriété caractéristique d'un matériau qui décrit son comportement lorsqu'il est soumis à une ou plusieurs contraintes mécaniques	-module d'élasticité -limite d'élasticité – résistance à la traction -dureté –ténacité -résistance à la fatigue –résistance au fluage
Propriétés chimiques : une propriété chimique décrit le comportement d'une substance lorsqu'elle prend part à une réaction chimique	-oxydation -réaction au contact d'un acide -corrosion – usure
Propriétés thermiques : Les propriétés thermiques des matériaux sont des grandeurs qui caractérisent leur comportement lorsqu'ils sont soumis à une variation de température	-conductivité thermique -coefficient de dilatation thermique -capacité calorifique spécifique
Propriétés esthétiques : Idéales qui se rapportent à la beauté	-couleur –texture –toucher
Aptitude à la mise en œuvre	-facilité de la mise en forme -assemblage -finition
Propriétés optiques : décrivent la capacité des matériaux à interagir avec la lumière, incluant la réfraction, la réflexion et l'absorption.	-transparence - indice de réfraction

Les différentes propriétés des matériaux sont définies comme suit :

- **Légèreté** (faible densité) :Caractéristique d'un matériau dont la masse volumique est faible comme La fibre de carbone, Le polystyrène
- **Conductivité thermique** : Capacité de laisser passer la chaleur comme Le cuivre, La fonte
- **Conductivité électrique** : Capacité de laisser passer le courant électrique comme Le cuivre, L'or
- **Ductilité** : Capacité de s'étirer sans se rompre et de conserver sa nouvelle forme comme Le cuivre
- **L'élasticité** : Capacité de se déformer, puis de reprendre sa forme initiale comme Le caoutchouc

- **La dureté** : Capacité de résister à la pénétration et aux rayures comme l'acier
- **Fragilité** : Capacité de se casser facilement comme le verre, la porcelaine
- **La malléabilité** : Capacité de s'aplatir ou de se courber sans se rompre et de conserver sa nouvelle forme comme l'aluminium.
- **La résilience** : Capacité de résister aux chocs comme la fonte
- **La rigidité** : Capacité de résister à la déformation comme le béton armé.
- **La ténacité** : la capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture. Elle caractérise la résistance du matériau à la propagation de fissures.

4. les propriétés des différentes classes des matériaux :

Les différentes propriétés des matériaux sont regroupées dans le tableau 1.3 :

Tableau 1.3 : Les propriétés essentielles des différentes classes de matériaux.

Propriétés	Métaux et alliages	Céramiques	Polymères	Composites
Propriétés physiques	-solide atomique de grande densité moyenne (1.8 à 12) -cohésion par liaison métallique -température de fusion moyenne 300 -1500°C -cristallisés -très bons conducteurs électriques et thermiques	-solide moléculaire de densité moyenne (2 à 6) -cohésion par liaison ionocovalente -température de fusion très élevée (600 à 3000) -amorphes ou cristallisés	-solide moléculaire de faible densité (0.9 à 2) -cohésion par liaison faible ou covalente -température de fusion faible -isolants thermiques et électriques -dilatation thermique importante -amorphes ou partiellement cristallisés	-légèreté -isolants électriques
Propriétés mécaniques	-déformable et tenace	-grande dureté et - rigidité élevée -fragiles	-faible résistance - faible rigidité	-grande résistance à la fatigue
Propriétés chimiques	-sensible à l'oxydation	-inertes jusqu'aux hautes températures	-réactivité chimique très variable (faible dans les conditions ambiantes) -sensible au vieillissement et à la lumière	
Procédés	-plusieurs procédés de mise en œuvre -recyclable	-recyclage difficile -assemblage difficile -procédés anciens +sophistiqués	-procédés faciles et nombreux -recyclage peu efficace	

4.1 Comportement mécanique des matériaux :

Les matériaux sont classés en trois groupes selon leur comportement mécanique :

- des matériaux fragiles
- des matériaux ductiles
- des matériaux à comportement non linéaire (la déformation non proportionnelle à la charge)

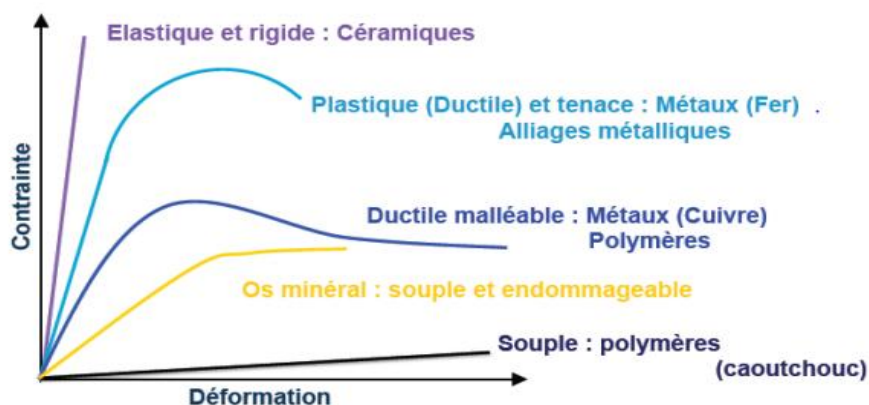


figure 1.4 : courbes contraintes - déformation des matériaux

5. Les performances des matériaux :

Les performances d'un matériau se traduisent par une combinaison de ses propriétés, sa sélection est souvent favorisée par l'utilisation d'un indice de matériau ou d'un indice de performance correspondant aux propriétés de matériau souhaitées.

Les choix sont faits en fonction des propriétés (du matériau, du procédé, ...), alors que les critères justifiant les choix portent sur les performances (du produit).

5.1 Critères de la sélection des matériaux

Le choix des matériaux doit passer par les étapes suivantes :

- Identifier la fonction principale du composant. Une poutre supporte des charges de flexion, une barre des charges de traction...
- Identifier l'objectif : c'est la première et la plus importante quantité que l'on souhaite minimiser ou maximiser. Souvent le poids, ou le coût ; mais aussi l'énergie stockée par unité de volume ou de poids (un ressort).....
- Identifier les contraintes : des exigences de conception peuvent limiter le procédé

d'optimisation de l'étape précédente. Rigidité minimale, charge/moment/couple de torsion/pression admissible maximal(e), une limite sur la température d'utilisation, sur le taux de recyclabilité...

L'ensemble des performances des matériaux sont regroupées dans le tableau 5 :

Tableau 1.5 : les performances des matériaux

Performances techniques	-fiabilité -durabilité - reproductibilité -aptitude à la mise en œuvre -usinabilité
Performances socio –économiques	-disponibilité -nocivité -aptitude au recyclage -cout

***Chapitre2 :
Béton à haute performance***

Introduction :

Dans le domaine du génie civil, les années 80 ont marqué une étape importante dans l'évolution du béton, matériau, le plus utilisé partout à travers le monde avec l'avènement des bétons à bétons hautes performances (BHP).

Les bétons hautes performances (BHP) ont d'abord été utilisés pour leur haute résistance qui est passée de 30-35 Mpa à plus de 100 Mpa pour les BHP voire plus de 150 à 200 Mpa pour les bétons fibrés à ultra haute performance (BFUP).

Le gain de résistance est lié à la microstructure très dense et à la porosité réduite ; deux critères indiquant une très forte compacité et par suite une durabilité accrue.

Hautes performances signifient aussi la facilité de la mise en œuvre, des propriétés exceptionnelles à l'état frais (rhéologie) et des performances aux jeunes âges.

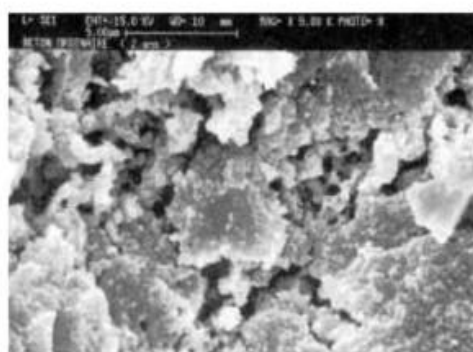
1- Définition des BHP :

Les BHP se caractérisent par une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 Mpa (sur cylindre), un rapport eau/liant équivalent inférieur à 0.4. Ils présentent aussi une microstructure très dense et une faible porosité donc se sont très résistants à la pénétration d'agents agressifs.

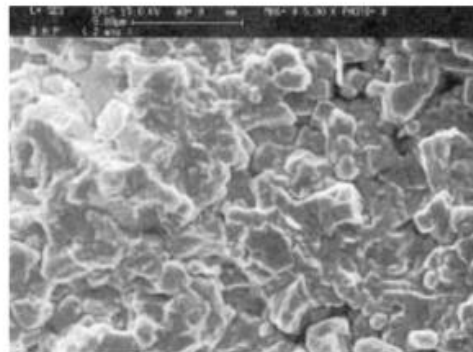
Comment obtenir un tel béton ?

La voie vers des performances plus élevées passe par :

- Diminution de la porosité de la matrice cimentaire par la réduction du rapport E/C en utilisant un super plastifiant (haut réducteur d'eau).
- Optimisation du squelette granulaire (de l'échelle centimétrique à l'échelle submicronique) par l'ajout des ultras fines (fumée de silice).



- a-



-b-

Figure 2.1 : Microstructure des bétons -a- béton ordinaire -b- BHP

2- Composition de BHP :

Les BHP se composent de granulats, d'eau, de ciment, de superplastifiants et éventuellement d'une addition (souvent une fumée de silice) :

2.1 L'eau : le rôle joué par l'eau est double :

- **Physiquement** : contribuer à l'ouvrabilité du béton frais en lui conférant une rhéologie convenable et une fluidité suffisante permettant sa mise en œuvre.
- **Chimiquement** : assurer l'hydratation du ciment.

Pour les rapports E/C inférieur à 0.4 le mélange du béton est ferme, difficile à réaliser car il n'y a plus assez d'eau pour assurer la fluidité, en plus une quantité d'air est piégée lors du malaxage ce qui crée de la porosité, faisant chuter la résistance ; donc il faut fluidifier le mélange par l'utilisation d'un super plastifiant.

2. Le superplastifiant : est un matériau organique multi composant, ces longues molécules sont des polymères avec groupements anioniques de type sulfonate ($-\text{SO}_3^-$) pour les superplastifiants poly sulfonâtes et de type carboxylate ($-\text{COO}^-$) pour les superplastifiants poly carboxylates

Après le broyage, les particules du ciment présentent de nombreuses charges électriques ou superficielles non saturées qui les amènent à flocculer quand elles sont mises en contact avec un fluide aussi polaire que l'eau.

L'action du superplastifiant passe nécessairement par son adsorption sur les particules du ciment en se fixant sur les grains il modifie la nature des charges électriques de sorte que les grains se repoussent les uns des autres : le résultat de cette action est la Défloculation et la dispersion des éléments fins, assurant ainsi une meilleure maniabilité du mélange. (Les superplastifiants carboxylates arrivent à réduire l'eau de 30%).

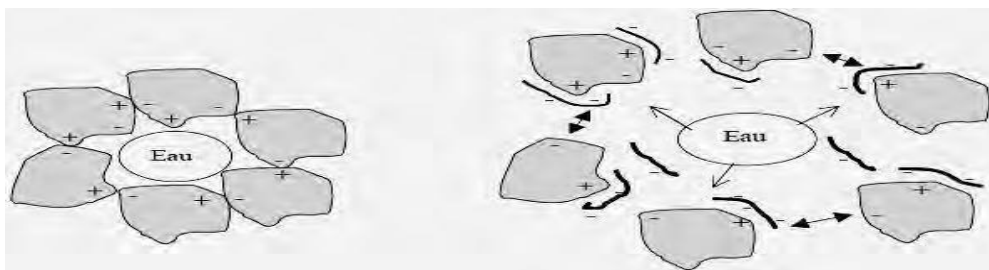


Figure 2.2 : défloculation des grains de ciment

2.2.1 Compatibilité ciment - superplastifiant : Les superplastifiants doivent être compatibles avec les ciments utilisés c.à.d. le couple ciment-superplastifiant le plus efficace permettant d'obtenir une réduction maximale de l'eau, une bonne ouvrabilité et une rhéologie

satisfaisante du béton pendant le temps de mise en œuvre.

Aïtcin définit cette compatibilité : « Si une combinaison ciment/superplastifiant permet de fabriquer un béton ayant un grand affaissement initial et de conserver cet affaissement dans le temps, il s'agit d'une combinaison compatible. Par contre, si l'affaissement initial obtenu avec le superplastifiant se perd très rapidement, il s'agit d'une combinaison incompatible

La formulation des bétons à hautes performances dépend donc du comportement du couple ciment-superplastifiant. Ce comportement est fonction de la réactivité du ciment d'une part, et de l'efficacité du superplastifiant d'autre part.

Plusieurs paramètres conditionnent la rhéologie des bétons, des mortiers ou des coulis en présence de superplastifiant. Ces paramètres peuvent être :

- les teneurs en C 3 A et en K 2 O ou alcalins en général,
- la finesse du ciment,
- la forme du sulfate de calcium (gypse, hémihydrate ou anhydrite) et sa proportion ajoutée,
- la nature chimique du superplastifiant (polycondensat de naphthalène sulfoné et de formaldéhyde, polycondensat de mélamine sulfonée et de formaldéhyde, etc.) et surtout sa masse moléculaire,
- les dosages en superplastifiant et le mode de son incorporation.

L'étude de la compatibilité ciment-superplastifiant peut se faire sur coulis en utilisant un essai d'écoulement du type cône de Marsh.

2.2.2 Dosage du superplastifiant : l'efficacité du superplastifiant est fonction de son dosage, mais à partir d'un dosage déterminé l'effet de dernier n'est pas significatif, pour déterminer le dosage optimal on doit déterminer le point de saturation du superplastifiant, au-delà de ce point aucune amélioration est perceptible. Il est déterminé par la mesure du temps d'écoulement de la pâte après 5 min et 60 min de malaxage pour chaque dosage en superplastifiant comme indiqué sur la figure 2.3.

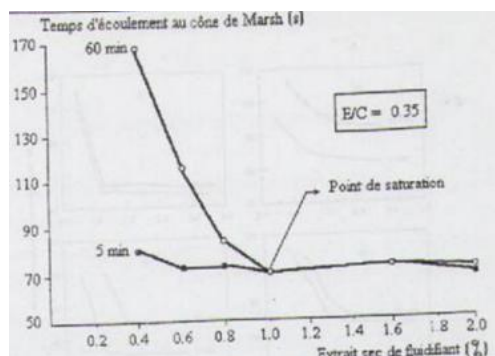


Figure 2.3 : point de saturation

2.3. Ciment : conforme à la norme (NF EN197-1) de type CEMI, CEMII ou CEMIII, de classe de résistance 42.5 ou 52.5 (N ou R) . 52.5 R si une résistance initiale est souhaitée. Avec un dosage important de (450 à 550 Kg/ m³).

2.4. Additions : le rôle des additions telle que la fumée de silice ou les cendres volantes est granulaire mais également chimique .en effet ces constituants ont une réaction chimique lente qui permet de réduire la vitesse de dégagement de chaleur accompagnant l'hydratation, de plus la réaction pouzzolanique de la fumée de silice consiste à créer des hydrates supplémentaires et de taille inférieure assurant une plus grande résistance de la pâte en comblant les vides du squelette cimentaire. La morphologie des fumées de silice améliore nettement l'ouvrabilité des BHP.

Les fumées de silice permettent de diminuer la porosité du béton par deux effets :

Un effet physique (effet filler) : les microbilles de FS dont la taille varie de 0.10 à 0.15 microns remplissent les vides initiaux entre les grains de ciment .

Un effet chimique : réaction pouzzolaique : la FS riche en SiO₂ réagit avec la portlandite Ca(OH)₂ (produit d'hydratation du ciment) pour produire des CSH supplémentaires qui vont combler partiellement les vides résiduels selon la réaction



L'utilisation des ajouts minéraux dans la fabrication des bétons à haute résistance est une alternative préférable, car l'introduction d'une certaine quantité d'ajout minéral (laitier, cendre volante, calcaire ,pouzzolane ...) , qui est toujours moins réactif à très courts terme, facilite le maintien des propriétés rhéologiques du béton frais, et la perte des résistances que l'on observe à court terme, est largement compensée par les gains de maniabilité que l'on note à très courts terme.

2.5. Granulats : les granulats pour les bétons ordinaires conviennent également pour un BHP (conformes à la norme NF EN 12620) ;si une résistance supérieure est souhaitée , la résistance des granulats est d'autant plus importante d'où la recherche des granulats issus des roches dures (calcaire dur , granit , porphyres ,...),rugueux (granulats concassés), en outre le diamètre maximal du granulat ne doit pas être grand(inférieur à 16 mm). Un module de finesse pour les granulats fins de 2.7 à 3 est préférable

La composition doit être optimisée de telle sorte que la granulométrie des gros grains aux très fins soit la plus compacte possible, une composition typique peut contenir :

-Ciment : 400 -500 Kg / m³

-10% de la fumée de silice

-Super plastifiant 1 – 2 %

-Eau : 140 – 160 l / m³

-Sable : 700 Kg /m³

-Gros granulats : 1000 -1100 Kg / m³.

IL est essentiel que le béton à haute performance puisse être mis en place dans la structure en utilisant des méthodes usuelles et qu'il soit mûri de manière habituelle, même un murissement humide est nécessaire

3. Choix des matériaux :

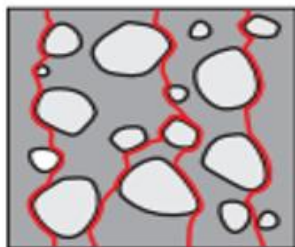
Ce n'est pas avec n'importe quel granulat, n'importe quel ciment et n'importe quel adjuvant qu'on peut fabriquer un BHP économiquement fiable. Il faut :

- Un choix plus rigoureux des constituants
- Le dosage de ces constituants

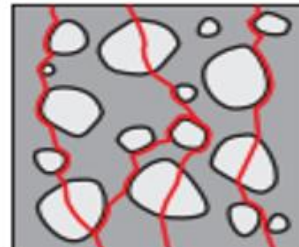
Lorsqu'on cherche à optimiser la composition d'un béton à hautes performances en un lieu donné, il s'agit de trouver le ciment ayant la plus faible réactivité rhéologique, c'est à dire celui qui fixera le moins d'eau.

De gâchage dans les instants qui suivent le malaxage, et de l'utiliser avec le fluidifiant qui entrera le moins en compétition avec les cristaux d'ettringite qui se forment dès que le ciment entre en contact avec l'eau. Le gros granulat idéal pour un béton à très haute résistance doit être très résistant à l'écrasement, avoir un module d'élasticité aussi voisin que possible de celui du mortier, de façon à minimiser les déformations différentielles au niveau de l'interface granulat/mortier, qui présente une surface favorisant l'adhérence du mortier et enfin, il ne faut pas diminuer la maniabilité du béton frais .

Le béton à hautes performances se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice sera pratiquement égale à la résistance des granulats. Dès lors, l'apparition et le développement de fissures d'adhérence ou de microfissures seront retardés. A l'approche de la rupture, les fissures se seront désormais généralement propagées au travers des granulats.



-a -



-b -

Figure 3.3 : la fissuration -a- béton ordinaire -b- BHP

4. Formulation des BHP

Il n'existe pas une méthode précise pour formuler un BHP. La formulation dépend essentiellement de la résistance ainsi des performances visées par le BHP.

La procédure de formulation choisie repose sur la méthode de l'université de Sherbrooke ; elle commence par le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés : (voir référence 1)

- Le rapport eau / liant
- Le dosage en eau
- teneur en air
- Le dosage en super plastifiant
- Le dosage en gros granulat

4.1 La cure des BHP

La faible quantité d'eau présente dans le BHP, en raison du faible rapport eau-ciment, doit demeurer dans le béton après sa mise en œuvre lors de la réaction d'hydratation . Les particules extrêmement fines qui comblent le squelette granulaire pour former un ensemble très compact et très dense empêchent la migration de l'eau du noyau vers la surface. L'eau à la surface peut s'évaporer, mais n'est pas renouvelée depuis le noyau. Les capillaires de la zone superficielle se vident dès lors progressivement et sont soumis à des contraintes de contraction sans cesse accrues, qui induisent le retrait du béton en surface. La faible résistance à la traction du béton jeune ne peut pas absorber les contraintes apparues, ce qui induit l'apparition de fissures. Le béton à haute résistance est donc plus sensible que le béton ordinaire au phénomène de la fissuration plastique. La cure du béton frais coulé est indispensable, en humidifiant les surfaces non protégées, en apposant des produits de cure pour éviter l'évaporation, ou encore en le couvrant d'un film...

5. Les propriétés des BHP :

- **Maniabilité:** l'effet lubrifiant des superplastifiants permet aux particules solides de glisser les uns sur les autres ; le matériau frais se déforme facilement, le béton s'étale et présente des affaissements généralement supérieur à 15 cm.

- **Masse volumique apparente :** de 2400 à 2500 Kg / m³.

- **Résistance à la compression:** les augmentations de la résistance à la compression se manifestent dès le jeune âge au bout de 24 heures la résistance atteint 15 Mpa , 40 MPa après

une semaine et plus de 60 Mpa après 28 jours .

- **Module d'élasticité** : un module d'élasticité supérieur à celui d'un béton classique
- **Retrait** : le retrait global des BHP est identique à celui des bétons classiques mais avec une cinétique différente (le retrait d'auto dessiccation -endogène- est supérieur par contre le retrait de dessiccation à l'état durci est plus faible en comparaison avec un béton classique).
- **Le fluage** : vu leur compacité les BHP présente un fluage plus faible que celui d'un béton classique.
- **Résistance aux agents agressifs**: la faible perméabilité des BHP leur confère une bonne résistance à la pénétration et au transfert dans la masse du béton des agents agressifs (eau de mer ; eaux sulfatées,)
- **Carbonatation**: la durabilité des BHP vis-à-vis de la carbonatation en CO_2 est plus élevée au sein de la matrice cimentaire.

6. Les performances des BHP :

6.1. Les propriétés à l'état frais : les BHP présentent une fluidité, une ouvrabilité et une aptitude au pompage, ils maintiennent leur plasticité dans le temps. (Bonne stabilité et absence de ségrégation)

6.2. Les 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 . L'ensemble des propriétés citées sont déterminées quantitativement sur le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : propriétés des BHP

Propriétés	BHP sans fumée de silice	BHP avec fumée de silice
Résistance (R_c) 1j	25 Mpa	30 Mpa
7j	50 Mpa	75 Mpa
28j	60 Mpa	80 – 90 Mpa
R_t	4.2 Mpa	5.5 Mpa
E (28 j)	24000 Mpa	52000 Mpa
E/ L	0.38	0.34
C	400 (kg / m^3)	420
Fumée de silice	/	8%

7. Les avantages des BHP et BTHP :

- ayant une grande résistance mécanique.
- permettent d'alléger le poids morts des structures.
- minimiser l'entretien.
- la durée de vie est estimée à deux ou trois fois que celle d'un BO.

8. Les inconvénients des BHP et BTHP :

- ils nécessitent une étude très fine de la formulation.
- un contrôle plus strict au niveau de la réalisation.
- Les mains d'œuvres qualifiées.
- Le cout est plus élevé de l'ordre de 15 à 20% pour passer de 35MPa à 60 MPa.

9. Domaine d'utilisation des BHP et BTHP :

- -Les ouvrages de grandes portées (ponts, Viaduc, etc.)
- Les immeubles de grande hauteur (IGH) (gratte-ciel)
- Des pièces préfabriquées très courtes, (voussoirs pour pont)
- Les ouvrages de génie nucléaire (centrale nucléaire)
- Des ouvrages en milieu marin (digues, plates formes pétrolières)



Figure 3.4 : Tour de Alto Paris - France 38 étage (152m) réalisée en 2020

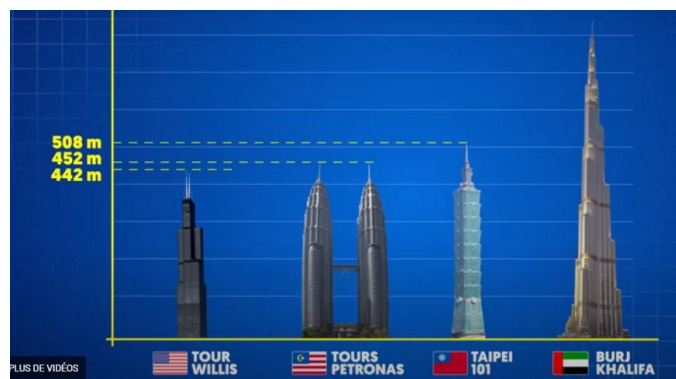


Figure 3.5 : différentes tours à travers le monde en BHP

Chapitre 3 :

Béton Autoplaçant

Introduction :

Les ouvrages actuels se caractérisent par la complexité de leurs architecture (telles que les formes variables, les courbures multiples) ainsi que leurs forte concentration en armatures ; l'idée de produire des bétons très fluides ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage est apparue comme une solution intéressante.

Le béton autoplaçant a été mis au point au Japon dans les années 1980. Depuis cette technique n'a cessé de s'évoluer notamment en Europe et aux Etats Unis. Ils s'inscrivent dans une logique de progrès qui contribue à une meilleure maîtrise de la construction des ouvrages, à la sécurité et à la santé des ouvriers.

1. Définition des BAP :

Les BAP sont des bétons très fluides qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, mêmes dans les coffrages très ferrailés, ils se distinguent des bétons ordinaires par leur comportement à l'état frais, notamment par :

- une très grande maniabilité
- une très grande stabilité vis-à-vis de ségrégation.

2. Comportement des BAP :

- Un BAP doit s'écouler sous son poids propre
- Un BAP doit également s'écouler sans apport de vibration au travers des zones confinées.
- Un BAP doit aussi avoir une bonne résistance à la ségrégation statique, il ne doit pas subir ni tassement ni ressuage.
- Le pompage est le seul moyen de transport naturel de ce type de béton ; donc il faut s'assurer de sa pompabilité
- Il doit posséder à l'état durci de bonnes propriétés mécaniques et de durabilité

3. Composition des BAP :

Les BAP sont formulés différemment des BO (bétons ordinaires), dans leur cas la pate est définie comme un mélange du ciment, de l'eau, de l'air et d'une addition minérale. Les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau qu'un BO, assez qu'un volume assez proche de sable. Cette formulation n'est pas suffisante pour atteindre la fluidité voulue, il est donc nécessaire d'ajouter un superplastifiant (dé flocculant), sans lequel la demande en eau du

mélange sera trop élevée. D'autres adjuvants chimiques tels que les agents colloïdaux (agents de viscosité) peuvent être introduits afin d'empêcher la ségrégation et d'assurer une meilleure stabilité du béton. La proportion de chaque constituant dépend de la méthode de formulation choisie.

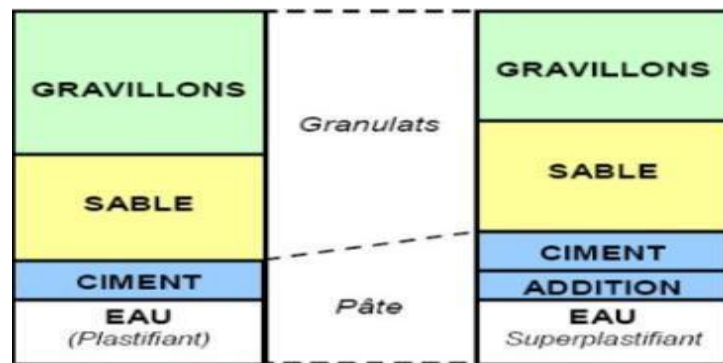


Figure 3.1 : composition des bétons ordinaires et des BAP

Les particularités de la structure des BAP peuvent être résumées en :

Un volume de pâte élevé (pour maintenir et de séparer les gravillons afin de limiter leur contact en particulier dans les milieux ferraillés).

- Une quantité importante de fines
- Un faible volume en gravillons
- Un fort dosage en superplastifiant
- L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité

4 .Les constituants des BAP :

4.1 .Ciment : tous les types du ciment (normalisé) conviennent pour la fabrication des BAP. Cependant l'utilisation d'un CPA permet de contrôler les quantités des additions minérales introduites.

4.2. Additions minérales : toutes les additions minérales peuvent être utilisées pour la formulation des BAP : fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles, les laitiers du haut fourneau, la fumée de silice (8 à 10%) et les cendres volantes.

Les cendres volantes ou les laitiers permettent d'obtenir un maintien d'ouvrabilité le plus long. La fumée de silice conduit à une augmentation de la compacité d'un BAP donc des résistances mécaniques plus élevées.

4.3. Les granulats : du point de vue performances rhéologiques, il est recommandé d'utiliser des gravillons roulés, car ils présentent un volume du vide inter granulaire plus petit que celui des granulats concassés.

Afin de limiter le risque de blocage de BAP dans les zones confinées lors de coulage il faut limiter le volume des granulats ($G/S = 1$) ainsi que leur taille (du plus gros granulat) de 10 à 20 mm.

Le sable recommandé doit comporter une quantité assez forte de fine ; le passant au tamis 2 mm devrait être compris entre 38 et 42 %.

4.4. L'eau : ne doit pas contenir des composés risquant d'affecter la qualité du béton. Le rapport E/C dans les BAP est du même ordre qu'un BO (0.5).

4.5. Les superplastifiants : ce sont des réducteurs à haute efficacité, de dernière génération à base de carboxylates, ils permettent de réduire de manière importante le dosage en eau.

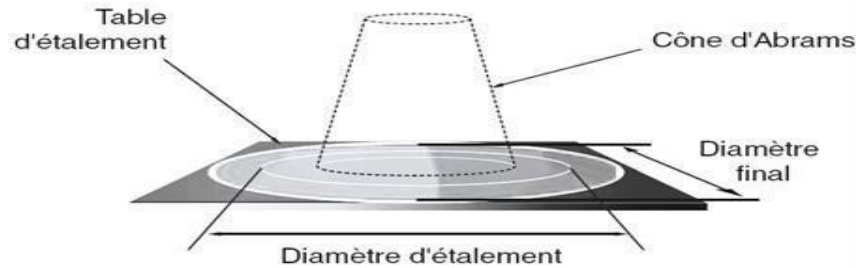
4.6. Les agents de viscosité : ils se présentent sous forme de poudre, utilisés pour améliorer la cohésion du mélange (lorsque la quantité de fines n'est pas suffisante pour empêcher la ségrégation on a recours aux agents de viscosité). La plupart de ces agents sont des polymères de longues molécules organiques qui augmentent la viscosité de l'eau ce sont de type acrylique soluble dans l'eau. Ils sont de différente nature : des dérivés cellulosiques, polymères naturels ou des suspensions colloïdales

5. Propriétés des BAP à l'état frais

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles.

5.1. Le remplissage : Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations. Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects. L'étalement du BAP doit être

entre 60 à 75 cm.



Essai au cône d'Abrams

Figure 3.2 : essai de l'étalement des BAP

5.2. La résistance à la ségrégation : La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide. La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus. Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité. Pour évaluer l'indice de ségrégation l'essai consiste à déterminer le pourcentage en masse de laitance (Pâte de ciment) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm

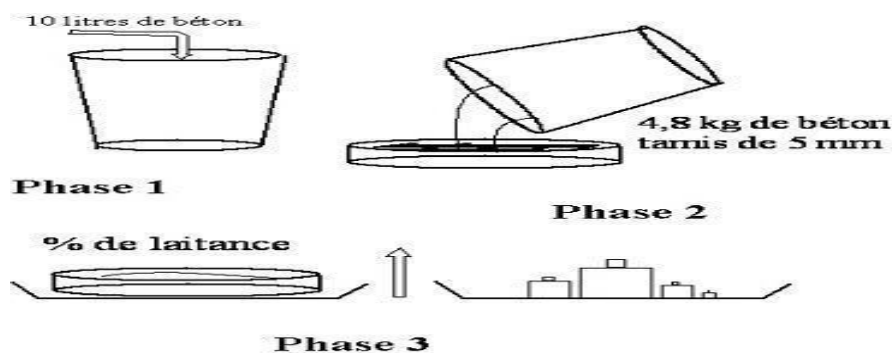
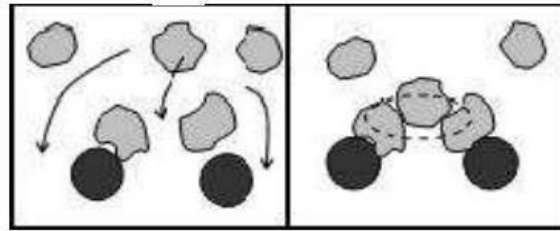


Figure 3.3 : essai de la résistance à la ségrégation

- indice de ségrégation de 0 à 15 % Stabilité Satisfaisante, (Bon béton)
- indice de ségrégation de 15% à 30% Stabilités critique

- indice de ségrégation supérieur à 30 % Stabilité très mauvaise

5.3. La capacité de passage : (taux de remplissage) : Le béton autoplaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité de remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement. Cependant, dans les milieux confinés, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures. En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats



par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement.

Figure 3.4 : blocage des granulats à travers deux armatures

Le taux de remplissage est déterminé par l'essai **(boîte en L)** qui étudie la mobilité du BAP dans un milieu confiné en présence d'armatures qui peut gêner la mise en place du béton en bloquant le passage des granulats. On mesure les hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage $H2/H1$ qui doit être supérieur à 0.80.



Figure 3.5 : boîte en L pour essai du taux de remplissage

Les propriétés optimales des BAP à l'état frais peuvent être obtenues selon les moyens résumés dans le tableau 4.1

Tableau 4.1 : moyens d'obtention des propriétés des BAP à l'état frais

les propriétés des BAP	les moyens d'obtention
Remplissage (fluidité)	-Réduction des frottements entre les particules en augmentant le volume de la pâte -Optimisation de la pâte en optimisant le rapport E/C et en utilisant des superplastifiants.
Résistance à la ségrégation	-réduction de l'eau libre dans le béton en utilisant des matériaux de grande surface - réduction de taille maximale des granulats

	- utilisation des agents de viscosité
Capacité de passage	- réduction du blocage des granulats en réduisant la taille maximale des granulats.

6. propriétés des BAP à l'état durci :

Les propriétés du béton autoplaçant, notamment ses résistances à la compression et à la traction, sa durabilité dépendent essentiellement de la composition adoptée, comme les bétons classiques, et les mêmes essais restent applicables.

6.1. Résistance mécanique : le béton autoplaçant possède une structure plus homogène que le béton ordinaire vibré, grâce notamment à une résistance à la ségrégation élevée, conférant au béton autoplaçant une amélioration de résistance mécanique. Les bétons autoplaçants présentent souvent une résistance mécanique plus élevée qu'un béton ordinaire à un rapport E/C équivalent. L'utilisation des fillers dans la formulation des BAP génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges

6.2. Module d'élasticité statique : Pour des rapports gravier sur sable G/S similaires, le module d'élasticité des BAP est équivalent à celui des BO. Par ailleurs, pour des rapports G/S différents, le module d'élasticité des BAP est inférieur à celui des BO. Ceci est expliqué par le fait que le volume de pâte est plus important pour les bétons autoplaçants. En effet, le module d'élasticité d'un béton est fonction des proportions volumiques de ses constituants et de leurs modules respectifs (le module de la pâte est bien inférieur à celui des granulats).

6.3. Retrait à l'état durci: les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires vibrés possèdent en général un retrait total équivalent. En mode endogène, les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires présentent un retrait similaire à 28 jours. Au delà d'un an, les BAP présentent un retrait légèrement supérieur à celui des BO ; ce qui est attribué au volume de pâte qui est plus important dans les bétons autoplaçants .

6.4. Absorption : l'absorption par immersion et par capillarité des BAP est analogue à celle des BO correspondants.

7. Formulation des BAP :

Plusieurs approches sont développées partout à travers le monde pour la formulation des BAP.

L'approche japonaise Considérée comme la méthode générale de formulation, elle a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura, Ozawa . En général, cette approche

consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin d'obtenir les meilleures performances (L'optimisation de la pâte, notamment, du rapport E/L (eau / liant) et du dosage en superplastifiant se fait d'une manière empirique sur mortier en effectuant des essais d'étalement au mini-cône) . Le volume du gravier est fixé à 50% du volume des solides contenus dans le béton. Selon les auteurs, ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que les critères d'ouvrabilité testés soient satisfaisants. En effet, pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier. Toutefois, le volume de gravier dans cette méthode est généralement sous- estimé ; ce qui peut conduire à des problèmes de retrait (le volume de la pâte étant important). De ce fait, plusieurs modifications et différents développements sont apportés à cette méthode.

À titre d'exemple une composition typique est présentée sur le tableau 3.2 :

Tableau 3.2 : composition typique d'un BAP.

constituants	Quantité Kg /m3
ciment	350
sable	800
gravillons	900
adjuvants	21
fines	200
eau	180

8. Fabrication des BAP

En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP. L'introduction des différents constituants dans le malaxeur est identique aux consignes recommandées pour les bétons vibrés. L'intensité et le temps de malaxage sont des facteurs qui influent fortement sur l'homogénéité du béton.

8.1. Transport des BAP : En raison de sa fluidité élevée, le béton autoplaçant doit être transporté en camion malaxeur. Comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité du béton peut se modifier durant le transport en fonction du 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.

Dans le cas de rajouts d'adjuvant dans le camion, il est recommandé de respecter impérativement le temps de malaxage minimal recommandé. En revanche tout ajout d'eau est à proscrire.

8.2. Mise en place des BAP : Par rapport au béton vibré la mise en place du béton autoplaçant est grandement facilitée, elle peut être réalisée par une seule personne et peut se faire par pompage.

9. Domaines d'application :

Les BAP sont utilisés pour la réalisation des :

- ✓ Tous types de dalles et planchers.
- ✓ Radier et fondations superficielle
- ✓ Eléments verticaux (voiles, poteaux, ...)



Figure 3.6 : exemples d'application des BAP

10. Avantages :

Les BAP présentent de multiples avantages :

- Mise en œuvre sans vibration
- Bétonnage plus rapide
- Coulage des murs verticaux de grande hauteur
- Bétonnage des formes complexes avec un excellent remplissage
- Plus grande fluidité pour un meilleur pompage
- Enrobage des armatures amélioré
- Amélioration de la qualité de parement

- Absence de nuisance sonore liée à la vibration
- Réduction du nombre des ouvriers

Chapitre 4 : Béton fibrés

Introduction :

L'idée de renforcer le béton avec des éléments courts (fibres) n'est pas récente, elle date depuis l'antiquité. Les Egyptiens ont utilisé les pailles pour renforcer la brique de boue. Tandis que les poils d'animaux ont été introduits pour renforcer le plâtre et la pâte de ciment Portland.

1. Définition :

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres de nature, de dimensions et de géométries variées ; c'est un matériau composite associant une matrice (le béton) et un renfort (les fibres).

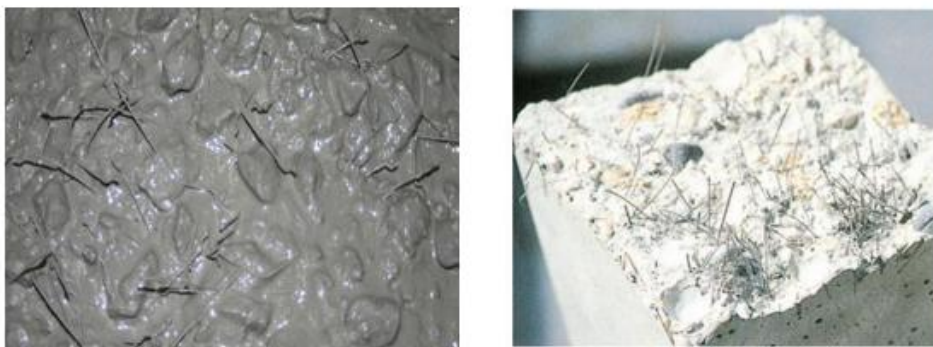


Figure 4.1 : aspect du béton fibré à l'état frais et durci

2. Les fibres :

La fibre est un composant filiforme (rapport longueur /diamètre est très élevé), de faible longueur, de nature et de forme variables.

Les fibres sont courtes et dispersées dans la masse du béton d'une façon aléatoire ou orientation préférentielle ; il s sont incorporées au moment de malaxage. Chaque fibre à des caractéristiques géométriques et mécaniques différentes ; elle à des applications spécifiques ; donc le choix d'une fibre est fonction des applications et des performances souhaitées.

Pour faciliter l'utilisation des fibres, elles doivent être :

- Facile à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage.
- Se répartir de manière homogène.

En outre elles doivent être :

- **Flexible sans être fragile, relativement longues et fines, assurer une bonne adhérence avec la pâte de ciment et offrir une bonne capacité de déformation.**

2.1. Rôle des fibres :

Les fibres ont pour rôle principal de maîtriser la fissuration et de reprendre les efforts au

droit des fissures éventuelles. Elles confèrent au béton des performances et des propriétés liées à leurs nature, leurs formes et à leurs caractéristiques mécaniques ; ces propriétés et performances peuvent se résumer en :

- Cohésion du béton frais.
- Conséquences du retrait (fissuration) .
- Ductilité en traction (déformabilité avant rupture) .
- Résistance à l'abrasion, à l'usure en général.
- Résistance aux chocs.
- Résistance à la fatigue.
- Résistance à la traction par flexion.
- Résistance mécanique au jeune âge.
- Bon comportement au feu

2.2 Types de fibres :

Les fibres se déclinent en trois familles :

- Fibres métalliques : acier –inox – fonte amorphe
- Fibres organiques : polypropylène – polyéthylène –polyamide (nylon)-acrylique – aramide (kevlar)
- Fibres minérales : verre – carbone

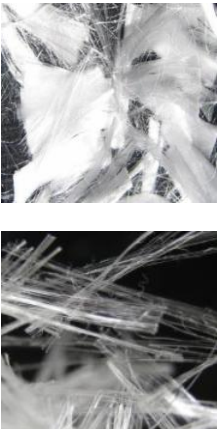
Les caractéristiques des fibres sont représentées au tableau 4. 1 :

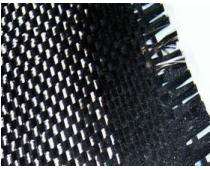
Tableau 4.1 : Les caractéristiques des fibres.

Longueur	5 -60 mm
Masse volumique	0.9 -7.85 g /cm ³
Résistance à la traction	500 - 3000 Mpa
Module d'élasticité	5000 - 210000 MPa
Coefficient de dilatation	1 à 90 micron /m° c
Forme	Rectiligne – ondulée –lisse – à crochet ...

On trouve aussi des microfibrilles métalliques ultra fines ($\varnothing$ de 0,12 à 0,20 mm, pour des longueurs de 15 à 20 mm) à utiliser exclusivement dans le (Béton fibré à ultra hautes performances).

Tableau 4.1 : Les caractéristiques des différentes fibres.

Type de fibre	Caractéristiques	Avantages	inconvénients	Utilisation
Fibres métalliques 	-densité élevée -module Young élevé -la longueur doit être au moins égale à 2.5 fois le diamètre du gros granulat -grande variétés soit de forme ou état de surface -dosage 0.5 à 2 % du volume (40 à 160 kg/m³)	-très efficaces vis à vis de la fissuration du béton durci -confèrent au béton une ductilité et une résistance à la rupture et à la fatigue -une meilleure distribution des efforts -amélioration de la résistance en traction du béton -réduction de la largeur des fissures -limitation de la propagation des fissures - peuvent remplacer partiellement les armatures.	-ne sont pas efficaces vis-à-vis de la fissuration au jeune âge -ajout d'un adjuvant pour maintenir l'ouvrabilité -orientation des fibres / au sens de la fissuration -corrosion superficielle - Alourdissement de 5 à 25 kg /m²	-structures mixtes (armatures + fibres) -précontraintes -dallages industriels, pieux, bétons projetés -coques -structures fortement armées -structures soumises à des sollicitations dynamiques.
Fibres métalliques amorphes 	-constitués d'un alliage de fer et chrome. -structure amorphe -ruban mince, souple et flexible - Longueur 5-30mm - Largeur 1-1.6mm - Epaisseur 0.25-0.3mm -dosage : 15 -40 kg /m³ -résistance à la traction 1700 MPa	-très grande résistance à la corrosion -surface spécifique élevée favorisant le renforcement du béton et la maîtrise de la fissuration.		-travaux de voirie -travaux de dallage et chapes -produits préfabriqués -ouvrages hydrauliques -travaux souterrains.
Fibres de polypropylène 	-faible densité 0.9 -souples et insensibles chimiquement -peu résistants à la chaleur (160 ° c) -répartition facile dans le béton -faible module d'Young 4000 à 8000 MPa -résistance à la traction : 400 à 600 MPa. -dosage : 0.05 à 0.2 % du volume (0.5 à 2 kg /m³)	-efficaces vis-à-vis de la fissuration au jeune âge - Réalisation des parements esthétiques -très efficaces pour améliorer la tenue au feu des structures en béton	-peu efficaces vis à vis de la fissuration du béton durci	- produits préfabriqués -bétons et mortiers projetés -dallages et aménagements urbains.

	-longueur 25 à 75 mm			
Fibres de carbone  	-légères -flexibles -densité : 2 -résistance à la traction $=2.10^3 \text{ Mpa}$ -module young= 4.10 MPa -non corrosives	Réduction des épaisseurs des parois	-cout élevé	-innovations architecturales - réparations - amélioration des conditions de service des structures (flèches – contraintes et ouverture des fissures).
Fibres de verre (CCV)  	-rigides -densité élevée : 2.6 -faible module d'élasticité -grande résistance à la traction 3000 MPa Dosage : 1- 2% (25à50kg/m ³)	-dispersion facile dans la matrice cimentaire. -réalisation des formes très variées avec des arrêtes fines -améliorent la résistance à la traction du béton et sa ductilité. -bonne résistance à la corrosion -excellente résistance au feu (jusqu'à 800° c) -excellents isolants -coefficient de dilatation du même ordre que celui de la pate.	-corrosion possible aux alcalis. sensibilité à l'abrasion. -vieillessement à l'humidité.	-produits préfabriqués -réalisation des éléments de faible épaisseur (10 à 15 mm) esthétiques et légers. -panneaux de façade minces. -produits d'assainissement (tuyaux, caniveaux
Fibres naturelles	- résistance élevée à la traction	-Non corrosive -capacité à se mélanger et à adhérer à la matrice	Pourriture	Renforcement des produits à base de ciment - plâtre

3. Composition de béton fibré :

Les propriétés du béton de fibres dépendent de la qualité de la matrice et des caractéristiques de fibres. La matrice considérée est identique à la matrice d'un béton courant avec des granulats plus petits.

La fabrication d'un béton de fibre consiste à mélanger une certaine quantité de fibres lors de malaxage du béton, cette addition affecte sa maniabilité .Pour y remédier Il convient d'utiliser une quantité de fine (sable et ciment) plus haute que pour un béton ordinaire, et de garder le $S / G = 1$.

En ce qui concerne les fibres, on utilise une faible longueur et un élancement (longueur / diamètre) moyen car il y a risque de former des pelotes qui rendent difficile la mise en œuvre

et nuisent au comportement Mécanique. Lorsque le diamètre max des granulats est inférieur à 15 mm, la longueur des fibres est prise égale à 20mm, par contre si le diamètre augmente à 30mm on doit prendre une longueur de fibres de 50mm ($L > 2 D_{\text{max}} \text{ granulats}$), pour rendre possible leur action mécanique au niveau des macro fissures.

On peut utiliser aussi des plastifiants pour obtenir une maniabilité acceptable tout en gardant le rapport eau/ciment raisonnable.

4. Formulation du béton de fibres

Effectivement l'ajout de fibres d'acier dans le béton modifie le squelette granulaire. On doit donc augmenter la quantité de sable pour optimiser ce squelette granulaire et rendre ainsi le béton plus compact. Une démarche d'optimisation d'un mélange de béton de fibres a été adoptée, basée sur la méthode Baron-Lesage et qui comporte trois étapes :

- Fixer d'abord le rapport eau/ciment, le pourcentage de fibres à utiliser et la quantité de super plastifiant.
- Fabriquer plusieurs mélanges en faisant varier le rapport sable/gravier qui devrait être autour de 1.0 en gardant constant le rapport eau/ciment et les quantités de pâte de ciment et super plastifiant fixés au départ.
- Déterminer la maniabilité de chacun des mélanges de préférence avec un maniabilimètre. Le mélange présentant la meilleure maniabilité est celui ayant le rapport sable/gravier (SG) optimal.
- Augmenter ou diminuer la quantité d'eau et de ciment utilisée, tout en gardant les rapports eau/ciment et SG constants.

5. Comportement mécanique du béton fibré :
Le béton est un matériau fragile qui se rompt brutalement lorsqu' il atteint sa résistance à la traction. Les fissures s'y propagent donc de façon très rapide. Le béton armé de fibres se distingue du béton ordinaire par l'absorption d'énergie que procurent les fibres

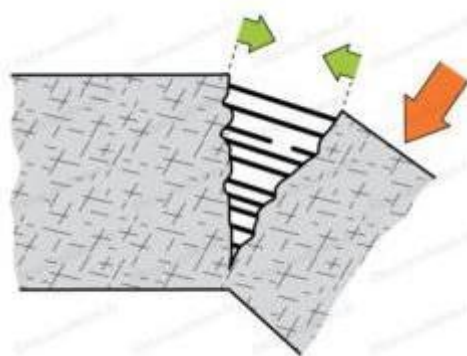


Figure 4.2 : fissuration du béton de fibres

La courbe effort- déformation est différente : le matériau est fragile au départ, se transforme en matériau ductile qui se rompt lentement après un allongement plus important dû à la formation d'un grand nombre de microfissures (plus grande énergie de rupture) .

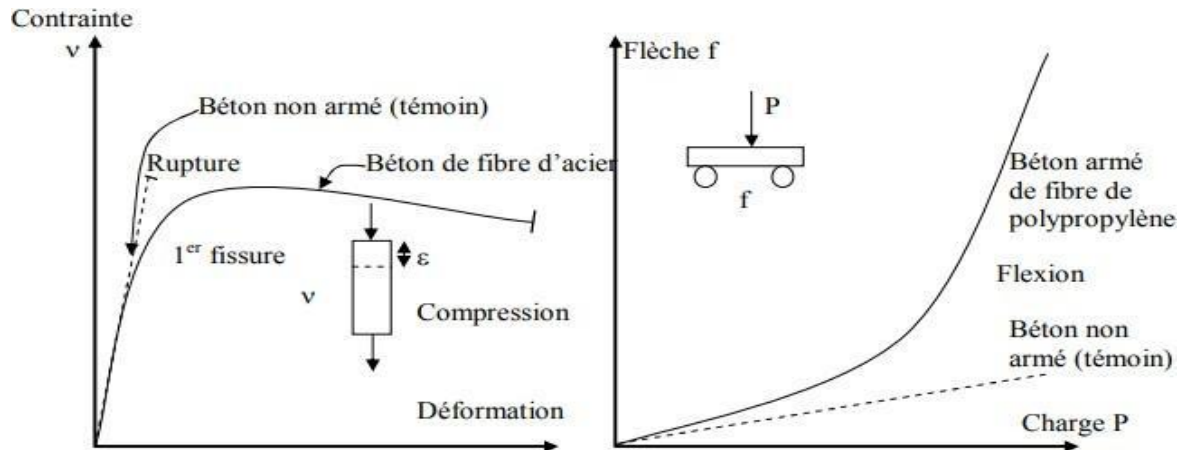


Figure 4.3 : comportement contrainte – déformation

Les fibres permettent :

- Le contrôle de la propagation des fissures en réduisant leur ouverture.
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile comme illustré sur la figure 4.4 :

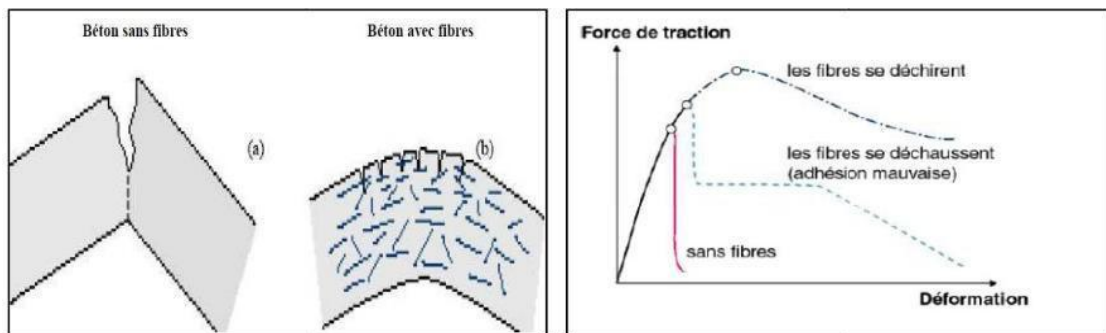


Figure 4.4 : comportement ductile des bétons fibrés

5. l'adhésion fibre – matrice :

La nature exacte de la zone de contact matrice - fibre dans les composites à matrice cimentaire est trop complexe pour être définie par des paramètres simples . Par exemple, dans le cas de fibres d'acier, la zone de contact a une épaisseur de 50 μm autour de la fibre. La structure de la pâte dans cette zone diffère de celle que l'on trouve au cœur de la pâte, elle est habituellement riche en portlandite CH.

Dans le cas des fibres en matériau polymérique tel que le nylon, le polypropylène et le carbone, la liaison fibre – matrice est entièrement mécanique et la résistance de liaison dépend de l'action d'accrochage entre la matrice et les filaments individuels de la fibre.

Dans le cas des fibres de verre, l'attaque alcaline de la pâte de ciment affaiblit le renforcement fibreux et modifie les propriétés des constituants à l'interface au cours du temps.

Le traitement de surface du verre « l'ensimage », induit par les technique d'étirage et de filage, conduisant à l'obtention d'une zone de transition entre le milieu alcalin et le verre favorisant à la fois une adhésion physico-chimique et une protection du verre..

6. Les paramètres influençant le comportement du béton fibré :

Les paramètres influençant le comportement du béton fibré sont indiqués sur la figure 4.5

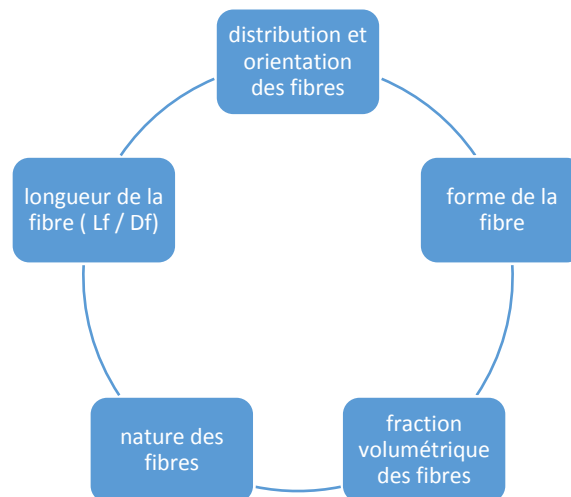


Figure 4.5: Les paramètres influençant le comportement du béton fibré

7. Propriétés des bétons fibrés :

7.1 Résistance a la compression : l'introduction des fibres dans la matrice peut avoir deux effets contradictoires : d'une part maintenir les fissures, ce qui est favorable pour la phase post pic, mais d'autre part créer des défauts supplémentaires à l'interface fibre- matrice. Ces défauts peuvent servir d'amorce à l'endommagement et donc limiter la charge maximale. En comparaison avec les BO les bétons fibrés marquent une légère augmentation de l'effort maximum de compression avec la teneur en fibres. La variation du module d'élasticité est aussi négligeable. En présence de fibres (d'acier) dans la matrice augmente la résistance à la rupture de 35% pour 1.5% de fibres. L'évolution de la résistance à la compression des bétons

fibrés est similaire à celle des bétons ordinaires : elle atteint 70 % de la résistance totale dès 7 jours. Cette résistance varie entre 20 et 40 MPa après 28 jours.

7.2 Résistance a la traction : les fibres modifient principalement le comportement après fissuration. Elles ont deux rôles : d'une part elles sont susceptibles de retarder l'apparition des macros fissures de la matrice et d'autre part, elles réalisent une couture sur les lèvres de la fissure formée, ce qui augmente la "ductilité" du matériau. L'introduction des fibres dans le béton compense la fragilité du matériau en traction par une couture de la macro fissuration. En revanche, le comportement post- fissuration est fortement lié à la teneur en fibres, à leur orientation et à leur mode de fonctionnement.

7.3. Retrait : le retrait du béton, avec ajout de fibre est plus faible que celui du béton ordinaire sans fibres ; cette diminution du retrait est d'autant plus remarquable que le départ d'eau du béton est accéléré par la présence de fibres qui augmentent le volume des pores dans le matériau , en diminuant ainsi l'intensité des contraintes capillaires, tout en facilitant l'évaporation de l'eau libre.

7.4. La résistance à l'abrasion : Le béton fibré quel qu'il soit, présente également une bonne résistance à l'abrasion due à d'éventuels frottements répétés

7.5. La résistance aux températures élevées : L'ajout de fibres minérales (comme du verre, du basalte ou du mica), va permettre de fabriquer un béton résistant à des températures élevées et au feu (à plus de 800°C) et affichant de bonnes qualités d'isolation thermique, même pour les parois les plus minces

7.6 Remplacement des armatures : La présence de fibres, quelles qu'elles soient, permet d'éviter l'ajout supplémentaire d'armatures en ferraille lors de sa mise en œuvre. Cela permet entre autres de réduire le délai d'intervention et de faciliter le travail des ouvriers sur le chantier.

Toutefois, les poutres et les poteaux sont les éléments les moins concernés, car les fibres métalliques ne sont pas en mesure de remplacer les aciers longitudinaux souvent importants, mais peuvent, en combinaison avec ces armatures longitudinales, remplacer les cadres et garantir une amélioration du comportement aux efforts tranchants

8. Les avantages du béton fibré

Par domaines d'applications on distingue deux modes d'utilisation des fibres :

- Le béton renforcé de fibres seules

- Le béton renforcé avec des armatures traditionnelles dans lequel on introduit des fibres (application structurale des bétons de fibre)

Dans le premier cas on utilise les propriétés des bétons de fibre en flexion pour :

- réaliser des coques minces.
- Amélioration de la tenue des pièces au jeune âge.
- Modification des variations dimensionnelles,
- lutte contre les fissurations

Dans le cas des applications structurales soumises à la flexion :

- diminution de 40% l'ouverture des fissures
- Augmentation de la rigidité après fissuration
- Augmentation de la résistance au cisaillement.



Figure 4.6 : façades en béton fibré Maroc

***Chapitre 5 :
Béton de poudre réactive***

Introduction :

L'utilisation de superplastifiants pour défloculer les grains de ciment, l'optimisation du squelette

Granulaire pour augmenter la compacité ainsi que l'élaboration de nouveaux processus de fabrication pour améliorer les propriétés de la matrice cimentaire ont conduit à la mise en point de nouveaux matériaux très performants : les bétons à ultra haute performance (BUHP), l'adjonction de fibres leurs a conféré la ductilité nécessaire.

Les bétons de poudre réactive BPR sont des BUHP, qui ont été développés par Pierre Richard, puis par Marcel Cheyrezy et Nicolas Roux, travaillant pour l'entreprise française de construction Bouygues en 1993 pour satisfaire aux exigences de résistance tout en conservant une bonne ouvrabilité.

1. Définition :

Les BPR sont des bétons à fort dosage relatif en ciment et en adjuvants, à granulats de faible dimension, à fort dosage en fibres. Les voies de l'obtention de tel béton sont :

- Teneur en eau extrêmement faible E/C est inférieure à 0.2 (ce qui est possible grâce à l'emploi des superplastifiants de nouvelle génération défloculant la fines et ultra fine.
- Optimisation de l'empilement granulaire : la dimension et le dosage en granulats sont considérablement réduits (le diamètre de 1 à 4 mm).

2. Principes fondamentaux :

Les caractéristiques exceptionnelles des BPR résultent de l'application de quatre principes fondamentaux :

- Amélioration de l'homogénéité par suppression des gros granulats.
- Amélioration de la compacité par optimisation du mélange granulaire et éventuellement par pressage avant et pendant la prise.
- Amélioration de la microstructure par traitement thermique (appliqué après démoulage afin d'activer les réactions d'hydratation et de pouzzolanité.
- Amélioration de la ductilité par ajout de fibres (micro fibres métalliques).

2.1 Effet de Taille des granulats

Sous l'effet d'une force de compression, les contraintes de cisaillement et de traction apparaissant à l'interface pâte/granulats génèrent des fissures dans la pâte des bétons

ordinaires. La taille de ces fissures est liée à l'étendue de la zone soumise à une contrainte de traction ou de cisaillement. Pour les BPR, une réduction de la taille des granulats les plus grossiers d'un facteur 50 environ (par exemple, 400 μm au lieu de 20 mm) permet d'obtenir une réduction importante de la taille des microfissures d'origines mécaniques (charges), chimiques (retrait endogène) et thermomécaniques (dilatation différentielle entre la pâte et les granulats sous l'effet d'un traitement thermique) .

2.2 Effet d'une teneur en sable limitée

Dans un béton conventionnel, les granulats (sable et gravier) sont majoritaires en volume et forment un squelette rigide d'éléments granulaires contigus. Cela signifie qu'une grande partie du retrait de la pâte est bloquée par le squelette granulaire, ce qui entraîne une augmentation de la porosité ; par contre dans le cas d'un BPR , le volume de la pâte est supérieur d'au moins 20 % à l'indice de vides du sable non compacté. Ainsi, les granulats utilisés dans les RPC ne forment pas un squelette rigide.

3. La composition des BPR :

3.1 Ciment : Le choix du ciment est indissociable de celui du superplastifiant. Du point de vue de la composition chimique, les ciments à faible teneur en C3A donnent de meilleurs résultats. Les ciments très fins ne sont pas satisfaisants, en raison de leur forte demande en eau. Le ciment le plus performant En termes de caractéristiques rhéologiques et de performances mécaniques est un ciment riche en silice. Cependant, ce type de ciment présente l'inconvénient d'une vitesse de prise très lente, ce qui empêche son utilisation pour certaines applications. Les ciments hautes performances à prise rapide conventionnels offrent des performances mécaniques très similaires, malgré une demande en eau plus élevée.

3.2 Fumée de silice : La fumée de silice utilisée dans les bétons RPC a trois fonctions principales :

- Remplir les vides entre les particules de la classe supérieure suivante (ciment) ;
- Améliorer les caractéristiques rhéologiques par l'effet lubrifiant résultant de la sphéricité parfaite des particules.
- Production d'hydrates secondaires par réaction pouzzolanique avec la chaux issue de l'hydratation primaire.
- la fumée de silice doit être caractérisée par :
- Nature et quantité des impuretés

- Granulométrie de base

Le rapport fumée/ciment généralement utilisé pour les BPR est de 0,25. Ce rapport correspond à une performance de remplissage optimale, et est proche du dosage nécessaire à la consommation complète de la portlandite. Cependant, l'hydratation du ciment est incomplète dans le BPR et la quantité de fumées de silice disponible est supérieure à celle requise par la réaction pouzzolanique.

3.3 Quartz broyé : La poudre de quartz cristallin est un ingrédient essentiel pour les BPR traités thermiquement. La réactivité maximale lors du traitement thermique est obtenue pour une granulométrie moyenne comprise entre 5 et 25 μm . La granulométrie moyenne du quartz broyé utilisé pour un BPR est de 10 μm , ce qui le rend de la même classe granulométrique que le ciment.

3.4 Les superplastifiants : Les superplastifiants les plus efficaces sont les agents dispersants à base de polyacrylate, mais ils présentent également un effet retardateur pouvant poser problème pour les applications pratiques.

Les superplastifiants conventionnels, sélectionnés pour leur compatibilité avec le ciment, donnent des résultats légèrement inférieurs. Pour les faibles rapports E/C utilisés pour les BPR, le rapport optimal de superplastifiant est élevé (teneur en solides d'environ 1,6 % de la teneur en ciment).

3.5 Le sable : le choix du sable est indispensable, Les paramètres de sa sélection sont :

- Composition minérale
- Granulométrie
- Forme des particules
- Proportion massique du mélange.
- le sable quartzeux est le plus recommandé, il offre les avantages suivants :
- Matériau très dur
- -Excellente interface pâte/ granulat
- Facilement disponible et peu coûteux

Un exemple de compositions de BPR est donné aux tableaux 5.1 et 5.2

Tableau 5.1 : composition d'un m³ de BPR

Composant	Quantité Kg / m ³
Ciment	950
Fumée de silice	237
Sable de silice	997
Fibres métalliques	146
Superplastifiant	17
Eau	180
E/liant (C+Fs)	0.15

Tableau 5.2 :compositions typiques des BPR (par poids)

	RPC 200				RPC 800	
	Non fibered		Fibered		Silica aggregates	Steel aggregates
Portland Cement	1	1	1	1	1	1
Silica fume	0.25	0.23	0.25	0.23	0.23	0.23
Sand 150 - 600 µm	1.1	1.1	1.1	1.1	0.5	-
Crushed quartz d ₅₀ =10µm	-	0.39	-	0.39	0.39	0.39
Superplasticizer (Polyacrylate)	0.016	0.019	0.016	0.019	0.019	0.019
Steel fiber L=12 mm	-	-	0.175	0.175	-	-
Steel fiber L=3 mm	-	-	-	-	0.63	0.63
Steel aggregates <800 µm	-	-	-	-	-	1.49
Water	0.15	0.17	0.17	0.19	0.19	0.19
Compacting pressure	-	-	-	-	50 MPa	50 MPa
Heat treatment temperature	20°C	90°C	20°C	90°C	250-400°C	250-400°C

4. Performances et propriétés spécifiques :

Les BPR présentent les propriétés suivantes :

- Très grande ouvrabilité à l'état frais.
- Résistances mécaniques très élevées à court terme (60 à 70 Mpa à 24 heures) et au jeune âge .
- Résistances mécaniques finales très élevées.
- Résistances mécaniques à la traction très significatives (20 à 50 Mpa en cas de traction par flexion).
- Compacité très importante conduisant à une absence de porosité et à une faible perméabilité
- Résistance accrue à l'abrasion (identique à une roche) .
- durabilité exceptionnelle (matériau imperméable - pas de pénétration des

chlorures et des sulfates)

- retrait faible et fluage très faible.
- Ductilité importante, le BPR a une grande capacité de déformation en supportant les charges de traction et de flexion même après l'apparition des fissures initiales.

Ces performances sont obtenus par l'amélioration des propriétés de la microstructure de la matrice minérale en particulier la dureté, ainsi que le contrôle de l'adhérence matrice / fibre.

5. Formulation des BPR :

Comme les BTHP les BPR se caractérisent par l'ajout d'ultra fines ; la réduction de la porosité contribue également au renforcement de la résistance en améliorant la qualité des CSH.

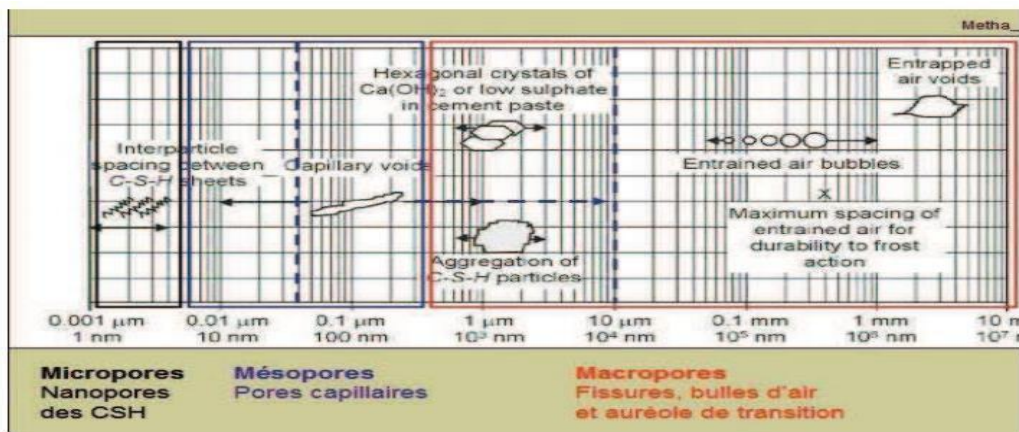


Figure 5.1 : différentes porosités du béton

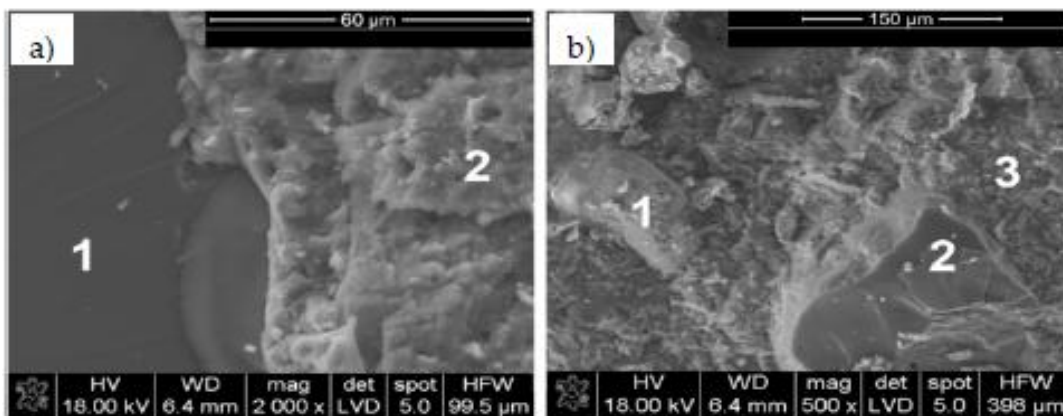


Figure 5.2 : microstructure d'un BPR après 28 j de durcissement -a- 1:quartz, 2: CSH phase -b- : 1.3 CHS phase, 2: quartz

Pour formuler un tel béton il est préférable d'utiliser :

- Un ciment à faible teneur en C3A.
- Un sable fin qui constitue le plus grand granulat, sa taille est inférieure 600 micromètre ; son choix est indispensable pour assurer une bonne interface pate

granulat, la forme arrondie permettrait une faible absorption et favorise la rhéologie du béton. la masse de ciment qui serve à optimiser l'étendue granulaire du mélange et augmenter ainsi sa compacité.

- Parfois l'ajout du quartz broyé : poudre issue du broyage d'un sable très riche en SiO_2 sup à 98 % , ce quartz à une taille moyenne de 5 à 10 micro mètres.

- Les fibres : ce sont des fibres spécifiques, elles confèrent leur ductilité à ce matériau composite ; métalliques conduisant à des BPR d'usage plutôt structural, organiques et minérales elles donnent aux BPR des propriétés esthétiques. leur longueur en général de 10 à 20 mm pour les fibres métalliques et une section la plus faible possible (0.1 à 0.3 mm) pour favoriser l'adhérence fibre – matrice.

- Le dosage courant de fibres métalliques est 2 à 3 % du volume, les fibres de faible longueur jouent un rôle dans la couture des fissures.

6. Structure minérale des BPR :

- Les BPR sont des matériaux à structure micrométrique , les dimensions s'étalent du millimètre au nanomètre , cette micro structure leur confère une très faible porosité (porosité non connectée) ; de plus le rapport E / C inf. 0.2 est tel que subsistent au sein du béton à l'état durci après consommation de l'eau de l'hydratation des particules de clinker non hydraté (50 % de C3S subsiste) ce qui aide à renforcer l'homogénéité mécanique du matériau.
- Les particules non hydratées constituent de micro granulats de grande qualité présentant un module d'élasticité très élevé (E des C3S = 117000 Mpa).
- Elles représentent une réserve de ciment anhydre (formation de nouveaux hydrates) .
- Faire subir aux BPR un traitement thermique vise à améliorer la microstructure en activant la réaction pouzzolanique (fumée de silice et quartz) , en effet ce traitement permettrait de reconstituer des chaînes de CSH plus longues. Le traitement thermique à 90 °C accélère considérablement la réaction pouzzolanique, tout en modifiant la microstructure des hydrates formés. Cependant, ces hydrates restent amorphes
- La compacité est peut encore être améliorée par un éventuel pressage avant et pendant la prise.
- généralement la résistance en compression est fonction de densité, le pressage du BPR augmente cette dernière en fonction du mode d'application et de sa durée.
- le pressage a pour effet :
- réduction de l'air entraîné.

- élimination de l'excès d'eau.
- La ductilité est améliorée par l'ajout de micro fibres.
- La combinaison de ces multiples facteurs permet d'atteindre des résistances en compression allant de 200 à 800 Mpa .

7. Réalisations en BPR :

Plusieurs structures partout au monde sont réalisées par des BPR citons :

- La grande mosquée d'Algérie qui compte plus de 23000m² de façades réalisées avec ce type de béton
- Passerelle piétonne de Sherbrooke au Canada 1997 de 10 m de longueur.
- Passerelle piétonne de 50 m au Japon 2002
- Passerelle piétonne de 50 m en Allemagne 2004 -2005
- 2000 poutres qui composent la tour de refroidissement de centrale électrique en France 1997-1998



Figure 5.3 : grande mosquée d'Alger

Passerelle de la Paix à Séoul,
Rudy Ricciotti, architecte. [50]

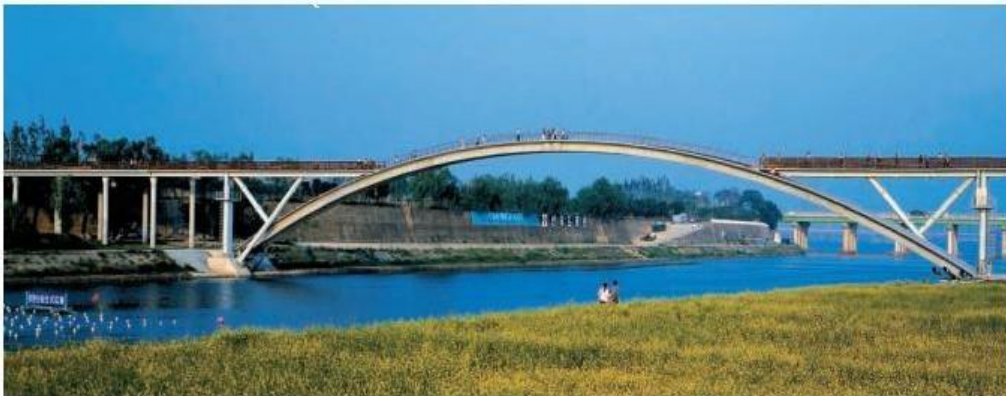


Figure 5.2 : passerelle en BPR à Séoul de 120 m



Figure 5.3 : pont en BPR

***Chapitre 6 :
Béton de polymère***

Introduction :

Les inconvénients du béton classique sont multiples :

- Faible résistance en traction
- faible déformation à la rupture
- Sensibilité aux effets du gel
- Faible résistance aux produits chimiques

Pour y remédier, la substitution du ciment portland par des polymères s'avère une solution prometteuse. Le Béton de polymère est la dernière innovation dans le domaine des bétons décoratifs apparu depuis les années 1980, caractérisé par sa résistance élevée et sa légèreté, utilisé pour la confection des éléments préfabriqués, les tabliers des ponts...

1. Définition :

Le béton de polymère (BP) est un matériau fabriqué en substituant partiellement ou totalement le ciment (liant) par un polymère (résine) appliqué sur une épaisseur de 20 mm sur tout type de surfaces.

Le BP est constitué de charges minérales (granulats, sable,...) est d'un liant en polymère, connu aussi sous le nom de béton de résine synthétique ou béton de résine plastique. La présence de la résine réduit l'absorption d'eau et garantit sa complète étanchéité. Les caractéristiques mécaniques des BP dépendent essentiellement de la nature du polymère utilisé et de la quantité de charges.

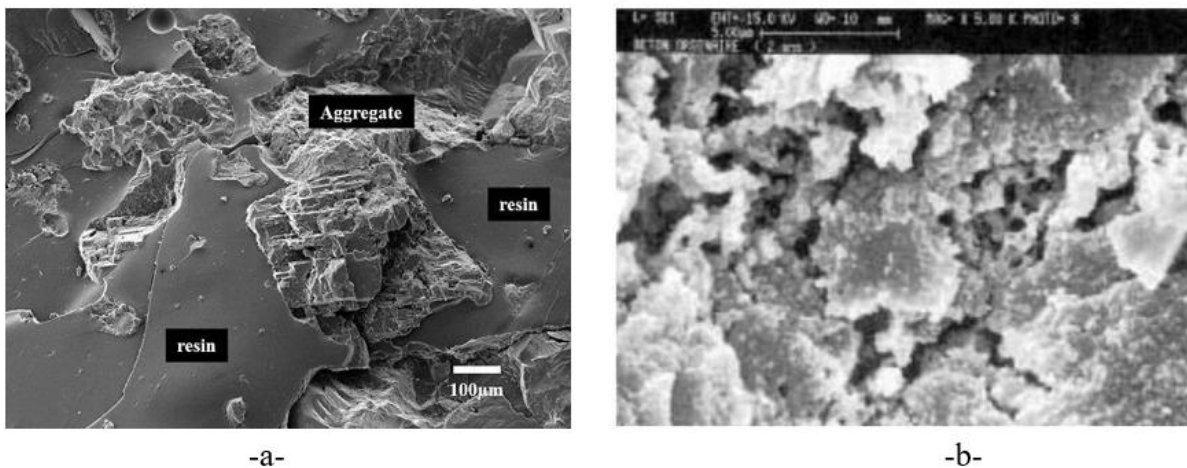


Figure 6.1 : microstructure du -a- béton de polymère -b- béton ordinaire

2. Types du béton de polymère :

Les polymères utilisés dans le béton ont été développés au cours des années 60 à 70. On distingue quatre principaux types de polymères, en fonction de leur teneur en polymère par rapport au ciment :

2.1. Le béton de ciment Portland : les propriétés et les performances du béton sont largement déterminées par les propriétés de la pâte de ciment hydraulique, constituant actif. Les adjuvants polymères sont des ingrédients qui, ajoutés en petites quantités (généralement inférieures à 3 % en poids) au mélange de béton, immédiatement avant ou pendant le malaxage, interagissent dans le système cimentaire hydraté par action physique, chimique et physico-chimique, modifiant une ou plusieurs propriétés, permettant ainsi des applications plus larges du béton et lui conférant certains avantages, notamment une durabilité accrue, une meilleure maniabilité et une résistance accrue

2.2. Le béton modifié aux polymères : est préparé en mélangeant une petite quantité de polymère (jusqu'à 25 % en poids) au mélange de béton frais. Le composite obtenu présente une excellente adhérence aux armatures en acier et au béton ancien, ainsi qu'une bonne durabilité.

2.3. Le béton imprégné de polymères : les pores capillaires du BP hydraté sont remplis d'un Monomère de faible viscosité qui polymérise ensuite. Par conséquent, la perméabilité est réduite, tandis que les résistances à la compression et à la traction sont améliorées.

- les polymères remplacent totalement le ciment hydraulique, Bien que le coût du monomère puisse être élevé, ce béton peut être utile pour l'entretien et la réparation des autoroutes et des pistes d'atterrissage, et présente un excellent rapport résistance/coût. Les différentes caractéristiques mécaniques des différents bétons (cités précédemment) sont représentées dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1 : Les différentes caractéristiques mécaniques des bétons de polymère

Matériau	Rt (Mpa)	Rc (Mpa)	E (Gpa)
Béton de résine	10.5	140	42
Béton imprégné	14.7	273	49
Béton additionné de résine	5.6	38	14
Béton ordinaire	2.5	35	24.5

3. Composition du béton polymère :

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

3.1. Le liant (résine) : les polymères sont constitués par l'enchaînement covalent de plusieurs unités chimiques de répétitions ou motifs unitaires (monomères), de structure ayant une architecture le plus souvent linéaire ou tridimensionnelle.

Dans les BP, les résines thermodurcissables sont généralement utilisées comme principal composant polymère en raison de leur grande stabilité thermique ; les polymères thermoplastiques sont également utilisés dans une moindre mesure. Parmi les thermodurcissables, les résines époxy sont principalement employées pour la production de béton en raison de leur forte adhérence à la plupart des matériaux de construction, de leur faible retrait, de leur bonne résistance au fluage et à la fatigue, ainsi que de leur faible absorption d'eau ; cependant, elles sont relativement coûteuses.

Les résines polyester insaturées sont également utilisées en raison de leurs propriétés chimiques et mécaniques supérieures, combinées à leur faible coût

Parmi les autres matériaux utilisés pour les BP, on trouve : le méthacrylate de méthyle, le styrène, les esters vinyliques, l'alcool furfurylique et les résines furaniques, ainsi que leurs copolymères.

Des agents de durcissement ou initiateurs sont utilisés pour favoriser les réactions de durcissement. Pour tout PC, les temps de travail et de durcissement dépendent de la concentration du composant, de la température de durcissement et du volume massique

Pour le béton modifié aux polymères (BMP) connu béton au latex modifié , est développé en mélangeant une dispersion de polymère (latex) avec un mélange de béton de type ciment Portland dans le but d'améliorer certaines caractéristiques du béton durci .

Des réactions chimiques peuvent se produire entre le film polymère et les hydrates et granulats de ciment, améliorant ainsi les propriétés du mortier et du béton durcis modifiés au latex ; la figure 6.2 illustre cette interaction.

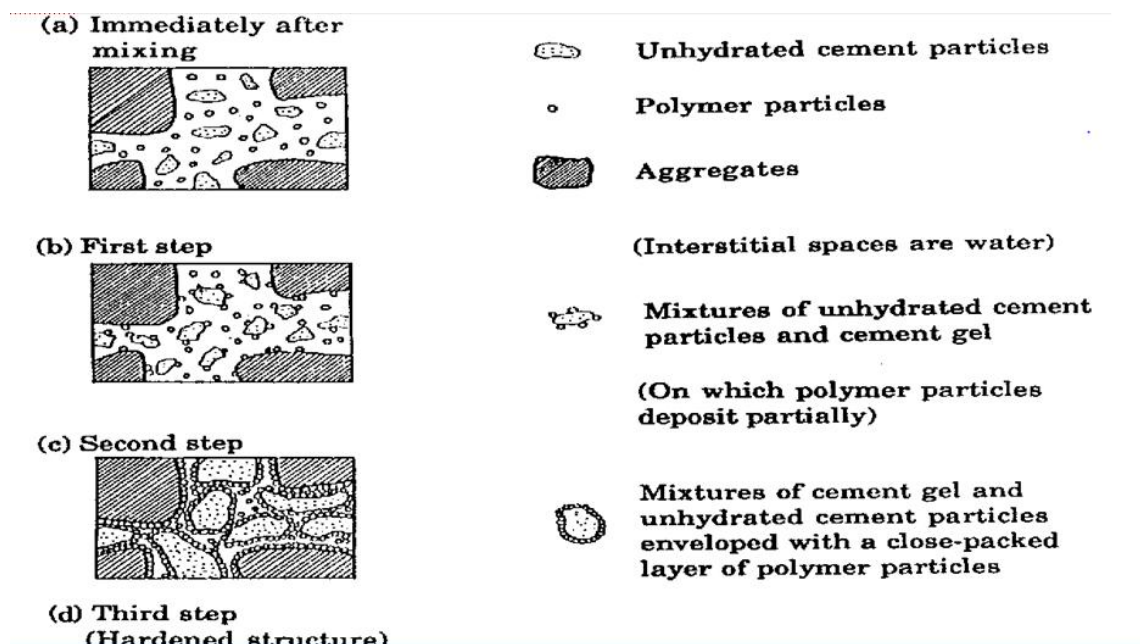


Figure 6.2 : évolution de la structure des BMP.

3.2. Les granulats : ils forment le squelette du béton, dans la plupart des cas sont des sables quartzeux de granulométrie différente. Les granulats doivent être secs et exempts de poussière et de matières organiques. L'humidité et/ou la poussière sur les granulats réduisent en effet la force d'adhérence entre la phase polymère et les granulats. Une granulométrie appropriée des granulats.

Garantit un volume de vide minimal pour les granulats compactés ce qui minimise la quantité de monomère nécessaire pour garantir une bonne adhérence.

Les granulats issus du calcaire, du basalte, de la silice, du quartz, du granit et d'autres matériaux de haute qualité, sont utilisés.

Le gravier de (0.2 à 16 mm) et le sable de (0.1 à 0.7 mm) sont considérés comme granulats grossiers par contre la farine de (0.1 à 0.3 mm) et les particules inférieure à 0.1 mm sont considérés comme granulats fins. Le choix des granulats revête une grande importance, leur qualité influence les performances mécaniques du béton (module d'élasticité, résistance en flexion et en compression, dureté,.....)

3.3. Additions : L'utilisation de cendres volantes comme charge dans le béton polymère est très intéressante car elle améliore les propriétés physiques du béton polymère, notamment ses résistances à la compression et à la flexion, L'effet du CaCO_3 comme charge sur le béton polymère s'est avéré encore plus efficace que celui des cendres volantes. Cela a été attribué à la plus grande surface spécifique de ces derniers ainsi qu'à leur grande adhérence.

3.4. L'agent de durcissement (initiateur) : peut ajuster la viscosité de la résine d'origine, affectant non seulement les propriétés mécaniques et de durabilité, mais ajustant également le temps de prise, le taux de croissance de la résistance, le coefficient de dilatation thermique, le retrait et la compatibilité avec d'autres matériaux.

Après l'ajout des agents de durcissement, le monomère (polymère) liquide est mélangé à des granulats grossiers et fins. Les coffrages destinés à la production de béton coulé en PC doivent être résistants aux solvants, possédant un faible coefficient de dilatation thermique, présentant des surfaces lisses et faciles à nettoyer et, de préférence, être un bon conducteur thermique.

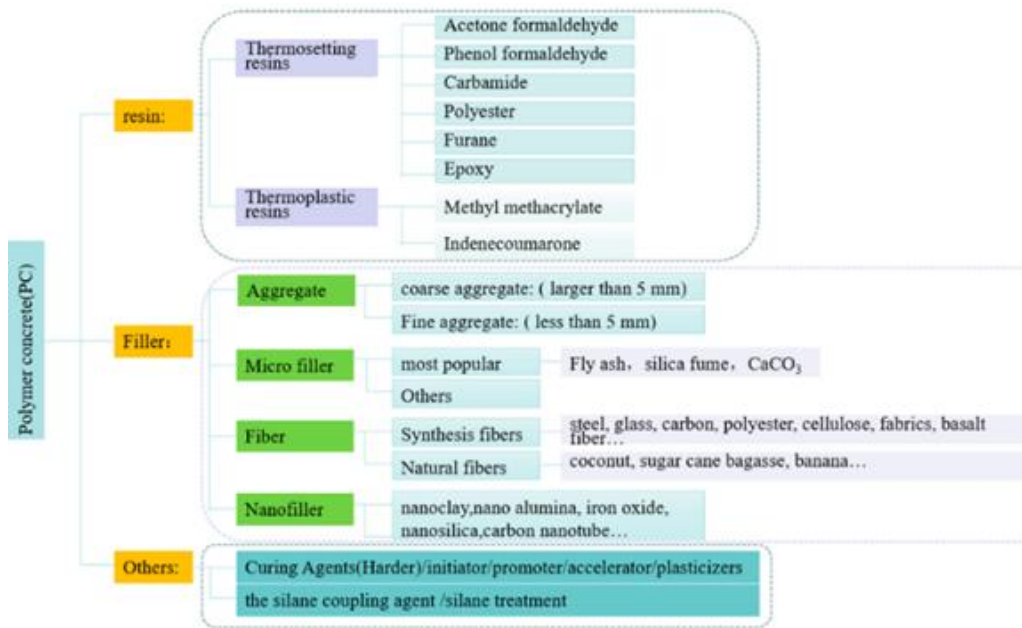


Figure 6.2 : les différents composants des BP

Le processus peut prendre de quelques minutes à quelques heures. Certaines formules bénéficient d'un chauffage pendant la période de durcissement, tandis que d'autres nécessitent simplement un temps de séchage à température ambiante. La figure 6.3 illustre les étapes de confection des BP.

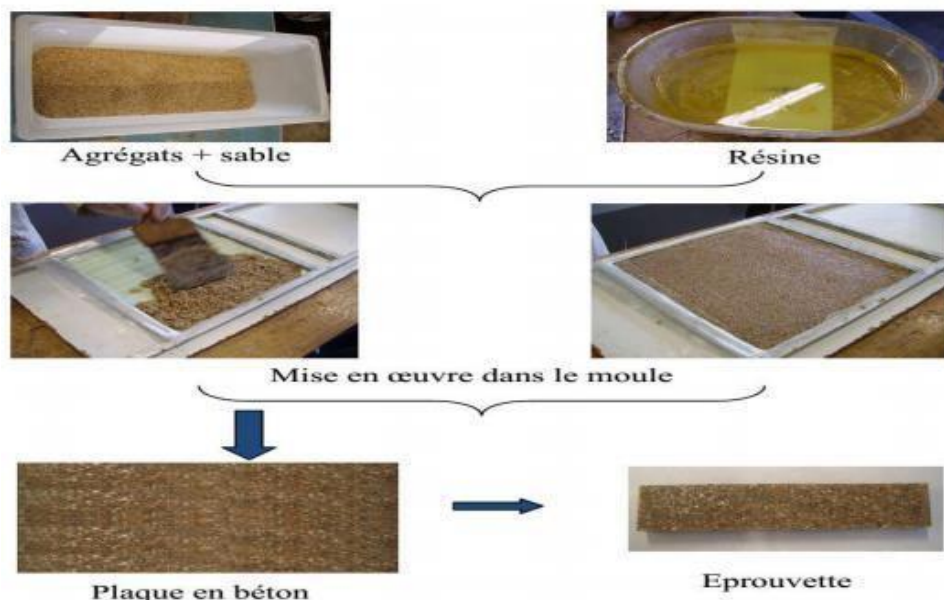


Figure 6.3 : Etapes de confection d'un BP

4. Les caractéristiques principales des bétons polymères :

4.1. Caractéristiques mécaniques d'un béton BP

Le béton polymère représenté les caractéristiques suivantes :

- Résistance en compression d'un béton polymère: 80 – 90 MPA.
- Résistance en flexion par traction d'un béton polymère : 20 – 24 MPA.
- Module d'Young d'un béton polymère: 21 300 MPA.
- Abrasion : 1,15.

4.2 Caractéristiques chimiques d'un béton polymère :

- Résistance aux agressions des effluents sans aucun traitement (PH 1 à 14).
- Résistance aux produits chimiques.
- Résistance à l'hydrocarbure.

4.3. Caractéristiques physiques d'un béton polymère :

- Absorption d'eau : 0,2 %.
- Résistance au gel : Inaltéré.
- Densité : 2,1-2,3.
- Microporosité d'un béton polymère : 25 μm .
- Module d'élasticité 20 – 34 KN/mm².
- Dureté Vickers, superficielle 320 N/mm.
- Excellente tenue à l'abrasion

5. Propriétés de béton polymère :

Les propriétés viscoélastiques du liant polymère sont responsables du taux élevé de fluage du béton de résine, ce qui restreint quelque fois son utilisation dans la construction de charpentes. Le taux de déformation du béton de résine varie selon le type de polymère utilisé. Parmi les différents BP on trouve : le béton de polyester, le béton d'époxy, le béton de résine furanique. Le Tableau 6.2 donne les caractéristiques mécaniques des différents bétons polymère.

Tableau 6.2 : les caractéristiques mécaniques des différents bétons polymère.

Type de liant	Polyméthacrylate de méthyle	Polyester	Époxyde	Résine furanique	Béton de ciment
Absorption d'eau (%)	0,05-0,60	0,30-1,0	0,02-1,0	0,20	5-8
Résistance en compression (MPa)	70-210	50-150	50-150	48-64	13-35
Résistance en traction (MPa)	9-11	8-25	14-25	7-8	1,3-3,5
Résistance en flexion (MPa)	30-35	15-45	15-50	-	2-8
E (GPa)	35-40	20-40	20-40	-	20-30
V	0,22-0,33	0,16-0,30	0,30	-	0,15-0,20
Coefficient de dilatation thermique (10^{-6}C^{-1})	10-19	10-30	10-35	38-61	10-12

6. Les avantages d'un béton polymère :

- Une bonne résistance aux agents chimiques et aux agents corrosifs.
- Une plus faible perméabilité à l'eau et une bonne résistance aux cycles de gel-dégel
- Un faible coefficient de dilatation thermique et Un durcissement rapide.
- Une bonne adhésion aux granulats et aux bétons anciens.
- Des résistances mécaniques meilleures que celles des bétons hydrauliques.
- Une bonne résistance à l'abrasion.
- Une excellente durabilité avec un coût raisonnable

7. les inconvénients d'un béton polymère :

- 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 Liente du matériau c'est-à-dire la résine et le durcisseur pendant le malaxage et la mise en Œuvre.

8. L'utilisation des bétons polymère dans le domaine de génie civil :

Le BP est 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 plus en plus complexes de point de vue architecturale et les exigences Économiques et techniques plus stricts.



Figure 6.4 : Applications des BP

Chapitre 7 :

Béton léger

1. Définition

Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux, ses caractéristiques suggèrent de nouvelles applications, sa faible masse volumique le distingue du béton ordinaire. En effet la masse d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 Kg/m³, tandis que celle du béton léger oscille entre 300 et 1850 Kg/m³.

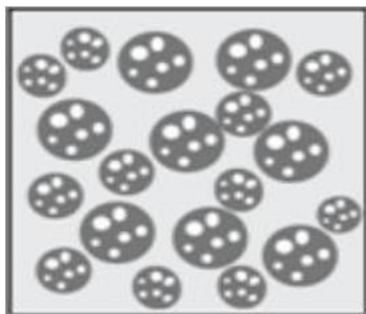
La réduction de la masse volumique peut s'obtenir de différentes façons :

- en utilisant des granulats légers
- en remplaçant les granulats par des bulles d'air
- en laissant des vides importants entre les granulats denses (légers) collés entre eux sans éléments fins (sable)

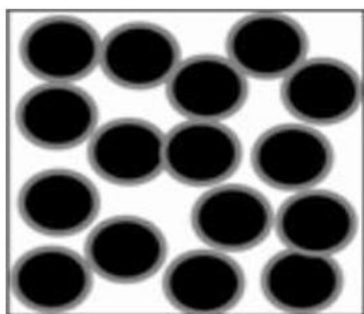
2. Type des bétons légers :

La faible masse volumique des bétons légers provient de leur porosité élevée. Cette porosité peut être localisée dans trois endroits :

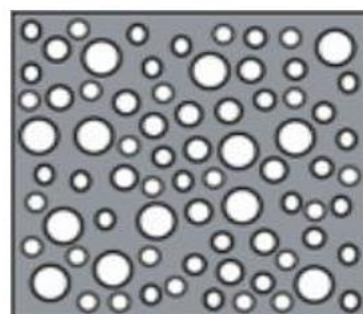
- Au sein des granulats : C'est le cas des bétons de granulats légers
- Entre les gros granulats par suppression des granulats fins. C'est le cas des bétons caverneux.
- Dans la pâte de ciment : C'est le cas des bétons cellulaires.



Béton de granulats légers



Béton caverneux



Béton Cellulaire

Figure 7.1 : représentation schématique des différents types de béton léger

2.1 Béton de granulats légers

Le béton à base de granulats légers, n'est pas une nouvelle invention en technologie de béton. On l'a connu depuis des périodes antiques, ainsi il est possible de trouver un bon nombre de référence en liaison avec l'utilisation BGL. Il est réalisé en utilisant les agrégats normaux d'origine volcanique tels que la ponce, etc.

Les bétons de granulats légers trouvent de nombreuses applications dans le domaine du bâtiment et des ouvrages d'art. Ils sont utilisés notamment pour alléger les structures telles

que les poutres, les poteaux, les planchers etc. Les bétons légers connus pour améliorer l'isolation thermique.

2.1.1 Type et nature des granulats légers :

Comme pour tout béton, les granulats sont également un élément- clé dans la composition du béton léger. Il est possible d'utiliser des granulats naturels pour sa confection, comme on peut utiliser des granulats recyclés qui peuvent être utilisés en remplacement partiel ou total des granulats naturels dans le BL. Les granulats influencent de manière significative les propriétés du BL à savoir la fluidité, la résistance mécanique du béton et la durabilité.

Les granulats légers ont plusieurs origines, ils peuvent être naturels, obtenus par traitement des déchets ou fabriqués spécialement pour les bétons légers.

2.1.1.1 - Les granulats légers naturels :

Il s'agit de granulats naturels par définition, mais légers ; c'est- à- dire présentant une structure alvéolée. Les granulats légers naturels sont issus en général de roches d'origine volcanique ou sédimentaire subissant diverses transformations mécaniques.

A. Granulats minéraux :

Pierre ponce :

La pierre ponce est un matériau naturel d'origine volcanique, elle se forme par un refroidissement brusque de roche en fusion, elle se présente sous l'aspect de grains assez arrondis dont le diamètre maximale de 10 à 20 mm d'une densité sèche variant de 500 à 800 kg/m³. La ponce est assez friable et employée pour des bétons légers de structure et d'isolation ayant des résistances modestes.

Pouzzolane :

La pouzzolane provient de la cristallisation du magma volcanique refroidi assez lentement (lave mousseuse) silicoalumineuse. Sa densité est un peu plus élevée que celle de la



-a-



-b-

ponce, variée de 700 à 900 kg/m³.

Figure 7.2 : granulats minéraux légers a : ponce b : pouzzolane

B. Granulats végétaux :

Granulat de Liège :

Ce type de granulat est obtenu à partir des chaînes de liège en passant par le concassement de celle-ci et puis le liège est torréfié dans des autoclaves vers 350°C sa densité sèche varie entre 65 et 120 Kg/m^3 . Le domaine d'utilisation des granulats de liège est bien la confection des chapes et des planchers.

Copeaux de bois : (sapin - pin)

par découpage et broyage on obtient de morceaux de bois de 5 à 25 mm , qui doivent être déshydratés , traités chimiquement et stabilisés par une attaque d'acide pour éliminer la cellulose et puis par le chlorure de calcium ensuite lavés et séchés , ils présentent une densité sèche de 250 à 400 kg / m^3



-a-



-b-

Figure 7.3 : granulats végétaux -a- liège -b- copeaux de bois

2.1.1.2. Granulats obtenus par traitement des déchets industriels :

Laitier expansé :

Le laitier s'expande en refroidissant dans une fosse au fond de laquelle on envoie des jets d'eau sous pression en développant une structure alvéole.

Cendres volantes :

Les cendres volantes sont mélangées à de l'eau pour former des granules traitées thermiquement à une température de 1200°C à 1300°C , les boulettes obtenues ont une densité sèche de 630 à 680 kg / m^3

Vermiculite :

obtenue par expansion à l'air chaud vers 900°C puis refroidissement brusque de paillettes de micas (minéral en feuillets facile à séparer ,composé des silicates ,riche en aluminium et en potassium) présente une densité sèche de 70 à 130 kg / m^3



Figure 7.4 : la vermiculite

Déchets plastiques : l'utilisation des déchets Plastiques tel que PET, PEHD contribuent à la diminution de la densité des bétons, en améliorant leur l'ouvrabilité sans perte significative de la résistance.

2.1.1.3 Granulats fabriqués spécialement :

Argile et schiste expansés :

sont les plus fabriqués au monde , traités à une température de 1150 °c à 1200 °C, le dégagement de certains gaz dans le matériau lui donne au refroidissement une structure interne alvéole et une surface externe vitrifiée et dure présentant un diamètre de 3 à 25 mm de forme assez arrondie d'une densité sèche de 350 à 750 kg /m³ donnant des bétons d'une masse volumique de 1200 à 2000 kg /m³ .

Verre fritté :

Est un mélange de poudre de verre avec un expansif sous forme granulé traité à 800 ° c donnant des boulettes d'une densité sèche de 130 à 160 kg /m³ .

Polystyrène expansée :

le polystyrène additionné à un agent d'expansion dans des caissons ou circule la vapeur chaude, les paillettes de polystyrène augmentent de volume sous forme de billes sphériques d'un diamètre de 1 à 6 mm dont la densité sèche est de 10 à 15 kg /m³ donnant des bétons de masse volumique 300 à 600 kg /m³ et d'une résistance à la compression de 0.3 à 5 Mpa .

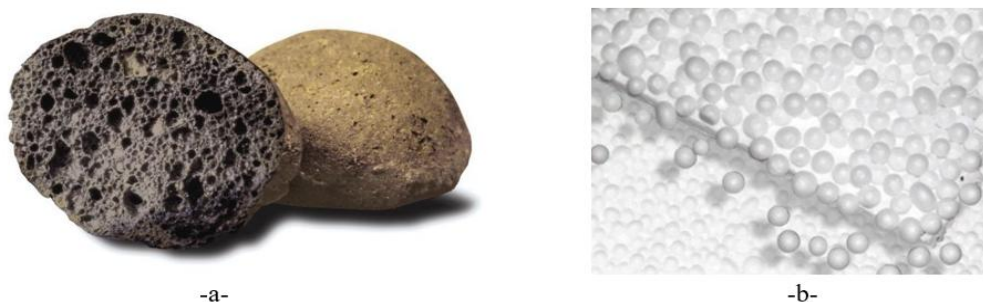


Figure 7.5 : granulats spéciales -a- argile expansé -b- polystyrène

2.1.2 Caractéristiques des granulats légers :

- **porosité** : les granulats légers sont caractérisés par une forte porosité qui varie de 25 à 75 % du volume apparent, la porosité des granulats manufacturés varie proportionnellement avec leur taille.
- Absorption : **l'absorption des granulats légers dépend de leur réseau poral et la présence ou non d'une enveloppe plus dense à la surface des granulats. Les granulats manufacturés présentent une absorption de 10 à 20 % après 24 h.**

Le tableau 7.2 présentent les valeurs de l'absorption des granulats légers :

Tableau 7.1 : Absorption des granulats légers

Au bout de	5min	1h	1j	28 j
Absorption forte	10%	15%	27%	45%
Absorption faible	5 %	7 %	12 %	15

2.2. Béton caverneux :

Ce sont des bétons obtenus par mélange de ciment et des granulats (courants ou légers) avec élimination totale, ou partielle des granulats fins (sable), avec une quantité d'eau de gâchage minimale juste nécessaire pour assurer l'enrobage des graviers.

Donc le béton caverneux est très poreux en raison de la présence dans sa masse de vides dus à l'absence du sable (granulats fins). Ce type de bétons est utilisé dans le cas où la résistance n'est pas recherchée, c'est le cas :

- Des murs banchés ; - pavage des routes
- des bétons de remplissage.

La résistance en compression du béton caverneux est généralement comprise entre 3 et 7 MPa. On note une augmentation de la résistance avec l'âge semblable à celle des bétons de densité normale. il présente une forte porosité de l'ordre de 15 à 25 % du volume , une forte perméabilité et une masse volumique inférieure à 1800 kg/m^3 . Le retrait de ce type de béton est plus faible par rapport un béton normale avec une grande résistante au gel.

2.3. Béton cellulaire :

L'incorporation de vides stable à l'intérieur de la pâte de ciment ou du mortier durci constitue une méthode pour réduire la masse volumique du béton. L'incorporation d'un gaz se fait habituellement en utilisant de la poudre d'aluminium finement divisée, dans une proportion d'environ 0.2% de la masse de ciment. La réaction de la poudre avec l'hydroxyde de calcium ou les alcalis du ciment libère des bulles d'hydrogène. Les bulles provoquent

l'expansion de la pâte de ciment ou du mortier qui doivent avoir une consistance suffisante pour empêcher qu'elles ne s'échappent. Il est constitué du sable fin, du ciment, de la chaux et d'un agent expansif tel que :

- Poudre d'aluminium
- Agent moussant
- Entraîneur d'air.

Au milieu alcalin la poudre d'aluminium réagit comme suit :



2.3.1 : structure du béton cellulaire :

La structure de béton cellulaire est caractérisée par sa matrice microporeuse.

Les microscopes sont formés en raison de l'expansion de la masse causée par le dégagement du gaz et les microscopes apparaissent dans les parois entre les microscopes qui sont des pores avec un diamètre de plus de 60 μm .

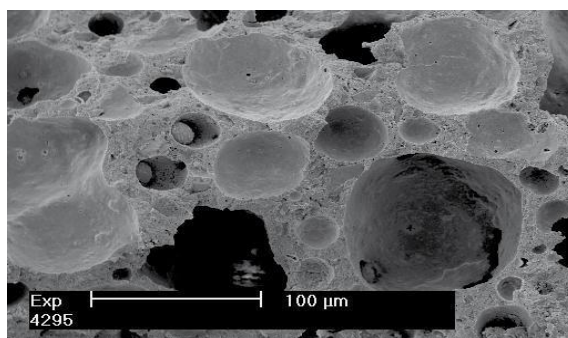


Figure 7.6 : structure du béton cellulaire

Les bétons cellulaires ont généralement une résistance à la compression (0.5 à 6 Mpa) et une masse volumique extrêmement faibles (0.4 à 1.2 t / m) , leur conductivité thermique varie de 0.16 et 0.4 w / m /°c. L'utilisation la plus courante des bétons cellulaires se limite au béton de remplissage.

3. Formulation des bétons légers

A l'exception des granulats légers, les constituants et les méthodes de formulation utilisées sont les mêmes que pour les bétons de granulats rigides. Une attention particulière doit cependant être portée à la densité apparente et à l'absorption des granulats. Il est possible d'y intégrer des adjuvants et autres matériaux pour changer et améliorer certaines de ses caractéristiques. il est possible d'ajouter de la fumée de silice dans la formulation du béton léger pour améliorer ses résistances mécaniques.

Un Exemple de composition d'un béton léger est représenté dans le tableau 7.2

Tableau 7.2 : composition d'un béton léger

matière	Masse (kg)	Masse volumique	Volume absolu (l)
ciment	400	3.15	127
Granulats secs	510	1.2	425
Sable sec	631	2.62	241
eau	175	1	175
adjuvant	2	1.2	1.7
Eau absorbée par les granulats	25	1	
Air occlus	-		30
Total	1743		1000

4. Les propriétés des bétons légers :

4.1. La masse volumique :

La masse volumique est une caractéristique physique très importante. La diminution de la masse volumique est liée au type de granulat utilisé et aux proportions des différents constituants.

4.2. La légèreté :

L'emploi du granulat léger a pour conséquence une diminution de 20 à 30% de la masse volumique de béton. L'intérêt est d'avoir un matériau facile à mettre en œuvre lorsqu'il est vendu manufacturé sous forme de parpaings. De plus, ce matériau allégé nécessite une fondation moins importante lors de la construction

4.3. La résistance à la compression :

Les bétons légers présentent des résistances à la compression inférieure à celles des bétons ordinaires ; cependant quelques types de bétons légers, évidemment par ajout de produits peuvent atteindre des résistances similaires à celles du béton classique, c'est le cas des bétons légers de haute performance BLHP.

La qualité des granulats est considérée comme le principal facteur limitant la résistance en compression des bétons de granulats légers, vient ensuite la qualité et la masse volumique du béton durci. La résistance est de 60 à 70MPa pour une masse volumique de 1800 à 1900 kg/m³. Cependant la résistance en compression est influée par plusieurs paramètres tels que :

- Le dosage en ciment :
- Le dosage en eau :
- Le dosage en granulats (rapport G/S) :
- Les caractéristiques des granulats légers utilisés :(masse volumique - résistance - taille)

La rupture en compression d'un béton léger se produit en général par cassure des

granulats légers.

Le tableau 7.3 présente la résistance en compression du BL en fonction de sa densité.

Tableau 7.3 : la résistance en compression du BL en fonction de sa densité

Densité sèche	Résistance en compression	utilisation
400 -800	2 - 8 Mpa	isolation
800 -1400	8 -20 Mpa	Isolation + porteur
1400- 1800	20 - 50 Mpa	porteur

4.4. Conductivité thermique :

L'une des caractéristiques les plus importantes des bétons légers est le pouvoir isolant, ce pouvoir est caractérisé par un paramètre thermo physique qui est la conductivité thermique

Le tableau suivant donne les valeurs de la conductivité des différents types de bétons :

Tableau 7.4 : conductivité des différents types de bétons

Béton ordinaire	2,1
Béton allégé (+ granulats poreux)	0,47 à 1,2
Béton allégé (+argile expansé)	0,3 à 0,73
Béton cellulaire	0,14 à 0,23
Béton léger (+ granulats non poreux)	0,81 à 1,2
Béton léger (+ granulats poreux)	0,22 à 1,2
Béton léger (+ pierre ponce)	0,15 à 0,46
Béton léger (+ argile expansé)	0,18 à 0,46

Le tableau 7.5 regroupe les deux dernières caractéristiques en fonction de la densité du béton léger

Tableau 7.5 : différentes caractéristiques des BL en fonction de la densité

Densité kg / m	Résistance Mpa	Conductivité (w/m /°c)
300	1	0.1
400	1.5	0.15
600	2.5	0.2
800	6	0.25
1000	9	0.38
1200	13	0.45
1400	17	0.55
1600	29	0.7
1800	32	0.85

4.5. Le module d'élasticité : le module des bétons légers est inférieur à celui du béton de poids normal de résistance équivalente.

4.6. Le fluage et le retrait : des bétons légers sont plus élevés que ceux du béton de poids normal équivalent, et cela doit être pris en compte lors de la conception de la structure

5. Classification des bétons légers :

Selon l'utilisation prévue des bétons légers ils peuvent être classés en :

- Béton léger structurel (ASTM C 330-82a) : Répond aux exigences de résistance spécifiques des applications structurelles.
- Béton pour éléments de maçonnerie (ASTM C 331-81) : Utilisé dans la production de blocs de béton et autres éléments de maçonnerie.
- Béton isolant (ASTM C 332-83) : Principalement utilisé à des fins d'isolation thermique

Une classification basée sur la masse volumique et la résistance à la compression est présentée sur le tableau 7.6 :

Tableau 7.6 : classification des BL

Classification	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$R_c(\text{MPa})$
Béton léger de structure	1350-1900	> 17
Béton léger de résistance modérée	800-1350	7-17
Béton de faible résistance	300-800	< 7

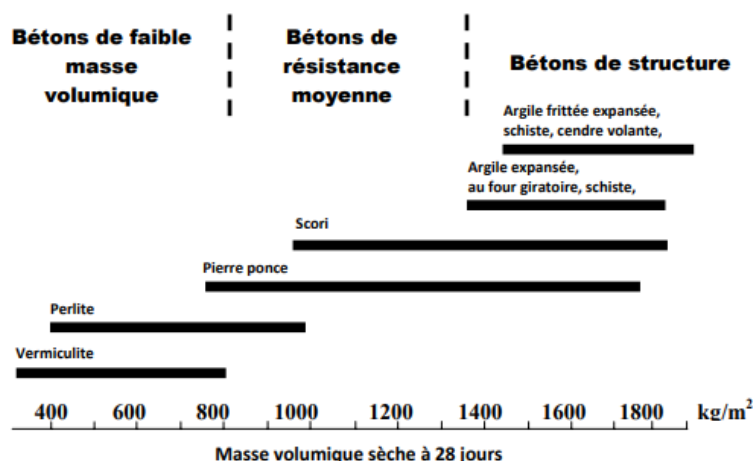


Figure 7.7 classification Bès BL en fonction de la masse volumique sèche

6. Différence entre les bétons classiques et les bétons légers :

Malgré leurs bonnes qualités, les bétons classiques ont toujours présenté des inconvénients à savoir :

- Le poids propre des éléments en béton très élevé (poids mort hors charges).

- Exigence d'un sol de forte capacité de portance.
- Mise en œuvre assez délicate (coffrage et coulage).
- Caractéristiques thermiques et phoniques médiocres

En revanche l'utilisation d'un béton de faible masse volumique peut être bénéfique en terme :

- D'éléments porteurs de faible section
- Mise en œuvre facile et par conséquent une productivité élevée.
- Permet de construire sur des sols de faible capacité de portance
- Procure une meilleure isolation thermique et phonique
- Meilleure tenue au feu et au gel dégel

7. *Domaine d'utilisation des bétons légers :*

Selon leur résistance, les bétons légers sont utilisés soit comme :

- **Béton de structure** : C'est le cas des bétons légers de haute performance, les bétons au laitier expansé, à l'argile frittée expansée...etc.
- **Isolant porteur** : C'est le cas des bétons à la pierre ponce, béton à l'argile expansé...etc.
- **Isolants** : leur résistance est faible, dans cette catégorie on peut citer : Les bétons cellulaires Dans la construction on les utilise comme :
 - Bloc de maçonnerie
 - Panneau préfabriqué.
 - Mur antibruit.
 - Bardage.
 - Ouvrage extérieur.
 - Élément de cave.
 - Entrevous et hourdis.
 - Les pavés.
 - travaux de remise à niveau

8. *Avantages du béton léger :*

- Le béton léger présente plusieurs avantages, tels que :
- L'augmentation des propriétés d'isolation thermique et acoustique
- Les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger.
- Légèreté : plus léger qu'un béton classique, le béton léger a une densité de 0.4 à 1.2 en comparaison de 2.2 à 2.5 pour un béton classique.

- Non inflammable
- Economie sur le ferrailage des éléments.
- Le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids des fondations.

9. Désavantages de béton léger :

- Le prix est plus élevé à cause du dosage en ciment plus important.
- La mise en place est délicate car le béton est plus sensible.
- Consommation d'eau plus importante, granulats à porosité importante.
- Il est difficile de le mettre en place avec une pompe à béton.



10. réalisations en béton léger :

Figure 7 : Pont de Beaumont-sur-Oise - France - 120 m réalisé en 1997



Figure 7 pont Dyckerhoff - Allemagne - 96 m

Chapitre 8 : Béton lourd

1. Définition :

les bétons lourds sont des bétons de grande densité variant de 3 t/m^3 à 4.5 t/m^3 (bien qu'il soit possible d'atteindre 6 t/m^3), destinés principalement à la réalisation des ouvrages à haut risque radioactif (centrale nucléaire, appareillage de laboratoire,.....) toutes ces installations se caractérisent par l'émission de rayonnement dont certains (rayons Gama) sont très nocifs.

Pour obtenir ce type de béton il faut :

- un minimum de vides
- utilisation des granulats denses.

Les bétons lourds ne diffèrent pas essentiellement des bétons classiques sauf par la présence des granulats denses.

2. Compositions des bétons lourds

La sélection rigoureuse des composants et le dosage du mélange constituent un processus plus critique dans la fabrication du béton lourd que dans celle des mélanges de béton conventionnel.

2.1. Ciment : la teneur en ciment dans le béton lourd doit être suffisamment élevée pour éviter les fuites radioactives et suffisamment faible pour éviter l'effet de retrait susceptible de provoquer une fissuration indésirable de la structure en béton sous contraintes. Par conséquent, la teneur en ciment recommandée doit être supérieure à 350 kg/m^3 ; Il est essentiel d'étudier la composition et la finesse du ciment, ainsi que sa compatibilité avec les adjuvants chimiques utilisés pour obtenir une résistance élevée et maintenir une bonne maniabilité. Techniquement, n'importe quel type de ciment Portland peut être utilisé pour confectionner un béton lourd. Le ciment le plus adapté au béton est le ciment Portland ordinaire « TYPE I ». La teneur en ciment est un facteur important dans les bétons de construction à haut rendement, avec une teneur minimale en ciment de 300 kg/m^3 qui peut aller à 400 et 490 dans le cas des bétons de protection contre les radiations produits à base de barytine, de magnétite .

2.2. L'eau : le rapport E/C est l'un des facteurs les plus importants dans la préparation de bétons lourds ; les rapports eau/ciment utilisés se situent dans une fourchette limitée, entre 35 % et 50 % du poids total du liant.

2.3. Les granulats : Plusieurs propriétés des granulats, telles que la densité, la composition chimique, la composition minérale, la dureté et la résistance, dépendent des propriétés de la roche mère et chacune de ces propriétés joue un rôle important dans la formation des bétons lourds. Une bonne granulométrie des granulats améliore le module

d'élasticité, la résistance, le retrait et le fluage. La forme des particules et la texture de surface comptent parmi les autres paramètres importants influençant l'efficacité du compactage.

2.3.1. Principaux granulats employés :

- **La barytine** : ($\text{SO}_4 \text{ Ba}$) sulfate de baryum, c'est une matière opaque plus ou moins blanche à structure lamellaire. Sa densité moyenne est de 4.5, elle est utilisée pour la fabrication des bétons dont la densité atteint 3.6. elle est employée sous forme de sable 0 /3, de gravillon 3/7 et gravier 15 /30.



Figure 8.1 la barytine

- **La magnétite** : (Fe O_4) est un minéral à base de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) dont la densité moyenne de 4 à 5 selon les provenances, utilisée pour la fabrication des bétons



de densité de 3.4 à 3.6

Figure 8.2 La magnétite

- **Les déchets ferreux** : ce sont des déboucheurs et coupures d'acier, riblons, grenailles de fonte dont la densité de 7.4 à 7.7 ; sont utilisés pour les bétons ultra lourds de masse volumique de 4500 à 5000 kg/m^3 .



Figure 8.3 les déchets ferreux

- Les autres granulats :
 - ✓ **Serpentine** : $2\text{SiO}_3 \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ de différentes couleurs et de densité de 2.5 à 3.3
 - ✓ **Limonite** : $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ensemble d'oxydes et d'hydroxydes de fer, de densité de 2.7 à 4.3
 - ✓ **Sidérose** : $\text{CO}_2 \cdot \text{Fe}$ ressemblant à la limonite, de densité de 3.9 à 4.1.
 - ✓ **Corindon** : Al_2O_3 composé d'aluminium cristallisé et coloré, de densité de 4
 - ✓ **Hématite** : Fe_2O_3 avec des traces de titane, d'aluminium et d'eau de densité de 4.9 à 5.3.

les propriétés de la barite et de la magnétite sont illustrées sur le tableau 8.1

Tableau 8.1 : les propriétés de la barite et de la magnétite

PROPERTIES	BARITE		MAGNETITE	
	COARSE	FINE	COARSE	FINE
Specific gravity	4.04	4.00	3.48	2.86
Density, (kg/m ³)	4250	4120	4730	5130
Water absorption, %	0.6	-	0.83	-
Elongation index, %	14.8	-	34	-
Flakiness index, %	37.1	-	30.3	-
Crushing value, %	63.3	-	19.87	-
Abrasion resistance, %	99.20	-	28.1	-

2.4. Le superplastifiant :

L'utilisation de superplastifiants peut améliorer la fluidité du béton grâce à leurs actions de liquéfaction et de dispersion des particules de ciment.

2.5. Additions minérales : les différentes additions minérales peuvent être utilisés pour augmenter la compacité du béton lourd tels que : les cendres volantes, le laitier du haut fourneau et la fumée de silice.

3. Composition des bétons lourds :

La composition du béton est en général faite d'après la méthode de Valette ou de faury . les dosages en ciment sont en général de 300 à 350 Kg /m³ , le dosage en eau doit être assez faible (0.35 à 0.5)car le béton lourd très mou est très sensible à la ségrégation (on peut

utiliser un plastifiant ou un superplastifiant pour faciliter la mise en œuvre lors de la phase de coulage). Pour obtenir la compacité maximale (nécessaire à l'efficacité de la protection) le rapport mortier / granulats (en poids) à pour valeur optimale de 0.7.

Exemple de formulation :

- ciment 300 kg
- granulats de barytine 3240 kg
- E /C = 0.4 (120 kg)

un tel béton possède une résistance à la compression à 28 jours de 34 Mpja , et une résistance à la traction de 3 Mpa .

Pour un béton anti radiation :

- ciment 250 - 400 kg
- eau 120 - 140 kg
- sable (d'hématite) 0 /1 : 1000 - 1300 kg
- sable (d'hématite) 0 /5 : 900 -1000 kg
- gravier (d'hématite) 8 / 25 : 1700 - 1800 kg

La composition du béton lourd en fonction des différents types de granulats lourds est présentée dans le tableau 8.2 :

Tableau 8.2 : composition du béton lourd en fonction des différents granulats

matière	Masse volumique	. masse des matériaux pour masse volumique désirée			
		3500 kg /m ³	3500 kg / m ³	Sup 3800kg/m ³	4200 kg /m ³
ciment	3.00	300	300	300	300
Eau	1	170	170	170	170
Gravier et sable	2.6	420	-	-	-
barytine	3.95	-	1610	-	-
hématite	4.85	2680	1490	3470	2860
Granulats ferreux	7.50	-	-	-	940

4. Propriétés des bétons lourds :

- Sensibilité à la ségrégation
- La résistance mécanique des bétons lourds est comparable à celle bétons classiques (et même élevée compte tenu du E /C faible).
- Le retrait du béton lourd est légèrement important que celui d'un béton classique.

- Cure indispensable en raison du retrait

5. Fabrication et mise en œuvre :

Les méthodes et les procédés sont les mêmes que pour les bétons classiques, les précautions qu'il faut prendre sont :

- Utilisations des malaxeurs à axe vertical sans les remplir complètement
- La vibration doit être efficace mais limitée
- Une vibration par couche est obligatoire.
 - Les coffrages doivent être très rigides, étanches et bien charpentés pour supporter la pression des bétons lourds.
- Il est mis en œuvre à la goulotte du camion-citerne ou à la pompe.

6. Domaines d'application :

Les bétons lourds sont particulièrement employés dans la réalisation d'ouvrages de :

- **stabilisation** : tels que les radiers lourds, les culées de ponts, les contre poids.
- **protection** : contre les rayonnements ou les explosions et autres rayons radioactifs pour les centrales nucléaires et les salles de radiothérapie.
- pour réduire les épaisseurs.
- sols industriels.



Figure 8.4 : réalisations en béton lourd

***Chapitre 9 :
Béton à base des granulats recyclés***

Introduction :

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la guerre mondiale en Allemagne. Depuis cette date, plusieurs recherches ont été menées pour développer l'utilisation du béton recyclé comme constituants de nouveau béton.

Les voies de l'obtention des déchets de démolition sont multiples : de nombreux bâtiments anciens et autres structures ont dépassé leur limite d'utilisation et doivent être démolis; les structures, même adéquates pour un logement, sont en cours de démolition, en raison de nouvelles exigences et nécessités et la création de déchets de construction résultant de phénomènes naturels de destruction (tremblements de terre, tempêtes ...)

1. Définition :

Un béton recyclé est un béton fabriqué au moyen de granulats provenant du concassage d'un béton existant. C'est à dire qu'il s'agit d'un mélange de pâte de ciment Portland usuel auquel la fraction grossière des granulats (de 5 à 20 mm) est remplacée par le produit d'un béton concassé (le granulat est en fait un mélange de pierre et de ciment hydraté)



Figure 9.1 : déchets du béton démoli

2. Intérêt de l'utilisation du béton recyclé :

Le recyclage du béton est une alternative de plus en plus valorisée, il présente de nombreux avantages sur le plan économique et écologique. Chaque année le secteur du bâtiment et des travaux publics génère 300 millions de tonnes de déchets qui sont peu ou pas valorisés.

Les avantages du recyclage sont :

- réduction de la pollution du transport vers les décharges

- réduction des coûts de transport des matériaux et des déchets
- économiser les espaces d'enfouissement
- préservation des ressources naturelles

3. Description du granulat recyclé :

Les granulats du béton recyclé sont composés d'un mélange intime des granulats naturels et une pâte de ciment durcie adhérente ; selon leur taille ils peuvent être composés d'un ou plusieurs gros granulats naturels entourés entièrement ou partiellement par une couche de pâte de ciment ou du mortier résiduel, comme ils peuvent aussi apparaître essentiellement comme un fragment du mortier résiduel avec des proportions variables de petits granulats naturels.

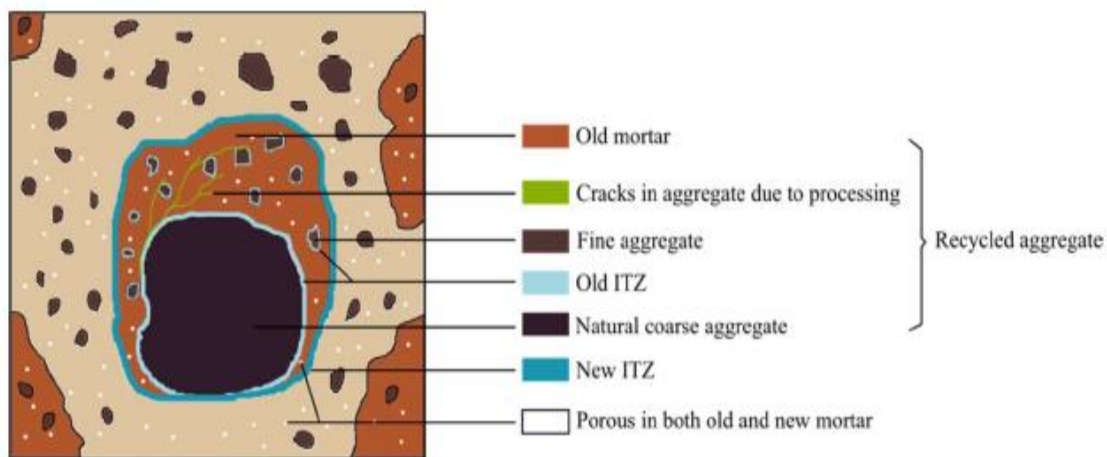


Figure 9.2 : configuration d'un granulat recyclé

Les granulats recyclés sont plus hétérogènes que les granulats naturels, ils possèdent des propriétés qui diffèrent essentiellement de celles des granulats naturels, en particulier la présence de la pâte durcie qui procure au béton une porosité et une absorption plus élevée, ainsi une masse volumique réelle plus faible. Cette pâte de ciment, composée d'aluminates et de silicates hydratés se révèle friable et chimiquement réactive. Ainsi, les granulats recyclés :

- ont globalement des résistances mécaniques plus faibles que les granulats naturels ;
- sont plus sensibles à certaines réactions chimiques (. réaction sulfatique interne...) ;
- montrent parfois une aptitude au compactage amoindrie en fonction de l'angularité du matériau et de la teneur en eau.

Les granulats du béton recyclé doivent être de bonne qualité pour pouvoir être incorporés dans le béton, il faut qu'ils présentent une teneur élevée en béton et matériaux rocheux, sans trop contaminés par le plâtre, du bois et du plastique.

La norme NF EN 206/CN autorise l'utilisation de granulats recyclés issus de la déconstruction pour la formulation des bétons en précisant les conditions et les limites d'utilisation (article NA.5.1.3 Granulats). Les granulats recyclés doivent être obtenus par traitement de matériaux minéraux auparavant utilisés en construction et être conformes aux normes relatives aux granulats, qui spécifient les caractéristiques et les propriétés des granulats recyclés.

4. Préparation des granulats recyclés

Un tri est indispensable pour séparer les bétons des autres matériaux (plâtre, PVC, armatures, ...) lors de la déconstruction de bâtiments ou d'infrastructures, puis lors du traitement des déchets sur les plateformes de tri et de regroupement.

Une fois les déchets triés et séparés, le béton est concassé, déferrailé puis passé au crible. Des traitements complémentaires peuvent avoir lieu si l'on souhaite rendre la matière finale encore plus pure. Après ces opérations, le béton se retrouve sous forme de gravillons ou de gravats. Il subit un contrôle en laboratoire pour vérifier la composition du produit fini et écarter tout risque de pollution.



Figure 9.3 : préparation des granulats recyclés

5. Les propriétés des granulats recyclés :

- **Densité** : la diminution de la densité des (G R) par rapport aux (G N) influence la densité du béton .cette diminution est attribuable au mortier résiduel attaché da granulat d'origine , généralement la densité des GR varie de 2.2 à 2.5 (pour un GN est de 2.5 à 2.75)

- **Absorption** : les GR ont une absorption beaucoup plus grande que celle GN, ce qui influence le comportement rhéologique des bétons frais (pour obtenir l'ouvrabilité désirée ils nécessitent une quantité supplémentaire d'eau). Cette forte absorption est liée à la structure alvéolaire de la pate de ciment adhérente, les interstices ont tendances à capter l'eau et à le retenir.

- **L'absorption** des GR varie de 3 à 10 % (pour les GN de 1 à 5 %)
- **Perte de masse** : en raison de la configuration des GR, leur perte de masse à l'abrasion est plus grande en comparaison avec les GN .
- selon la norme Américaine (ASTM) pour qu'un granulat recyclé soit utilisable il faut que son coefficient Los Angeles A inférieur à 50 % .
- **Distribution granulométrique** : Les GR ont souvent plus de particules fines que les GN. Généralement la granulométrie de GBR est étroitement liée à la résistance du béton recyclé concassé et au type de concassage réalisé.
- **Teneur en mortier résiduel** : ce facteur est le plus important pour déterminer la qualité des GR; cette valeur varie de 20à 55 % selon la méthode utilisée (la méthode de l'expansion thermique est la plus efficace)
- **Taille** : La dimension des GBR dépend non seulement de la qualité du béton d'origine (d'où sont extraits les GBR) mais aussi de la technique de concassage. En effet, plus le béton d'origine est de faible qualité, plus on assiste à une augmentation du taux de fines ou sable recyclé avec des tailles moyennes de grains comprises entre quelques micromètre et 4mm (0/4 mm).

Le tableau 9.1 donne le pourcentage du mortier attaché aux granulats recyclés en fonction de la granulométrie des granulats et le rapport E/C du béton dont ils sont extraits.

Tableau 9.1 : taux du mortier attaché en fonction de la granulométrie et le rapport E/C

Rapport E/C du (BN)	Granulométrie(GBR) (mm)	Pourcentage volumique de mortier attaché (%)
0,4	4/8	58
	8/16	38
	16/32	35
0,7	4/8	64
	8/16	39
	16/32	28
1,2	4/8	61
	8/16	39
	16/32	25

6. Les propriétés du béton de granulats recyclés :

- **L'ouvrabilité** : l'utilisation des GR en remplacement des GN dans le béton conduit à une baisse de l'affaissement, la forme rugueuse des GR peut influencer ce dernier; l'utilisation des superplastifiants est très bénéfique (comme effet secondaire ils diminuent l'absorption en eau) . la morphologie et la rugosité des GR conduisent à une augmentation de la dose effective d'eau ou de plastifiant/super plastifiant pour

maintenir l'affaissement, il est généralement recommandé d'ajouter de l'eau progressivement pour éviter ce problème, par conséquent, il est généralement recommandé d'utiliser des GR pré-saturés

- **la masse volumique** : une diminution de la masse volumique à l'état frais de l'ordre de 15 % est remarquée.
- **l'absorption** : une forte absorption est remarquée dans les bétons à base de GR, elle est fonction du taux de remplacement des GN par les GR, et du dosage en ciment dans l'ancien béton.
- **Résistance à la compression** : la diminution de la résistance à la compression est fonction du taux de remplacement, elle est de l'ordre de 15 à 20 % à 28 jours de durcissement, ce qui est lié à plusieurs facteurs :
 - la grande absorption des granulats
 - la taille du granulat et son origine
 - augmentation des zones fragiles dans le béton (zone de transition interfaciale).

En cas de substitution totale des granulats du béton (gros et fins) par des granulats recyclés, la diminution de la résistance en compression oscille entre 24% et 35%. La figure 9.4 illustre la variation de la résistance en fonction du taux de remplacement des GN par les GR.

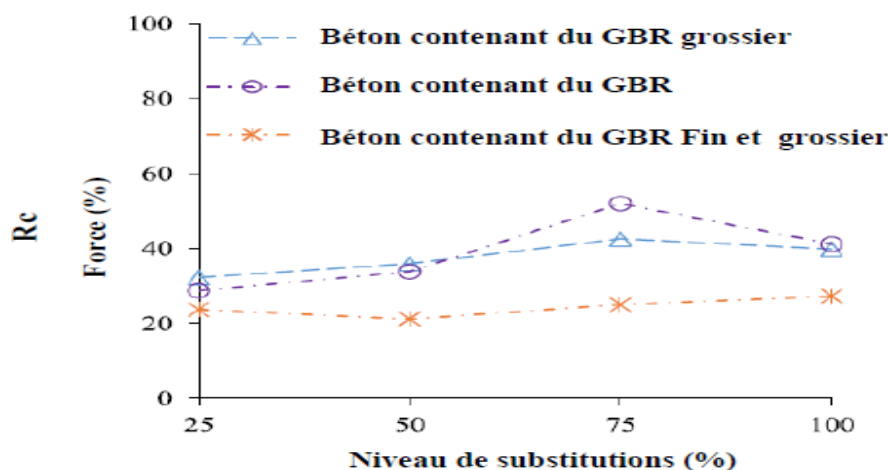


Figure 9.4 : la variation de la résistance en fonction du taux de remplacement

Généralement pour des rapports E/C sup à 0.4 la résistance d'un béton à GR est identique à celle d'un béton à GN ; un remplacement de l'ordre de 25 % n'a pas d'influence sur la résistance à la compression.

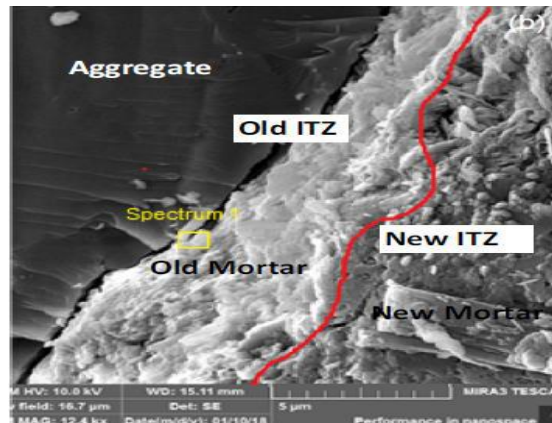


Figure 9.5 : zones de transition inter faciales

- **Résistance à la traction** : d'une façon similaire à la résistance de compression, la résistance à la traction est influencée négativement en fonction du taux de remplacement des GN par les GR.
- **Module d'élasticité** : le module d'élasticité est largement influencé par la qualité des granulats, dans le cas des bétons à base des GR, une baisse du module d'élasticité de l'ordre de 25 % est signalée, la fragilité intrinsèque des GR en comparaison avec les GN étant la cause ; ce qui peut provoquer des déformations importantes.
- **Retrait de séchage** : à cause de la forte absorption ; les bétons à base de GR présentent un retrait de séchage important.

Généralement la sélection de granulats dont la teneur en mortier est inférieure à 44 % peut permettre d'obtenir des GR de bonne qualité pour la production d'un béton structuré. En utilisant ce critère, on peut obtenir des granulats ayant une densité apparente supérieure à 2160 kg/m³, une absorption d'eau inférieure à 8 % et une perte à l'abrasion inférieure à 40 %.

6.1. Cas du remplacement du granulat fin :

Le remplacement d'une partie des gros granulats naturels par GR ne modifie pas significativement les propriétés du béton ; par contre le remplacement des granulats fins par des GR fins présentant une forte absorption conduit à un béton avec de moins bonnes performances. Par contre la partie fine (poudre) peut renfermer un ciment non hydraté qui peut contribuer à l'amélioration de la résistance en compression, en outre la grande porosité des GR peut assurer une bonne adhérence entre la pâte du ciment et le granulat fin.

Le tableau 9.2 résume le taux de remplacement des GN par les GR recommandé par la norme EN 206-1/CN.

Tableau 9.2 : Pourcentage massique des GBR autorisés par la norme EN 206-1/CN, avec : 1 : 95 % du béton 2 : 90 % du béton et 3 : 70% du béton.

Type de granulats	Classe d'exposition			
	XO	XC1, XC2 (%)	XC3, XC4, XF1, XS1 (%)	Autres classes
Sable	30	0	0	0
1	60	30	20	0
2	40	15	0	0
3	30	5	0	0

7. traitement des GR :

Plusieurs méthodes de traitement du GR visant à améliorer ses propriétés médiocres sont mentionnées dans la littérature. Fondamentalement, ces méthodes peuvent être regroupées en deux catégories : celles visant à éliminer autant que possible le mortier adhérent, et celles visant à améliorer les propriétés du mortier adhérent par le biais d'un traitement spécifique.

La figure 9.6 illustre les différentes méthodes de traitement des GR.

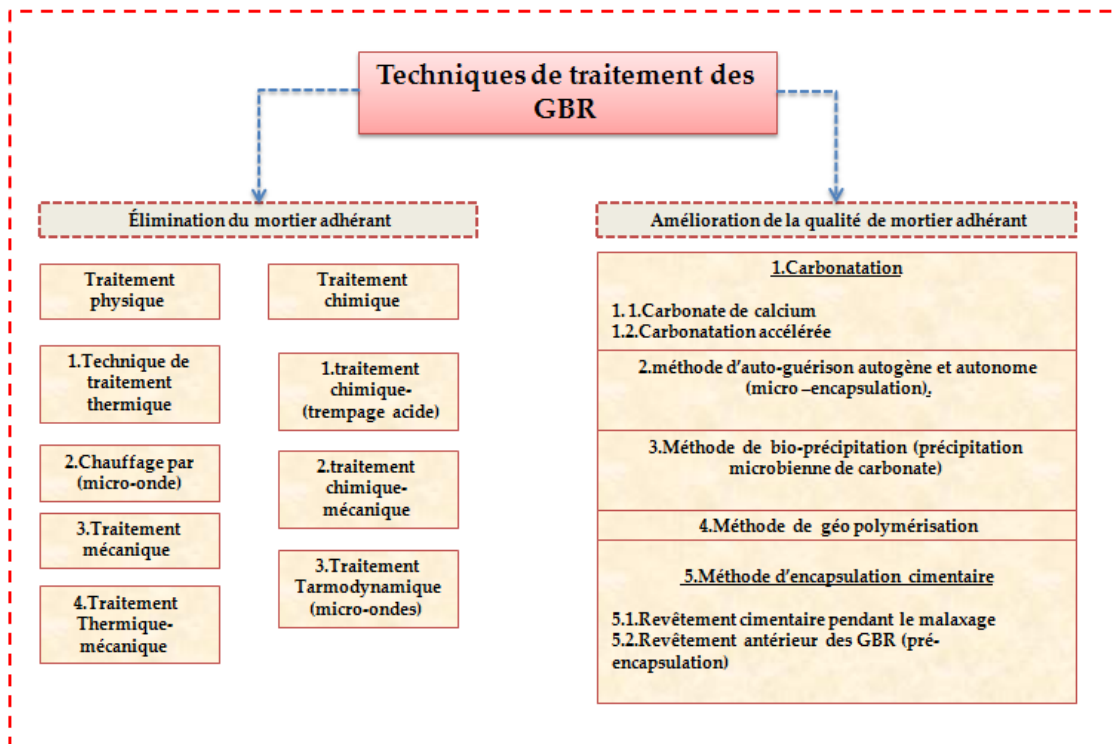


Figure 9.6 : les différentes méthodes de traitement des GR.

8. Domaine d'utilisation des granulats recyclés :

Les applications des granulats recyclés dans les travaux de construction sont multiples et ceux-ci peuvent remplacer utilement et avantageusement les granulats dits « naturels » dans la grande majorité des utilisations traditionnelles, on cite

- application en sous fondation et voirie
- application en fondation, sous fondation et fondations des bâtiments industriels
- fondations des parkings.
- application en construction : béton maigre



Figure 9.7 : logement collectif (100% GR) France 2024

Références :

Chapitre 1 : Propriétés et performances des matériaux

- Hadj sadok. Généralités, classent des matériaux. Cours .2011
- <https://www.filiere-3e.fr/2014/01/16/materiaux-composites-proprietes-utiles-usinage-difficile/>
- M. F. Ashby, Materials selection in mechanical design, Oxford, OX, 2nd, 1999, 407 p.
- cours choix des matériaux wxcdsqaze1.free.fr/1.pdf
- Nora Bouzeghaia. Méthodes de sélection des matériaux .Cours, université de batna ,2019

Chapitre2 : Béton à haute performance

- François de larrard. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées - 206 - Novembre - Décembre I E 1996 - RÉF. 4053 - PP. 63-73
- Jean Claude Aitcin . Béton à haute performance,
- Schutter G. « Le béton à hautes performances » Bulletin FEBELCEM, Fédération de l'industrie cimenterie, P15, Belge 2007.
- www.guide beton.com
- Eléments de matériaux de construction et essais . cours présenté par Cherait yassine et Nafa zahredinne . 2006.
- www.premium-engineering.com
- www.infociments.fr

Chapitre 3 : Bétons Autoplaçants:

- AFGC, « Bétons Autoplaçants - Recommandations Provisoires ». Documents Scientifiques et Technique, Page 63, 2000.
- Assié.S, "Durabilité des bétons autoplaçants", Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 2004.
- Association française de Génie Civil, Recommandations provisoires pour l'emploi des Bétons Autoplaçants, Paris, 2ème édition, AFGC, 64 p. 2008
- <https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/SB-OA-2015-3.pdf>
- Skarendahl.A , Petersson.O, "Self-Compacting Concrete: State-of-the-art report of RILEM Technical Commite 174-SCC", RILEM Publications, France, 2001.

Chapitre 4: Bétons fibrés

- M.venueat -ciments et bétons. 1987
- <https://www.infociments.fr/betons/betons-fibre>
- Guermiti L., "Contribution à l'amélioration de certaines caractéristiques du béton de structure a base de sable de dune corrigé et renforcé par des fibres métalliques", Magister,

Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2013.

- R Benali . Comportement physico-mécanique et durabilité du béton fibré .THèse de doctorat université de Biskra 2022

Chapitre 5 : Bétons de poudre réactive

Ductal. Great Mosque of Algeria. Available

online: <https://www.ductal.com/en/architecture/mosque-algeria> (accessed on 25 July 2019)

- Pierre Richard; Marcel Cheyrezy. (1995). Composition of reactive powder concretes. , 25(7), 1501–1511. doi:10.1016/0008-8846(95)00144-2

- P.C. Aitc'in, S.L. Sarkar, R. Rant, C. Levy, A high-silica-modulus cement for high performance concrete, Advanced Cementitious Materials. Am. Ceram. Soc., p. 103-21, 1991

- Sanjuán, M.Á.; Andrade, C. Reactive Powder Concrete: Durability and Applications. Appl. Sci. 2021, 11, 5629. <https://doi.org/10.3390/app11125629>

- Zbigniew Perkowski 1,* , Mariusz Czabak 1,* , Experimental Research on Concrete Beams Reinforced with High Ductility Steel Bars and Strengthened with a Reactive Powder Concrete Layer in the Compression Zone Materials 2020, 13, 4173; doi:10.3390/ma13184173

Chapitre 6 : Bétons de polymer

- A. NEVILLE : «Propriétés des bétons». Eyrolles. Paris, 2000.

- D. Van Gemert, A. Beeldens From microstructure to macrostructure: An integrated model of structure formation in polymer-modified concrete Materials Science, Engineering 2012

- Frigione, M.. (2013). Eco-Efficient Concrete || Concrete with polymers. , (), 386–436. doi:10.1533/9780857098993.3.386

- Li, X.; Gu, J.; Xu, Y.; Li, S.; Zhang, R. Review of Component Materials and Diverse Applications of Polymer Concrete. Materials 2025, 18, 2745. <https://doi.org/10.3390/ma18122745>

Chapitre 7 : Bétons légers

- J. Cox, A. Ingelaere, J. Sizaire, P. Meulders, E V. Overmeire, ‘Le béton cellulaire matériau d'avenir’, Belgique, fédération Belge du béton cellulaire (Febecel) 2009

- M.SHINK «Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation Des bétons de granulats légers». Université Laval Québec Avril 2003

Mohellebi Samira. Caractérisation et modélisation des paramètres physico-hydro-mécaniques d'un béton léger à base granulats composites, Thèse de Doctorat Génie Civil Tizi-Ouzou ,2014

- Y. Ghernouti, B. Rabehi, B. Safi, R. Chaid, ‘Use of recycled plastic bags waste in the concrete’, Journal of international scientific publications: Materials, Methods and

Technologies', Université de Boumerdes, Juin 2014.

- salma Haouara, L Zeghichi, ouarda Izemmouren, ikram souici . Influence of aluminum waste on the thermo-mechanical properties of lightweight composite mortars based on sand and recycled high-density polyethylene . European Journal of Environmental and Civil Engineering 28 (4), 844-858 2024

Chapitre 8 : Bétons lourds

- Abhinav Kukreti¹, Priyanka Kundra¹, Lavish Kathait¹, Nikhil Garg², Sanjeev. A Review on Properties of Heavy Weight Concrete. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1086 - 2022

- Mohammed A. Khalaf , Cheah Chee Ban, Mahyuddin Ramli. The constituents, properties and application of heavyweight concrete: A review Construction and Building Materials 215(2019) 73 -89

Chapitre 9 : Bétons à base des granulats recycles

- François de lerrard ouvrage scientifique le béton recyclé édité par l'Ifsttar 2018

- L. P. Singh, V. Bisht, M. S. Aswathy, L. Chaurasia, and S. Gupta, "Studies on performance enhancement of recycled aggregate by incorporating bio and nano materials Studies on performance enhancement of recycled aggregate . Construction and Building Materials, vol. 181, no. June, pp. 217–226, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.248.

- C. La, N. Béton, and N. F. En, "NORME NF EN 206 CN," p. 27, 2014.

- H. Sasanipour and F. Aslani, "Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates," Construction and Building Materials, vol. 236, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117540.

- T. C. Hansen, Recycling of demolished concrete and masonry. CRC Press, 1992