

République Algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE RELIZANE

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département : Génie Civil & Travaux Publics



Polycopié de cours du module

# MATERIAUX INNOVANTS

*1<sup>ERE</sup> ANNEE MASTER*

*FILIERE: GENIE CIVIL*

*SPECIALITE: STRUCTURE*

*L'ENSEIGNANT : HADJ MOSTEFA ADDA*

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2023/2024

---

## Avant- propos

---

Le béton constitue le matériau de construction le plus utilisé au monde. D'apparence simple, mais dont le comportement est très complexe. Avec des milliers d'applications et de formulations différentes.

Grace à des progrès scientifiques, ces dernières années, ont vu une révolution dans le domaine du béton, avec l'apparition de bétons plus résistants, plus ductiles, plus durable, ainsi que des bétons plus fluide appelés auto-plaçant (BAP) qui améliorent d'ailleurs considérablement l'esthétique et la mise en place.

Ce polycopié est un support de cours intitulé '**Matériaux Innovants**' s'adresse aux étudiants de master 1 structure filière de génie civil afin d'apprendre et d'approfondir leurs connaissances sur les matériaux de constructions innovants. le programme d'études de ce cours comporte huit chapitres :

- Le premier chapitre présent les différents types de valorisation des matériaux et des déchets dans le but est de produire un matériau écologique qui respecte les critères environnementaux et économiques.
- Le deuxième chapitre « Généralités sur les matériaux composites » : définition et performances mécaniques des matériaux composites ainsi que leur composition, leurs constituants, leurs avantages et inconvénients.
- Le troisième chapitre « Généralité sur le béton », Il comporte une présentation des bétons, leurs compositions, leurs caractéristiques et les principales applications.
- Le quatrième chapitre intitulé « La Formulation d'un Béton Autoplaçant » est pour objectif de comprendre les rôles joués par les différents constituants susceptibles d'être dans la formulation des BAP, et de mettre en évidence les éventuelles interactions entre les constituants.

- Le cinquième chapitre est consacré sur les propriétés du Béton autoplaçant à L'état Frais et Durci,
- Le sixième chapitre, concerne l'étude des différentes propriétés et performances des Béton de fibres, Il comporte une présentation des différents types de fibres utilisées pour renforcer les matériaux cimentaires, leurs caractéristiques et leur application.
- Le septième chapitre « Renforcement et réhabilitation des structures en béton », est totalement consacré à une synthèse d'une recherche bibliographique sur le béton et ces constituant ainsi que son comportement mécanique, le mécanisme d'endommagement et la rupture de béton, les différentes techniques de renforcement ou et de réparation des colonnes et des poutres par utilisation de différents matériaux, en particulier les matériaux composites.
- Le huitième chapitre clôture ce polycopié est consacré aussi aux matériaux de construction spéciaux. Il comporte une présentation des bétons à haute performance, leurs compositions, leurs caractéristiques et les principales applications.

# *sommaire*

---

## **CHAPITRE 1 : ÉCO-MATERIAUX**

<b>1.1.</b>	Définition .....	<b>03</b>
<b>1.2.</b>	Les critères de choix d'écomatériaux .....	<b>04</b>
<b>1.3.</b>	Exemple d'écomatériaux .....	<b>05</b>

## **CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES**

<b>2.1.</b>	Introduction .....	<b>8</b>
<b>2.2.</b>	Description des constituants élémentaires des composites .....	<b>9</b>
<b>2.2.1.</b>	Les fibres .....	<b>9</b>
<b>2.2.2.</b>	La matrice .....	<b>16</b>
<b>2.2.3.</b>	Les charges et additifs .....	<b>18</b>
<b>2.3.</b>	Procédés de fabrication des produits en matériaux composites .....	<b>18</b>
<b>2.4.</b>	Résistance et rigidité des matériaux composites .....	<b>19</b>
<b>2.5.</b>	Caractéristiques des fibres renforcé les polymères (FRP).....	<b>19</b>
<b>2.6.</b>	Conclusion .....	<b>20</b>

## **CHAPITRE 3 : GENERALITE SUR LE BETON**

<b>3.1.</b>	Introduction .....	<b>21</b>
<b>3.2.</b>	Définition de béton .....	<b>21</b>
<b>3.3.</b>	Constituants du béton .....	<b>21</b>
<b>3.4.</b>	Propriétés et caractéristiques de béton .....	<b>27</b>

## **CHAPITRE 4 : LA FORMULATION D'UN BETON AUTOPLAÇANT**

<b>4.1.</b>	Introduction .....	<b>32</b>
<b>4.2.</b>	Définition des bétons autoplaçant.....	<b>33</b>
<b>4.3.</b>	Classification des BAP .....	<b>34</b>
<b>4.4.</b>	Constituants des Bétons autoplaçant .....	<b>34</b>
<b>4.4.1.</b>	Ciment.....	<b>35</b>
<b>4.4.2.</b>	Granulats.....	<b>36</b>
<b>4.4.3.</b>	L'eau de gâchage.....	<b>37</b>

4.4.4.	Additions minérales.....	38
4.4.5.	Adjuvant.....	41
4.5.	La formulation des bétons ordinaires .....	43
4.6.	La formulation des bétons autoplaçant.....	44
4.7.	Modes de formulations des BAP .....	45
4.7.1.	Cahier des charges minimum à l'état frais .....	45
4.7.2.	Particularités de la composition des BAP.....	46
4.7.3.	Quelques points à surveiller .....	49
4.8.	Revue bibliographique des techniques de formulation des BAP.....	50
4.8.1.	Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte.....	50
4.8.2.	Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers.....	51
4.8.3.	Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire.....	52
4.8.4.	Méthode basée sur un plan d'expérience.....	52
4.8.5.	Méthode basée sur le mode de compactage .....	53
4.9.	Principe et application des approches.....	53
4.9.1.	Approche japonaise .....	53
4.9.2.	Approche Suédoise.....	54
4.9.3.	Approche Française .....	55
4.9.4.	Autres méthodes .....	55
4.10.	Conclusion.....	56

## **CHAPITRE 5 : PROPRIETES DU BETON AUTOPLAÇANT A L'ETAT FRAIS ET DURCI**

5.1.	Introduction.....	57
5.2.	Propriétés du béton autoplaçant à l'état frais.....	57
5.2.1.	Caractéristiques Rhéologiques des bétons autoplaçant .....	57
5.2.2.	Caractérisations à l'état Frais des bétons autoplaçant .....	59
5.2.2.1.	L'essai d'étalement.....	60
5.2.2.2.	Essai à la boîte en L.....	61
5.2.2.3.	Essai de stabilité au tamis.....	62
5.2.2.4.	L'essai d'étalement modifié.....	63
5.2.2.5.	Essai de l'entonnoir.....	63

5.2.2.6.	Essai de boîte en U .....	64
5.2.3.	Mise en œuvre des BAP.....	65
5.3.	Propriété des bétons auto-plaçant à l'état durci .....	66
5.3.1.	Résistance mécanique .....	66
5.3.2.	Module d'élasticité (en compression) .....	67
5.3.3.	Retrait et Fluage .....	68
5.3.3.1.	Retrait .....	68
5.3.3.2.	Le fluage.....	69
5.4.	L'influence des compositions sur les propriétés du BAP .....	70
5.4.1.	Influence du dosage en gros granulats.....	70
5.4.2.	Influence des additions minérales.....	71
5.4.2.1.	Filler calcaire .....	71
5.4.2.2.	Les cendres volantes .....	71
5.4.2.3.	Fumées de silice .....	71
5.4.2.4.	Laitier de haut fourneau .....	72
5.4.3.	Influence des adjuvants .....	72
5.4.3.1.	Influence de superplastifiant .....	72
5.4.3.2.	Influence de l'agent de viscosité .....	74
5.5.	Application du BAP .....	76

## **CHAPITRE 6 : GENERALITE SUR LE BETON DE FIBRES**

6.1.	Introduction.....	79
6.2.	Définition .....	79
6.3.	Nature et propriétés des fibres .....	80
6.4.	Avantages et inconvénients des Béton de fibres .....	82
6.5.	Fabrications et mise en œuvre des BFM.....	82
6.5.1.	La maniabilité .....	83
6.5.2.	Méthodes de formulation des BFM .....	84
6.6.	Propriétés des bétons de fibres .....	84
6.6.1.	Caractéristiques physico-chimique des BFM .....	85
6.6.1.	Propriétés mécaniques .....	86
6.7.	Domaine d'utilisation .....	87

## **CHAPITRE 7: RENFORCEMENT ET REHABILITATION DES STRUCTURES EN BETON**

<b>7.1.</b>	Introduction.....	<b>88</b>
<b>7.2.</b>	La nécessité d'un renforcement .....	<b>88</b>
<b>7.3.</b>	Techniques de renfort des structures en béton armé .....	<b>89</b>
<b>7.3.1.</b>	Méthode traditionnelle d'augmentation des sections avec ou sans armatures..	<b>90</b>
<b>7.3.2.</b>	Méthode adjonction d'armature complémentaire .....	<b>92</b>
<b>7.3.3.</b>	Méthode d'injection des coulis .....	<b>94</b>
<b>7.3.4.</b>	Méthode de béton projeté .....	<b>95</b>
<b>7.3.5.</b>	Méthode d'adjonction de matériaux composites .....	<b>96</b>
<b>7.4.</b>	Le polymère renforcé de fibre (PRF).....	<b>97</b>
<b>7.4.1.</b>	Histoire des PRF dans le domaine de construction .....	<b>97</b>
<b>7.4.2.</b>	Caractéristiques des PRF .....	<b>98</b>
<b>7.4.3.</b>	Principe de renforcement par des PRF .....	<b>99</b>
<b>7.4.4.</b>	Lois de comportement du béton confiné en compression .....	<b>100</b>
<b>7.4.5.</b>	Mécanisme de confinement .....	<b>102</b>
<b>7.5.</b>	Contribution du polymère renforcé de fibre (PRF) au renforcement .....	<b>103</b>
<b>7.5.1.</b>	Epaisseur du renforcement.....	<b>105</b>
<b>7.5.2.</b>	Adhésion entre le béton et le PRF .....	<b>105</b>
<b>7.5.3.</b>	Application du PRF.....	<b>106</b>
<b>7.6.</b>	Etude antérieures des techniques de réparation .....	<b>107</b>
<b>7.7.</b>	Durabilité environnemental des PRF.....	<b>109</b>
<b>7.7.1.</b>	Durabilité sous climat froid .....	<b>109</b>
<b>7.7.2.</b>	Durabilité en milieu corrosif .....	<b>110</b>
<b>7.7.3.</b>	Rayons ultraviolets.....	<b>111</b>
<b>7.7.4.</b>	Température.....	<b>111</b>
<b>7.7.5.</b>	Résistance au feu .....	<b>112</b>

## **CHAPITRE 8 : GENERALITES SUR LE BETON A HAUTE PERFORMANCE (BHP)**

<b>8.1.</b>	Introduction.....	<b>115</b>
<b>8.2.</b>	DÉFINITION D'UN BÉTON À HAUTE PERFORMANCE.....	<b>116</b>
<b>8.3.</b>	HISTORIQUE.....	<b>116</b>
<b>8.4.</b>	CLASSES DE BÉTONS.....	<b>119</b>

<b>8.5.</b>	<b>CHOIX DES MATERIAUX .....</b>	<b>119</b>
<b>8.5.1.</b>	<b>LE CIMENT.....</b>	<b>119</b>
<b>8.5.2.</b>	<b>LES GRANULATS .....</b>	<b>120</b>
<b>8.5.3.</b>	<b>LES SUPERPLASTIFIANTS .....</b>	<b>121</b>
<b>8.5.4.</b>	<b>LES AJOUTS CIMENTAIRES.....</b>	<b>125</b>
<b>8.6.</b>	<b>Formulation des BHP .....</b>	<b>131</b>
<b>8.7.</b>	<b>Autres propriétés des BHP .....</b>	<b>132</b>
<b>8.8.</b>	<b>Principaux domaines d'applications .....</b>	<b>132</b>

# CHAPITRE 1

## Écomatériau

---

# ÉCO-MATERIAUX

---

## 1.1. Définition

Un **écomatériau** (parfois dit « matériau écologique » ou « matériau biosourcé » et parfois aussi qualifié de « matériau sain » est un matériau de construction (produit manufacturé en général, ou à mettre en œuvre sur le site de construction) qui répond aux critères techniques habituellement exigés des matériaux de construction (performances techniques et fonctionnelles, qualité architecturales, durabilité, sécurité, facilité d'entretien, résistance au feu, à la chaleur, etc), mais aussi à des critères environnementaux ou socio-environnementaux, tout au long de son cycle de vie (c'est-à-dire de sa production à son élimination ou recyclage) ;

Généralement Un **écomatériau** doit répondre aux critères suivants:

- provenir pour ses matières premières de ressources durablement renouvelables et réellement renouvelées, sans que cela se fasse au détriment d'autres milieux naturels ou espèces ;
- présenter des qualités techniques et performances durables dans le temps ;
- être sain, c'est-à-dire ne pas générer d'impacts négatifs sur la santé, tant lors de sa production que de sa « Mise en œuvre » et tout au cours de sa vie, y compris durant sa phase d'élimination ;
- favoriser le confort de l'habitant et de celui qui le met en œuvre (artisan, ouvrier, habitant) ;
- être aussi sûr qu'un matériau « classique »; (présenter le minimum de risque)
- avoir un impact (coût) environnemental et énergétique faible ou neutre. En particulier le matériau de base ne devrait pas être rare, et il doit induire une consommation d'énergie la plus faible possible sur l'ensemble de son cycle de vie, cette consommation devant être en quelque sorte largement compensée par le fait que son usage permette d'importantes

économies d'énergie durant toute la durée de vie du bâtiment grâce à ses performances d'isolant. Souvent ces matériaux sont totalement biodégradables et ne consomment donc pas d'énergie en fin de vie ;

- présenter à long terme, des coûts d'investissement (conception-fabrication) et différés (entretien, remplacement, recyclage) les plus bas possibles.

## 1.2. Les critères de choix d'écomatériaux

L'emploi des écomatériaux est une des solutions permettant de limiter les impacts d'une construction. La définition d'un écomatériau dépend de différents critères et de leur hiérarchisation, et peut donc varier d'une personne à l'autre : certains mettront en avant les impacts sur la santé, d'autres ceux sur l'environnement.

### CHOIX MULTICRITÈRES

Pour choisir un matériau à mettre en œuvre, 5 critères sont à prendre en compte :



#### CRITÈRE TECHNIQUE

- Fonction première du matériau (porteur, isolation, étanchéité, comportement hygrothermique, etc.),
- Sécurité et facilité de mise en œuvre, durabilité, facilité d'entretien, confort d'utilisation



#### CRITÈRE ENVIRONNEMENTAL

- Abondance, caractère renouvelable et/ou naturel des matières premières
- Impacts environnementaux aux différents stades du cycle de vie du matériau



#### CRITÈRE SANITAIRE

Impacts sanitaires aux différents stades du cycle de vie du matériau (pour le constructeur comme pour l'utilisateur)



#### CRITÈRE ÉCONOMIQUE

- Coût selon la fonction, la qualité et la durée de vie
- Développement de filières locales de production et de transformation



#### CRITÈRE SOCIAL

- Image auprès des utilisateurs
- Conditions sociales de production

## 1. L'analyse de cycle de vie (ACV)

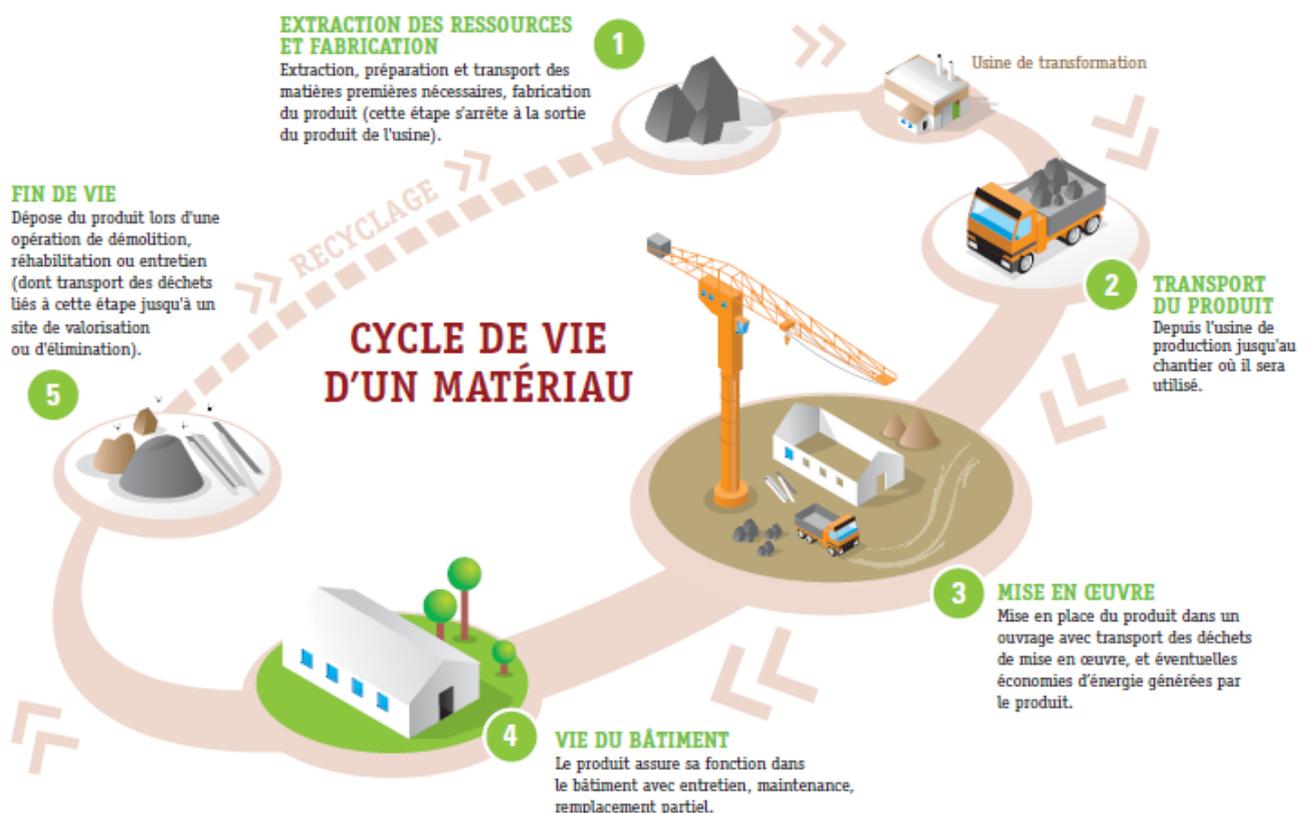
Tout matériau ou produit peut être caractérisé par une analyse de cycle de vie (ACV), qui comptabilise ses impacts environnementaux et sanitaires.

L'analyse du cycle de vie (ACV) est un moyen systémique d'évaluation des impacts environnementaux globaux d'un produit, d'un service, d'une entreprise ou d'un procédé.

Son but, en suivant la logique de « cycle de vie », est de connaître et pouvoir comparer la pression d'un produit sur les ressources et l'environnement tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'à son traitement en fin de vie (mise en décharge, recyclage...) en passant par les ressources naturelles utilisées.

C'est aussi :

- une procédure, c'est-à-dire une suite d'étapes standardisées ;
- un modèle de transformations mathématiques permettant de transformer des flux en impacts environnementaux potentiels.



### 1.3. Exemple d'écomatériaux

- Parpaing contre toute attente, le classique parpaing (ou bloc de béton) s'avère être un étonnant écomatériau : constitué de 87 % de granulats (graviers, pierres et sable), de 6 % d'eau, il ne nécessite que 6 % de ciment chauffé. Étant moulé à froid et sans transport (production locale et non délocalisable), C'est un matériau demandant une quantité moyenne d'énergie grise. Recyclable à 100 %, ce matériau, une fois durci est aussi sans

danger pour la santé : 100 % minéral, il n'émet aucun composés organiques volatils (COV :des composés organiques pouvant facilement se trouver sous forme gazeuse dans l'atmosphère).

- Bois (à condition de choisir des essences naturellement résistantes aux insectes, champignons, UV, etc) et non imbibées de pesticides non dégradables ou produisant des dioxines ou furanes si le bois est brûlé en fin de vie. le bois massif présente un grand intérêt en tant que puits de carbone, mais une utilisation généralisée serait source de déforestation. L'agrosylviculture pourrait être une source complémentaire de bois et fibre..
- huile de lin (qui peut protéger le bois, imperméabiliser un mur, produire le linoleum, etc)
- crin, laines (ex : laine de mouton) et poils ou fibres végétales (consolidant et assouplissant les torchis ou certains enduits)
- Il existe aussi des peintures sans solvants ni dérivés de pétrole dites « naturelles ». Celles-ci sont fabriquées dans une démarche éthique et de respect de la fabrication à la mise en place de la peinture, de l'environnement (maison, travail) au retraitement des résidus de peinture et matériels.
- terre crue ;
- terre cuite.

Matériaux d'isolation :

- chanvre ;
- roche volcanique ;
- liège
- laine de mouton
- paille (dans un mur terre-paille, ou en botte à plat ou sur champs posées et protégées par des techniques adaptées, comme la Solomite).
- lin
- plumes
- ouate de cellulose
- etc.

Par rapport aux isolants conventionnels, ces matériaux, parfois dits « *naturels* » ou « *alternatifs* », à faible conductivité thermique, permettent une Isolation thermique aussi efficace (mais parfois avec une épaisseur nécessaire plus importante) qu'avec la laine de

roche (20 kg/m<sup>3</sup>, 0,050 W/m.K, mais 123 kWh/m<sup>3</sup> d'énergie incorporée, laine de verre(18 kg/m<sup>3</sup> (pour +/- 20 cm d'épaisseur), 0,044 W/m.K, 242 kWh/m<sup>3</sup> d'énergie incorporée, Polystyrène extrudé en plaque expansées aux HCFC (0,035 W/m.K, 795 kWh/m<sup>3</sup> d'énergie incorporée, Mousse de polyuréthane (30 kg/m<sup>3</sup>; 0,029 W/m.K ; 974 kWh/m<sup>3</sup> d'énergie incorporée), verre cellulaire (160 kg/m<sup>3</sup> en plaques ; 0,057W/m.K et 1200 kWh/m<sup>3</sup> d'énergie incorporée)<sup>4</sup>, et sans les inconvénients de ces derniers sur la santé et l'environnement.

# CHAPITRE 2

## GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

---

## GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

---

### 2.1-INTRODUCTION

Un matériau composite est constitué de deux matériaux différents et complémentaires permettant d'obtenir un matériau dont la performance dépasse celle des composants pris individuellement. Le matériau composite étudié est donc constitué de fibres qui représentent le renfort et de résine qui représente la matrice. Les comportements mécaniques et physiques peuvent être modulés en modifiables éléments suivants :

- la nature des constituants,
- la proportion des constituants,
- l'orientation des fibres.

Les fibres procurent les principales propriétés mécaniques du matériau composite, comme la rigidité, la résistance et la dureté. Les fibres de verre, de carbone et d'aramide sont les principaux matériaux de renfort utilisés dans le domaine de la réhabilitation et du renforcement des structures de ponts ou de bâtiments.

La matrice constitue le matériau de liaison assurant la cohésion et le transfert des contraintes à l'ensemble du matériau composite, elle procure aussi une protection contre les agressions du milieu. La matrice d'époxy occupe la plus grande part du marché pour ce qui est de l'application de renforts structuraux externes. D'autres types de résines, tels que les résines à base de polyester, sont également utilisés. [1]

Les matériaux composites présentent plusieurs avantages :

- Grande résistance à la fatigue
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur et de la corrosion
- Insensibilité aux produits chimiques comme les graisses, les huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants et pétrole.

## 2.2. DESCRIPTION DES CONSTITUANTS ELEMENTAIRES DES COMPOSITES

Les matériaux composites sont définis comme un arrangement de fibres noyées dans une matrice. Les principales phases élémentaires et les facteurs d'échelle entre chaque élément sont illustrés sur la figure 2.1

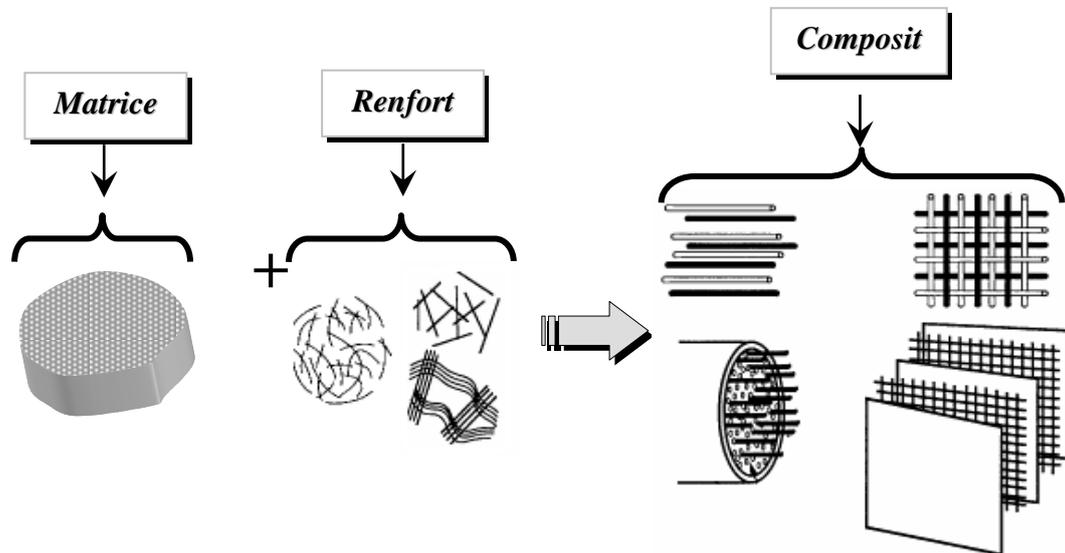


Figure 2.1 : Constituants d'un matériau composite

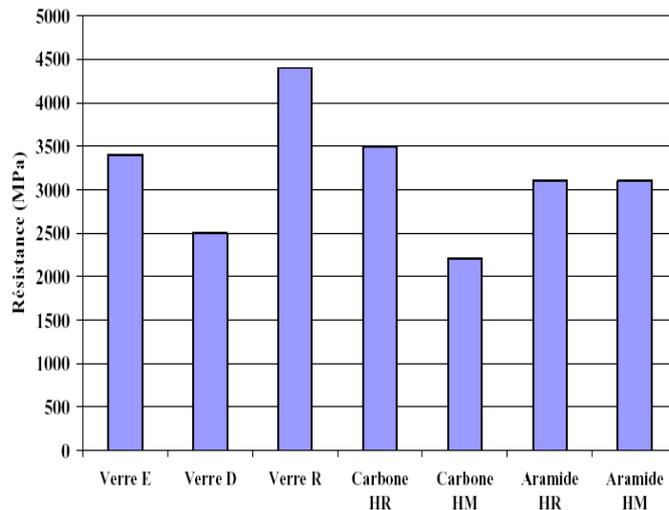
### 2.2.1- Les fibres

La fibre est constituée de plusieurs filaments élémentaires dont les diamètres varient entre 5  $\mu\text{m}$  et 25  $\mu\text{m}$ . Les lois de comportement des fibres sont de type "fragile". Il faut souligner le fait que les lois proposées correspondent à des essais sur mono filaments et que le comportement mécanique d'une mèche de 10 à 15000 filaments peut différer de façon significative dans la mesure où la probabilité de rupture des fils élémentaires joue un rôle important.

Le tableau 2.1 récapitule les principales propriétés des fibres et le graphe de la figure 2-2 compare la résistance en traction de différents types de fibres. [2]

**Tableau 2.1** : Propriétés des fibres [3]

Filament	Diam. ( $\mu$ )	Densité	Traction (MPa)	Module (MPa)	Allons. (%)	Fusion (°C)
Vère E	3-30	2.54	3400	73000	4.5	850
Vère D	3-30	2.14	2500	55000	4.5	-
Vère R	3-30	2.48	4400	86000	5.2	990
Carbone HR	8	1.78	3500	200000	1	2500
Carbone HM	8	1.8	2200	400000	0.5	2500
Aramide HR	12	1.45	3100	70000	4	480
Aramide HM	12	1.45	3100	130000	2	480

**Figure 2.2** : Histogramme des propriétés en traction des fibres

Selon l'orientation des fibres, on définit deux types de matériaux composites :

- Les matériaux composites unidirectionnels

Les fibres sont orientées dans une même direction, la direction principale de contrainte (fils parallèles sans torsion dit "roving" et nappe de fils). Les matériaux sont alors anisotropes, ils ont des propriétés différentes suivant les directions de l'espace.

- Les matériaux composites multidirectionnels

Ils sont préparés à partir des types de fibres suivants:

\_ fils coupés et feutre de fils coupés dit "mat" pour une résistance multidirectionnelle aléatoire.

\_ Mat à fibres continues, tissu bi ou tri directionnel et tresse pour une résistance multidirectionnelle dans une direction privilégiée.



Figure 2.3 : Types des composites

Les renforts se présentent le plus souvent sous la forme de fibres :

- Fibres de verre (silice...).
- Fibres polymères (Kevlar : coût élevé).
- Fibres de carbones.
- Fibres métalliques (bore...).
- Fibres céramiques.

Les deux derniers types de fibres sont très peu utilisés car très onéreux.

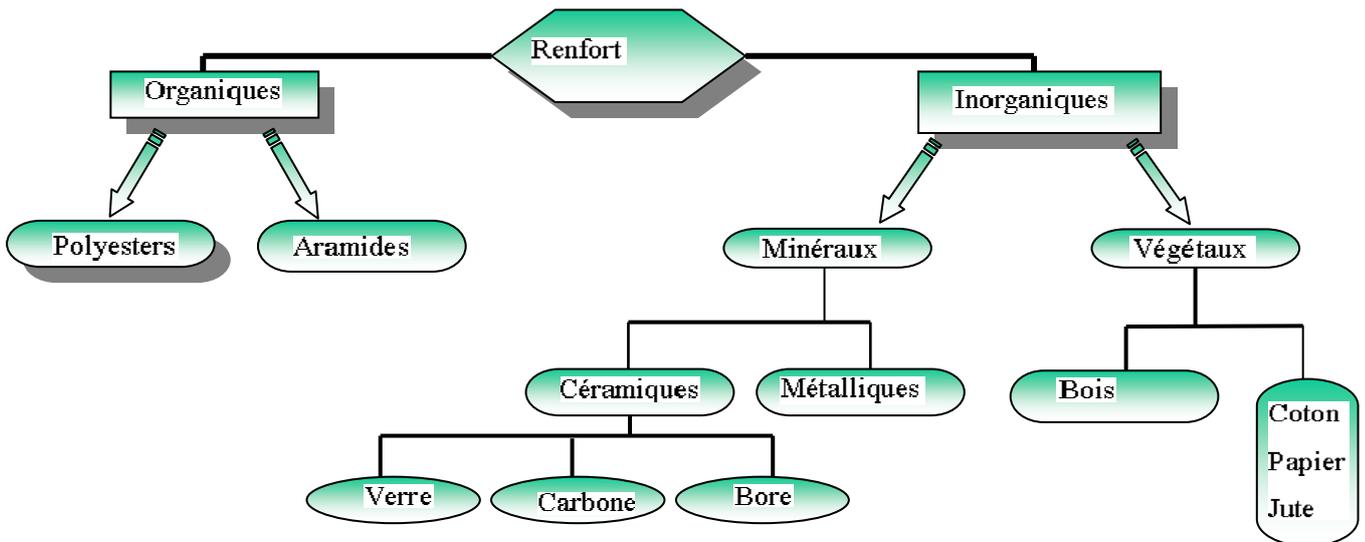
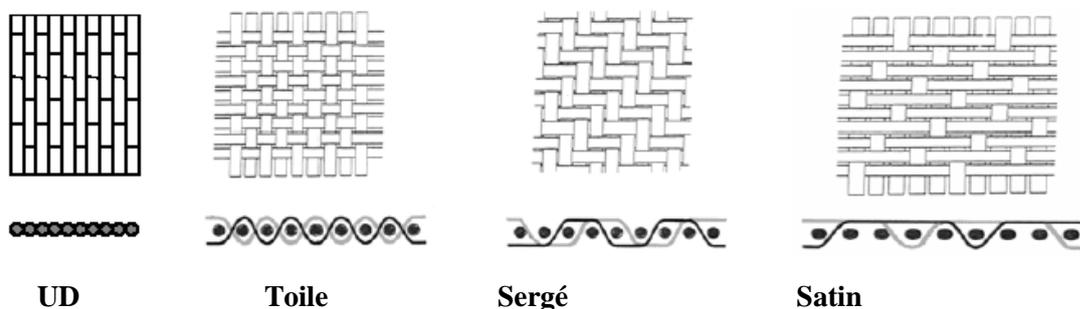
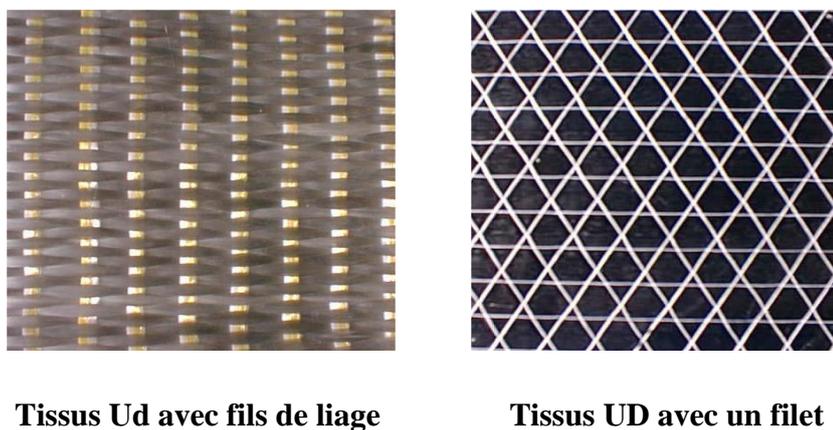


Figure 2.4 : Les principaux matériaux de renforts [4]

Les fils sont assemblés entre eux pour créer des mèches et une armure textile. Cette armure permet d'obtenir un matériau bidirectionnel ayant des fils dans deux directions perpendiculaires (direction principale : sens chaîne ; direction secondaire : sens trame) (figure 2-5). Généralement, les armures textiles utilisées en renforcement sont des armures unidirectionnelles ; les fils en sens trame (fil de liage) sont uniquement destinés à faciliter le conditionnement et la mise en oeuvre en maintenant les fils longitudinaux en position. Ils créent toutefois des défauts géométriques en imposant une ondulation des fils dans le sens trame. Ce phénomène peut être résolu par placage d'un filet sur les nappes UD pré imprégné (figure 2-6).



*Figure 2.5 : Armures classiques de tissus techniques [5]*



*Figure 2.6 : Photo de divers tissus Unidirectionnels [6]*

### a) Les fibres de carbone

Il existe deux types de fibres, celles à haute résistance (3 000 MPa) issues d'une mise en oeuvre par carbonisation, celles à haut module (400000 MPa) issues d'une fabrication par graphitisation. Les fibres de carbone sont fabriquées à partir du poly acrylonitrile. Les

principales étapes de cette fabrication sont un étirage (orientation), une oxydation, une carbonisation et, pour obtenir une fibre à haut module, une graphitisation. La fabrication des fibres de carbone fait appel à une technologie très délicate. En effet, les caractéristiques de la fibre obtenue en fin de processus dépendent, non seulement de la qualité de la fibre polyacrylonitrile de départ (ou précurseur), mais également du déroulement précis et rigoureux de chaque étape du procédé de fabrication suivant :

- \* Fabrication de précurseur (PAN),
- \* Étirage (orientation),
- \* Oxydation (220°C) dans l'air sous tension,
- \* Carbonisation 1500°C sous atmosphère inerte fibres de carbone haute résistance (HR),
- \* Graphitisation 3000 °C sous atmosphère inerte fibres de carbone haut module (HM).

Les fibres de carbone ont une très bonne tenue thermique et un très faible coefficient de dilatation ( $-0.7 \cdot 10^{-6} \text{ m/C}^\circ$ ). Les fibres sont inertes à température ambiante et vis-à-vis de la plupart des agents chimiques. [5]

#### b) Les fibres de verre

La composition du mélange initial comprend un vitrifiant, un fondant et un stabilisant qui apporte la performance recherchée (tableau 2.2). C'est, par exemple, l'alumine qui apporte les hautes résistances mécaniques. Les fibres de verre sont fabriquées par étirage à grande vitesse de verre fondu à environ 1300°C. [6]

**Tableau 2. 2 :** Composition chimique des fibres de verre

Constituent en % en poids	Verres	Verres resistant	Verres à hautes résistances	
	polyvalents	aux acides	mécaniques	
	Type E	Type C	Type R	Type S
<b>Silice SiO<sub>2</sub></b>	53 à 54	60 - 65	60	62 -65
<b>Alumine AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14 à 15	.5 2 - 5	25	20 - 25
<b>Chaux CaO</b>	20 à 24	14	6	-
<b>Magnésie MgO</b>	20 à 24	1 - 3	9	10 - 15
<b>Oxyde bore B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	6.5 à 9	2 - 7		0 - 1.2
<b>Fluor F</b>	0 à 0.7			
<b>Oxyde de sodium Na<sub>2</sub>O</b>	<1	8 - 10		0 - 1.1
<b>Oxyde Zirconium</b>	<1			

<b>ZrO<sub>2</sub></b>		
<b>Oxyde de potassium</b>	<1	0.5
<b>K<sub>2</sub>O</b>		
<b>Oxyde de fer Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<1	
<b>Oxyde de titane</b>	<1	
<b>TiO<sub>2</sub></b>		

Selon les compositions chimiques des fibres de verre, on distingue les variétés E, R, S. Un pourcentage élevé de silice améliore les propriétés mécaniques des verres et élève leur température maximale d'utilisation. Des fibres de silice pure sont utilisées lorsque l'on recherche des hautes performances. La fabrication de ces fibres est plus délicate et leur prix plus élevé.

Le mélange des différents constituants choisis est porté à haute température dans un four. Les fibres de verre sont alors obtenues par filage à travers des filières. La figure 2-7 illustre la résistance de fibre de verre sous différentes configurations. L'utilisation de telles fibres est intéressante pour obtenir un gain de résistance, par contre lorsqu'on recherche une grande rigidité ou une grande résistance du matériau, de telles fibres sont surclassés par d'autres matériaux de renfort.

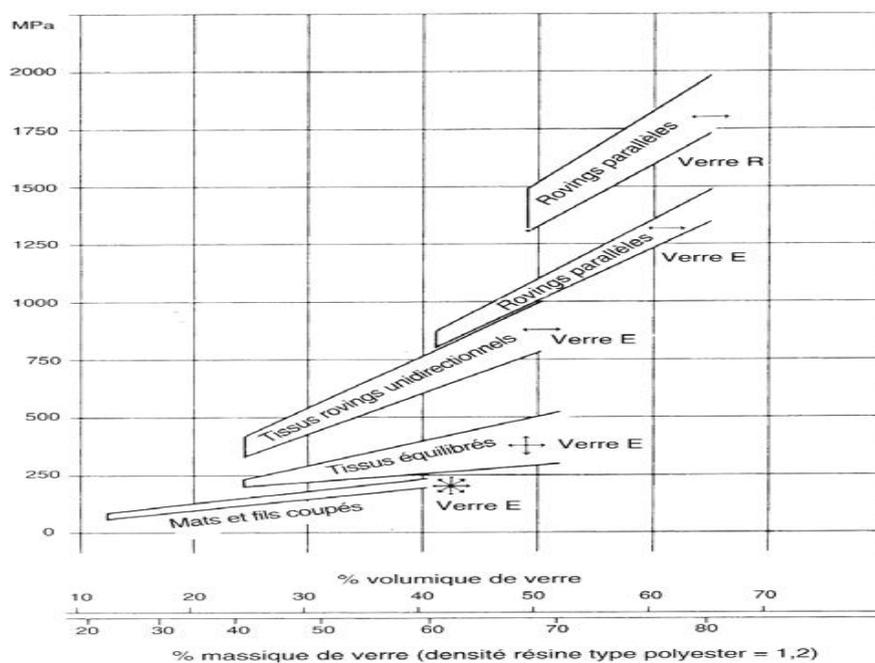


Figure 2.7 : Résistance mécanique des tissus de verre [Document vertrotex 2000]

### c) Les fibres d'aramide

Il s'agit de fibres de polyamides aromatiques destinés à servir de fibre de renfort. Les fibres aramides sont des fibres polyaramides ou polyamides aromatiques de synthèse dont la structure est constitué de noyaux benzéniques reliés par des groupe CO et HN. L'élaboration des fibres est effectuée par synthèse à basse température (-10°C) puis par filage en solution.

Les fibres sont ensuite étirées et traitées thermiquement pour augmenter leur module d'élasticité.

Le module d'Young de ces fibres est égal ou supérieur à celui du verre. [6]

Il est possible de distinguer deux grandes familles de fibres aramides : les fibres dont l'allongement à la rupture est de 3.3 à 4 % et les fibres dont l'allongement à la rupture est de 1.8 à 2 %. Les fibres d'aramide présentent des caractéristiques intéressantes. Elles présentent une bonne stabilité thermique et dimensionnelle.

Les caractéristiques mécaniques des fibres aramides sont reportées dans le **tableau 2.3** pour des mono filaments. Les caractéristiques sont plus faibles sur fils multi filaments.

**Tableau 2.3** : Caractéristiques mécaniques des fibres d'aramide

	KEVLAR 29	KEVLAR 49	KEVLER 149	Twaron	Technora
<b>Module d'Young (GPa)</b>	60	120	160	60	90
<b>Contrainte à la rupture (MPa)</b>	3000	3000	2400	2600	2800
<b>Allongement (%)</b>	3.6	1.9	1.5	3	4

La contrainte à la rupture spécifique est élevée (du même ordre de grandeur que le carbone HR), toutefois avec un prix de revient 4 à 6 fois moindre. Néanmoins, leur utilisation est limitée par diverses faiblesses des matériaux composites à fibres aramides:

- Résistances faibles à la compression, à la flexion, au flambement ;
- Sensibilité au cisaillement inter laminaire.

Ces faiblesses sont généralement attribuées à une mauvaise adhérence fibre matrice. Pour y remédier, un ensimage est appliqué au niveau des fibres.

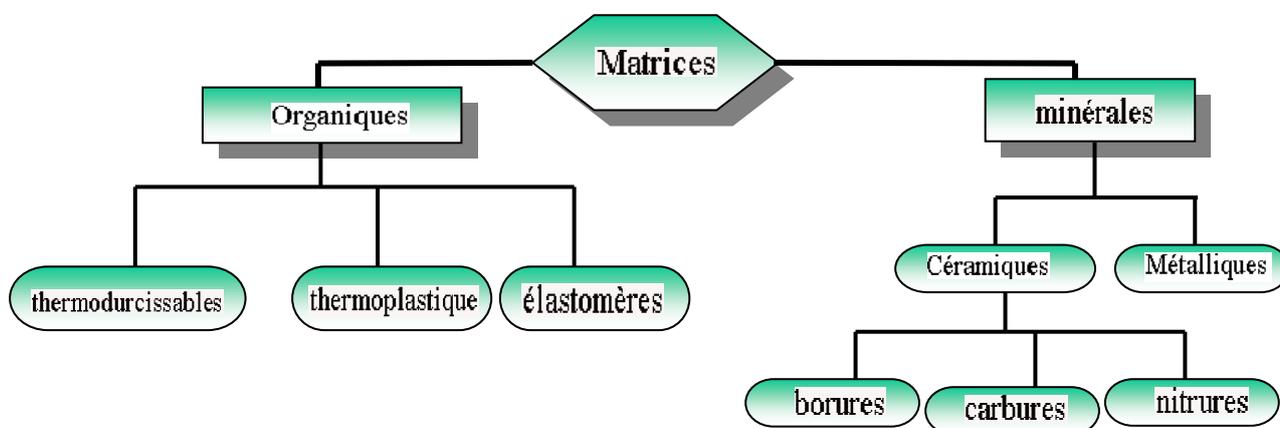
De plus, la relaxation et le fluage sont très faibles. Les propriétés mécaniques sont conservées pour une plage de température comprise entre  $-50^{\circ}\text{C}$  à  $300^{\circ}\text{C}$ .

Du point de vue du vieillissement, les fibres d'aramide sont résistantes à la corrosion et à l'environnement.

### 2.2.2- La matrice

La matrice la plus utilisée pour la fabrication des matériaux composites consiste en un matériau résineux constitué de polymères, modifié par différents adjuvants et additifs. Ces polymères ont habituellement de faibles propriétés mécaniques et leur comportement est dépendant de la durée, du taux et des cycles d'application de la charge, ainsi que de la température. On distingue deux grandes familles de résines polymères : les résines thermodurcissables (Polyester, époxy, vinylester, ...) et les résines thermoplastiques (polychlorure de vinyle, polyamide, polyéthylène, ...). En construction de génie civil, les résines thermodurcissables sont de loin les plus utilisées. [7]

Le choix de la matrice dépend de l'utilisation à laquelle est destinée le matériau composite. Dans la figure 07, on donne les principales familles de matrices et leurs éléments qui les constituent.



*Figure 2.8 : Les différentes familles de matrices.*

#### a) Les matrices époxy

Les polymères époxy sont des résines thermodurcissables et qui réticulent de façon irréversible. Ils possèdent de bonnes propriétés mécaniques. Les polymères époxydes sont transformés à l'aide de durcisseurs et d'accélérateurs afin d'obtenir une structure

macromoléculaire tridimensionnelle. Parmi les durcisseurs, les amines aliphatiques permettent le durcissement à température ambiante. La polycondensation du système pré polymère époxyde/agent réticulant (durcisseur) conduit à la formation d'un réseau amorphe tridimensionnel. La réaction implique l'ouverture des cycles oxirannes. La réaction de réticulation peut se faire à froid avec des amines aliphatiques ou à chaud avec des amines aromatiques.

En général, les polymères durcis à chaud possèdent de meilleures caractéristiques mécaniques que ceux durcis à froid. [8]

Selon le type de traitement thermique, d'adjuvants et de charges, certaines propriétés sont propres à certains composés. L'un des principaux avantages des polymères époxydes provient de la réaction de polyaddition. Par définition, cette réaction se fait sans perte de matière et présente ainsi un faible retrait avec la possibilité d'obtenir, par coulée, des masses très importantes. La faible absorption d'eau et l'absence de post-retrait assurent au polymère une bonne résistance aux divers agents chimiques. Ces deux propriétés permettent d'obtenir une protection importante contre la corrosion.

Les polymères époxy ont de bonnes propriétés en traction, en flexion, en compression. Seule, la résistance aux chocs est un point faible (voir tableau 2.4). La dureté sera plus ou moins élevée en fonction de la compacité du réseau tridimensionnel et de la présence d'adjuvants.

**Tableau 2.4 :** Caractéristiques mécaniques des résines époxydes

<b>Résistance à la traction (MPa)</b>	50 à 80
<b>Module de traction (GPa)</b>	3 à 10
<b>Allongement à la rupture %</b>	1 à 1.5
<b>Résistance à la compression</b>	140 à 150
<b>Résistance au choc (MPa)</b>	7 à 10 kJ/m <sup>2</sup>

Les principales caractéristiques des époxys sont :

- Une adhérence remarquable sur tous les types de support,
- Une bonne résistance à la chaleur,
- Une excellente résistance chimique aux huiles, aux hydrocarbures, à l'eau.

De plus, les polymères époxy montrent une mauvaise résistance chimique à l'acide nitrique et

à l'acide sulfurique, aux cétones et une faible reprise d'humidité mais une excellente tenue à la fatigue. Les inconvénients sont un temps de polymérisation assez long sans cuisson et des mesures d'hygiène et de sécurité sévères pour éliminer les vapeurs et le contact avec la peau.

Le produit peut être stocké sans altération pendant trois mois à 20°C et jusqu'à un ou deux ans à une température de -18°C. [8]

### 2.2.3- Les charges et additifs

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières. Les quantités de produits peuvent varier de quelques dizaines de pourcentage dans le cas de charges à quelques pourcentages et moins dans le cas d'additifs. Les propriétés particulières qui peuvent généralement être améliorées portent sur les résistances mécaniques (compression) et les propriétés de mise en oeuvre (tixotropie). Nous pouvons ainsi citer en exemple les charges renforçantes qui se présentent sous formes sphériques (microbilles de verres) ou non sphériques (écailles de mica), les charges non renforçantes qui ont pour rôle de diminuer le coût de la résine et peuvent contribuer à l'augmentation de certaines propriétés (masse volumique, dureté, module d'élasticité).

Les additifs interviennent comme lubrifiants, colorants ou agents anti-ultraviolets. Il est important de noter que l'ensemble de ces ajouts modifie les propriétés physiques et mécaniques des résines. [xsys technologie 2006]

## 2.3- PROCÉDES DE FABRICATION DES PRODUITS EN MATERIAUX COMPOSITES

On distingue trois grands stades communs à la formation des composites :

- 1- La Formation des matériaux constitutants soient la résine et les fibres;
- 2- L'évolution intermédiaire de ces matériaux en la forme voulue;
- 3- La transformation finale par un traitement ou une cure des matériaux constitutants en la géométrie désirée. [EHSAM 1993]

Chez les composites. L'élaboration du matériau se fait en même temps que la pièce. Il est donc difficile de séparer les propriétés de la pièce et du matériau. On distingue deux procédés de mise en oeuvre; soit direct ou à partir de demi-produits. La classification de ces derniers peut se faire comme suit. [LABONT 1993]

### - Mise en oeuvre direct:

- \_ Moulage sans pression (moulage sous vide)

- \_ Moulage par compression
- \_ Moulage en continu
- \_ Moulage par pultrusion
- \_ Moulage par centrifugation
- \_ Moulage par enroulement filamentaire
- \_ Moulage poinçon-matrice

**- Mise en oeuvre à partir de semi-produits**

- \_ Préimprignés
- \_ Composés de moulage

Les principales méthodes de fabrication des produits en matériaux composites en génie civil sont la pultrusion, l'enroulement filamentaire, le moulage sous vide et le moulage poinçon matrice. [9]

## **2.4- RESISTANCE ET RIGIDITE DES MATERIAUX COMPOSITES**

La résistance et le module d'élasticité en tension dans le sens longitudinal d'un matériau composite sont les caractéristiques les plus importantes pour lesquelles la fibre du composite est choisie-La rigidité des matériaux composites dépend principalement des éléments suivants :

- la résistance de la fibre,
- le module d'élasticité de la fibre,
- l'épaisseur du composite,
- le ratio fibre/matrice.

La rigidité du composite est une caractéristique importante pour l'efficacité du confinement de colonnes de béton.

Lors du chargement d'une colonne de béton confiné ou non confiné, la déformation axiale est plus importante que la déformation radiale. L'enveloppe en composite d'une colonne de béton est sollicitée radialement et en tension. La rigidité de l'enveloppe et sa déformation relative est donc des paramètres à considérer lors du confinement. [1]

## **2.5- CARACTERISTIQUES DES FIBRES RENFORCE LES POLYMERES (FRP)**

Un FRP consiste en deux ou plusieurs matériaux distincts combinés à l'échelle macroscopique afin de produire un produit possédant des caractéristiques qui dépassent celles de leurs composantes seules. Un FRP est une combinaison de fibres à haute résistance (les fibres de verre, de carbone et d'aramide sont les plus utilisées) dans une matrice (polyester,

polyester, époxy ou autre). Le matériau ainsi obtenu est hétérogène et anisotrope. Les fibres donnent la résistance mécanique alors que la matrice unit les fibres, les protège et transfère les charges aux fibres par cisaillement.

Les plaques de FRP sont des *laminés* (ou stratifiés) constitués d'un certain nombre de couches appelées plis. Un pli est une couche de fibres ou de fibres tissées, imprégnées dans une matrice. Lorsque les plis sont empilés les uns sur les autres dans une combinaison d'orientation définie à partir des propriétés mécaniques désirées, le produit s'appelle alors laminé.

Les fibres peuvent être disposées de différentes façons dans un pli. On distingue le pli à fibres unidirectionnelles (aussi appelé nappe unidirectionnelle), le pli à fibres tissées (appelé tissu) et le pli mat (fibres disposées dans un plan sans aucune orientation préférentielle).

La plus importante caractéristique des FRP est leur rapport résistance/masse élevé. On peut facilement produire un FRP dont la résistance à la traction est supérieure à celle de l'acier, et cela pour une masse correspondant à moins de 10 % de celle de l'acier. Les FRP ont une grande rigidité (certaines fibres de carbone à haut module ont un module d'élasticité d'environ deux fois celui de l'acier), généralement une bonne résistance à la fatigue (excepté pour les fibres de verre), une excellente résistance à la corrosion et un poids très léger. Ils sont aussi reconnus pour leur neutralité électromagnétique.

Malgré que le poids des FRP soit quatre à cinq fois inférieur à celui de l'acier, leur coût demeure relativement élevé. Par contre, l'utilisation croissante de ces nouveaux matériaux et le développement de la technologie fait que les prix ont tendance à diminuer graduellement.

[7]

## 2.6- CONCLUSION

Le présent chapitre qui porte sur « les généralités des matériaux composites » nous a permis de conclure :

Les matériaux composites sont des matériaux très variés, disponibles partout, dans la nature le bois qu'est constitué de la cellulose et de la lignine ou matériau de construction ancien, le torchis. Cette diversité mérite d'effectuer des investigations dans le choix des constituants (la matrice, le renfort, les charges et les additifs) afin d'avoir les meilleures qualités qui dépendent de :

- propriétés des matériaux constituants
- distributions géométriques des constituants
- l'interaction entre les différents constituants, etc.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE 2**

- [1] - Michel le Blanc, Confinement de colonnes de béton circulaire a l'aide de fibre de carbone, septembre 2000.
- [2]- EHSANI, MR (1993) Glass\_fiber reinforcing barr, inaltinative materiels for the reinforcement and perstressing of concret, edited by J.L CLARKE , glasgow, UK, Blackiie academic and professional, pp.35-54.
- [3]- PHILPPE DUQUETIE, Renforcement en flexion des poutres en béton armé à l'aide de plaque en matériaux composites réalisées in situ, février 1998.
- [4]- BERTHOLOT
- [5]- CHRETIEN G, Matériaux composites a matrices organique, édition Lavosier, 1996.
- [6]- Berthelot .J. M. Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structure .Edition technique et documentation 1999.
- [7]- TANIA CROSTON, Etude expérimental du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 point réparée par matériaux composites (Approche probabiliste), Juin 2006.
- [8]- ELHOUSSAIN Rochdi, contribution a l'analyse du comportement mécanique de dalle en béton armé renforcé par matériaux composites, Décembre 2004.
- [9]- ERIC BEAUMIER, Evaluation sous charge statique de glissières de pont de type PL2 et PL3 en béton renforcé avec de l'armature en matériaux composite, mars 2000.
- [10]- PILAKOUTASK, HE JH. AND WALDRONP. CRFP "plate strenthening of Rc beams, international conferance on structural faults et repair" edinburgh, 1997, pp.119\_127.

# CHAPITRE 3

## Généralité sur le béton

---

## GENERALITE SUR LE BETON

---

### 3.1. Introduction

Le Béton a été depuis longtemps le matériau le plus utilisé, au cours des dernières années, dans la construction de divers ouvrages.

La caractéristique essentielle du béton est sa résistance à la compression. Sa résistance à la traction intervient seulement dans certains calculs relatifs à l'état limite de service. Les déformations, le fluage, le retrait et la dilatation thermique doivent être prise en considération lors du calcul des structures en béton armé [01].

### 3.2. Définition du béton

Le béton est un matériau composite, formé du ciment, des agrégats (gravillons et sable), de l'eau et éventuellement des ajouts. En raison de son hétérogénéité, le béton s'avère un matériau particulièrement complexe et évolutif : il subit de profondes transformations physico-chimiques pas seulement lorsqu'il est soumis à une élévation de température, mais même à partir des instants qui suivent sa préparation (notamment la réaction d'hydratation et le phénomène de prise). Il est donc indispensable de bien comprendre tous les paramètres qui jouent un rôle dans le béton, pour pouvoir comprendre son comportement. [02].

### 3.3. Constituants du béton

#### 3.3.1. Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui, mélangé avec l'eau, donne des bétons d'une résistance mécanique et chimiquement stables même dans l'eau. Le ciment Portland, le plus répandu parmi les liants hydrauliques, est un mélange de gypse et clinker. Le clinker est un produit obtenu en cuisant vers 1450° des mélanges appropriés de calcaire et d'argile. Le clinker du ciment Portland est donc un mélange de plusieurs constituants minéralogiques impurs.

L'hydratation du ciment est l'ensemble de réactions chimiques qui se produisent entre le ciment et l'eau. Ces réactions vont commencer dès la mise en contact de ces deux phases :

lorsque l'on ajoute de l'eau à la poudre de ciment, les produits anhydres vont progressivement se transformer en hydrates. Le produit principal de la réaction d'hydratation est le silicate de calcium hydraté, noté C-S-H.

La compatibilité entre le super-plastifiant et le ciment est un facteur très important pour le choix du ciment. La finesse du ciment et sa composition chimique peuvent affecter le comportement du super-plastifiant. Il est nécessaire de faire des essais sur coulis ou sur mortier pour le choix du super-plastifiant. Les ciments à temps de prise très long sont à éviter, des dosages élevés en super-plastifiant ne permettent pas le démoulage même après 24 heures **[03]**.

L'obtention de bonnes résistances mécaniques dépend de la finesse de mouture du clinker. On augmente ainsi la proportion d'hydrates dans le ciment durci.

La finesse du ciment confère au béton une résistance précoce. La surface spécifique Blaine doit être de l'ordre de 3 500 à 4 000 cm<sup>2</sup>/g.

Cependant, l'augmentation de cette surface conduit à l'obtention d'un ciment à très forte teneur en fines donc à forte chaleur d'hydratation et par suite il y a risque de prise instantanée. Ce phénomène induit des contraintes d'origine thermique et donc des fissurations de peau dans des pièces massives. En règle générale, il est recommandé de limiter la taille inférieure des grains de ciment à 1 µm **[04]**.

Certaines études avaient préconisé l'utilisation des laitiers ultrafins **[05]** et des ciments au laitier **[06]** pour diminuer la chaleur d'hydratation, maintenir la maniabilité et améliorer la durabilité.

Le dosage en eau conduit à des rapports eau/(ciment + ultrafine) compris entre 0,2 et 0,3. Si on veut atteindre des résistances élevées, il est important de réduire au plus bas rapport tout en gardant une maniabilité convenable.

Un rapport E/C de 0,35 représente à peu près la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation du ciment. Le ciment en plus de sa fonction liante joue aussi le rôle d'un granulat inerte de petite dimension **[04]**.

### 3.3.2. les granulats

Les granulats occupent environ 70 % du volume du matériau et, à ce titre interviennent directement sur les propriétés du béton à l'état frais comme à l'état durci. Ils semblent même plus sollicités dans les bétons [04]. D'une manière générale, les qualités demandées aux granulats pour l'obtention des bétons concernent essentiellement la forme et l'état de surface, la porosité, la granularité, les propriétés mécaniques et la nature minéralogique.

#### 3.3.2.1. Forme et état de surface

La forme intervient directement sur la compacité propre du béton. La rugosité de la surface favorise l'imbrication de la pâte de ciment. Les granulats concassés à coefficient de forme élevé sont préférés aux granulats roulés lisses (adhérence plus élevée).

Les granulats lisses favorisent la détérioration rapide de la liaison granulat – pâte très haute performance.

Le coefficient de forme est le rapport du volume effectif du granulat sur le volume de la sphère circonscrite. Plus il sera élevé, meilleure sera la compacité. En outre, les formes très anguleuses sont très néfastes quant à l'obtention des bonnes résistances, elles poinçonnent la matrice lors d'une sollicitation. En effet, lorsque le béton est soumis à une sollicitation de compression, on peut assimiler les granulats à des plateaux de compression d'une presse et, la matrice se trouve donc poinçonnée [07].

#### 3.3.2.2. Porosité

Les granulats poreux (avec une porosité communicante) modifient la consistance du matériau par absorption d'eau dans le malaxeur. Il est recommandé d'utiliser des granulats de coefficient d'absorption inférieur à 1 % [08].

#### 3.3.2.3. Nature minéralogique

Elle est caractérisée par la résistance mécanique des grains, la texture (la rugosité de surface) et la possibilité des réactions à l'interface granulat – pâte de ciment.

Les granulats présentant des risques de réactions alcali – granulat sont à proscrire car ces réactions détruisent l'étanchéité des enceintes et la stabilité à long terme des ouvrages [09].

La présence des poussières ou d'argile sur les granulats réduit l'adhérence et exige une augmentation de la teneur en eau entraînant une chute des résistances.

### 3.3.2.4. Granularité

C'est elle qui régit la compacité du mélange et sa maniabilité. Les dosages en ciment dans les BHP étant élevés, il n'y a pas intérêt à utiliser des sables fins, Alaejos Gutierrez et al. [04] recommandent le sable de rivière qui réduirait la demande en eau.

Dutruef [10] recommande de limiter la dimension maximale du gros granulat à 12 mm pour avoir des résistances élevées. Metha et al. [11] sans s'y opposer, recommandent les granulats de dimension maximale comprise entre 20 et 25 mm ; Addis et al. [12] avaient trouvé que la résistance du béton augmentait avec la dimension du gros granulat entre 13,5 et 26,5 mm ; Alaejos Gutierrez et al. [08] ont affirmé qu'on obtient les meilleurs résultats avec des granulats de dimension maximale comprise entre 13 et 14 mm et un coefficient Los Angeles inférieur à 15.

De Larrard a recommandé un rapport gravier/sable (G/S) compris entre 1,5 et 2 [04].

### 3.3.3. Les super-plastifiants

#### 3.3.3.1. Intérêt de leur utilisation

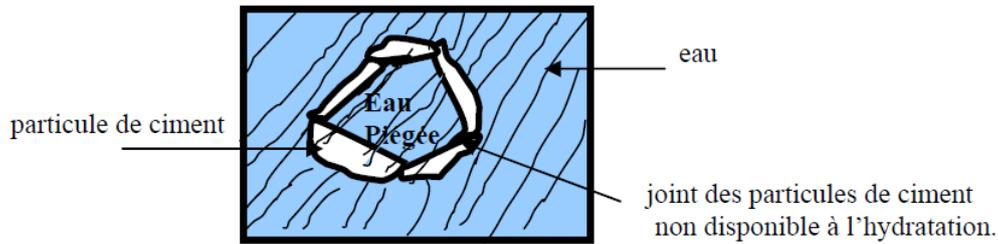
La maniabilité des bétons classiques dépend essentiellement du dosage en eau. Malheureusement, l'augmentation de la teneur en eau conduit à la modification des propriétés du béton : à long terme, chute des résistances mécaniques, porosité accrue et donc durabilité réduite ; à court terme, ségrégation accrue et perte d'homogénéité du matériau.

Les BHP sont définis par trois critères : résistance, durabilité et ouvrabilité. Tanaka et al. [13] ont pensé que les aspects les plus importants à développer sont la fluidité et la capacité de mise en oeuvre. Ces suggestions nécessitent l'utilisation des superplastifiants qui peuvent procurer au béton d'excellentes fluidité et résistance à la ségrégation grâce à leur propriété dispersante. Ils permettent de défloculer les grains de ciment ayant tendance à se regrouper en grappes une fois introduits dans l'eau. Leur rôle est donc essentiellement de modifier l'équilibre des forces existant entre les particules de ciment [14].

Les trois propriétés des BHP citées ci-dessus sont encore améliorées lorsque les superplastifiants sont associés à d'autres produits tels que la fumée de silice, le métakaolin, les cendres volantes, le laitier [15].

#### 3.3.3.2. Mécanisme de dispersion

La floculation est un phénomène lié à la présence des charges électriques à la surface des grains et qui piège un certain volume d'eau, en l'empêchant de compléter l'hydratation du ciment (représentation schématique sur la figure 3-1).



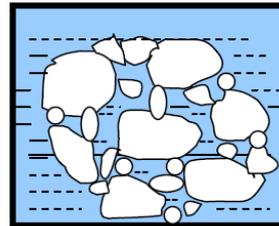
**Figure 3.1: Floculat de ciment en l'absence de super-plastifiant.**

La figure 3-2 montre l'influence d'un superplastifiant sur les amas de ciment. Suite à la défloculation, une dispersion des bulles d'air et en parallèle une lubrification par adsorption sur les parois des grains sont observées.

Les super-plastifiants de deuxième génération sont les plus efficaces. Ils améliorent la dispersabilité, permettent une stabilité de dispersion à long terme, une excellente ouvrabilité et une résistance à la ségrégation [13]. Leur action dispersive est essentiellement due à la répulsion électrique [14].

a) Sans superplastifiant :

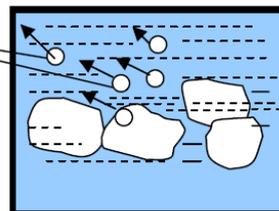
Colonies de grains de ciment non défloculés, cohésion capillaire par rétention de bulles d'air.



Bulles d'air éliminées

b) avec superplastifiant :

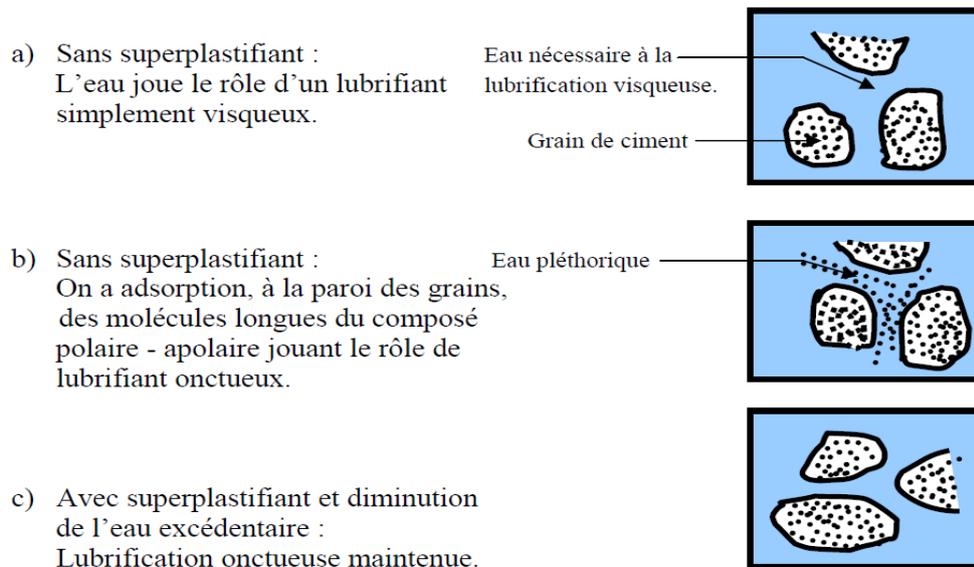
Les molécules, sont adsorbées par les grains de ciment basique, l'air s'élimine, d'où la défloculation capillaire, facilitée par abaissement de la tension aux interfaces.



**Figure 3.2: Mécanisme de floculation avec et sans super-plastifiants.**

### 3.3.3.3. Mécanisme de réduction d'eau

La figure 3-3 montre le mécanisme de réduction d'eau avec et sans superplastifiant.



**Figure 3.3: Mécanisme de réduction d'eau avec et sans super-plastifiant.**

### 3.3.4. Eau de gâchage :

L'eau constitue un liant pour le ciment : elle est donc une composante essentielle pour la formation de chaque matériau cimentaire. Elle intervient dans toutes les phases de vie, en influençant toutes les propriétés du béton, soit à froid, soit, à chaud. L'eau a essentiellement deux fonctions : une fonction physique, qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide (permettant donc son écoulement et le moulage), et une fonction chimique en tant que liant de la poudre de ciment. Elle sert aussi à mouiller les agrégats, et donc à assurer un bon lien avec la pâte de ciment. L'eau peut aussi présenter des caractéristiques négatives : celle qui reste en excès dans les pores est responsable de certains phénomènes comme par exemple le retrait de dessiccation ou encore l'éclatement du béton en cas de gel, [02].

#### ❖ Caractéristiques et tolérances

##### a) physiques

Les eaux employées pour le gâchage du béton ne doivent pas contenir de matières en suspension au-delà des proportions suivantes :

- 2 grammes par litre pour béton type A et B.
- 5 grammes par litre pour béton type C.

##### b) chimiques :

Les eaux employées pour le gâchage des bétons ne doivent pas contenir de sels dissous au-delà des proportions suivantes :

- 15 grammes par litre pour béton type A et B.

- 30 grammes par litre pour béton type C,
- \* **Béton A** : Béton de haute qualité a résistance élevée.
- \* **Béton B** : Béton a faible perméabilité.
- \* **Béton C** : Béton a faible résistance peu au non armé.

### 3.4. Propriétés et caractéristiques de béton

A fin de juger de la qualité de n'importe quel béton il est indispensable d'étudier ces principales propriétés. Ces dernières ce résume dans les points suivants, [01] :

#### 3.4.1. Dimension des granulats :

Un béton est un mélange intime de granulats ( sable, graviers et éventuellement cailloux) liés entre eux par une pâte de (ciment + eau) , Il ne faut pas perdre de vue qu'un béton tire du granulat une bonne part de sa résistance et plus particulièrement du gros granulat ; D'où la nécessité d'employer des granulats de qualité, et de dimension maximale, celle-ci devant rester compatible avec une bonne facilité de mise en œuvre ; d'autre par, la pâte de ciment intervenant comme une sorte de « colle » entre les différent grains du granulats le dosage en ciment devra être plus élevé que les grains seront plus fins à cause de l'augmentation de surface spécifique des grains. Des études poussées sur la classe des granulats ont montrés que si l'on augmente la classe de grosseurs des grains de la valeur G (diamètre max), le fluage des bétons est réduit dans la proportion  $\sqrt[3]{g/G}$ , avec g (diamètre moyen des granulats) [4]. Par exemple si  $G = 2g$  le fluage est diminué de 11%, mais par ailleurs la dimension maximale D du granulats se trouve limitée par différente considération concernant l'ouvrage à bétonner : épaisseur de la pièce, espacement des armatures, densité de ferrailage complexité du coffrage, possibilité et efficacité du serrage à la mise en œuvre, risque de ségrégation, etc...

#### 3.4.2. L'ouvrabilité :

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton ; elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour remplissage parfait du coffrage et du ferrailage.

L'ouvrabilité du béton dépend de toute une série de facteurs : Genre de ciment teneur à l'eau et en mortier de ciment, grosseur des agrégats, contenu de sable.

Les bétons de même composition, mais avec des ciments différents ont une fluidité (ouvrabilité) différente, ceci s'explique par le fait que le besoin en eau des ciments varie de l'un à l'autre. La fluidité du mélange de béton croit avec l'augmentation de la qualité d'eau, au fur et à mesure de l'augmentation de la teneur en pâte de ciment la fluidité du mélange de béton croit elle aussi, si la teneur en pâte de ciment est plus haute, la pâte non seulement

rempli les vides et enrobe les grain des agrégats, mais les écarte également les uns des autres, en créons entre eux des couches abondantes qui diminuent le frottement entre les grains ceci provoque l'augmentation de la fluidité, [01].

Si les agrégats sont plus gros, la somme de la surface et moindre, par conséquent, pour une même qualité de pâte de ciment, les couches intermédiaires entre les grains des agrégats se trouvent plus épaisse se qui rend le mélange de béton plus fluide.

L'augmentation de la quantité de sable au dessus de la quantité optimale déterminée par la pratique, diminue la fluidité de la pâte par suite de l'accroissement de la surface total des agrégats. La forme de grains influe aussi sur la fluidité : la surface des grains étant arrondie et lisse, la surface totale et le frottement entre eux son plus petits que si la forme et angulaire et la surface ré gueuse. Donc, le mélange de béton au gravier et au sable roulé est plus fluide que le mélange formé de pierre concassé et de sable d'arène.

Il existe de nombreux essais et testes diverse la mesure de certains caractéristique dont dépend l'ouvrabilité. Nous n'en citerons que quelques uns, les plus couramment utilisés dans la pratique.

#### a)- Affaissement au cône d'ABRAMS :

Cet essai (slump teste) est un des plus simple et des plus fréquemment utilisés.

Pour déterminer la fluidité en se sert d'un moule en forme de cône que le remplit de béton ; ce dernier est soumis au damage et le moule et enlevé. Le cône de béton ainsi formé s'affaisse sous l'action de son propre poids. La valeur d'affaissement de cône (en cm) sert à évaluer la fluidité du béton. Le tableau suivant représente la variation de la fluidité en fonction de l'affaissement au cône, [01]:

Classe de fluidité	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Très ferme (T.F)	0 à 4	± 1 cm
Ferme (F)	5 à 9	± 2 cm
Plastique (P)	10 à 15	± 3 cm
Très Plastique (T .P )	≥ 16	± 3 cm

**Tableau 3.1 : Variation de la fluidité en fonction de l'affaissement au cône**

#### b)- maniabilimètre :

Cet essai à l'avantage de tenir compte de la mise en vibration dans l'appréciation de sa maniabilité. L'appareil se compose d'une cuve métallique parallélépipédique dont les

dimensions intérieures sont 30cm de largeur, 30cm de profondeur et 60cm de longueur. Une paroi mobile de section triangulaire sépare la cuve et l'on remplit de béton.

On soulève ensuite la paroi mobile qui peut coulisser verticalement et un contact électrique se réalise en même temps provoquant la mise en marche d'un vibreur (50 Heurtz) fixe sur la paroi avant de l'appareil ; le béton s'écoule dans la cuve et l'on chronomètre le temps qu'il met pour atteindre un trait (repère) sur la paroi opposée.

Plus le béton est plastique, maniable et de bonne ouvrabilité plus le temps est court ; on constate en moyenne les valeurs suivantes, [01]:

- Pour les bétons mous et très fluides on a  $t \leq 10$  secondes.
- Pour les bétons très plastiques on a  $t \approx 15$  secondes
- Pour les bétons de bonne ouvrabilité on a  $20 \leq t \leq 30$  secondes
- Pour les bétons secs, peu maniable et d'ouvrabilité défectueuse ont à  $t \geq 40$  secondes.

### 3.4.3. La résistance

La résistance à été longtemps considérée comme la qualité essentielle pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton ; mais nous avons suffisamment insisté précédent sur la qualité d'ouvrabilité et sont importance primordiale pour pouvoir dire que la résistance est une qualité également importante ; ouvrabilité et résistance sont d'ailleurs à étudier de paire car sont étroitement dépendants l'une de l'autre et d'autant plus quelles varient en sens inverse en fonction de certains facteurs essentiels de la composition du béton, [01].

Nous allons examiner ci-après les différents facteurs ayant une influence sur la résistance et sur lesquels on pourra jouer ou compter pour l'amélioration de cette qualité, mais il convient tout d'abord de bien en définir les mesures usuelles ainsi que les valeurs et critère à retenir.

#### 3.4.3.1. Résistance a la compression

La résistance a la compression à 28 jours est désignée par  $f_{e28}$  elle se mesure par compression axiale de cylindres droits de révolution et d'une hauteur double leur diamètre. Le cylindre le plus couramment employé est le cylindre de ( $\Phi = 16$  cm,  $L = 32$  cm).

#### 3.4.3.2. Résistance a la traction

La résistance a la traction à 28 jours est désignée par  $f_{t28}$ , plusieurs essai peuvent être réalisés :

**a)-En traction directe :** La mesure se fait par mise en traction de cylindres identique aux précédents mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessaire, après sciage des

extrémités, le collage des têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite.

**c)-En traction par fendage (essai brésilien):** l'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse.

**c)-En traction par flexion :** c'est l'essai le plus couramment utilisé. La résistance est mesurée par flexion 3 ou 4 points sur des éprouvette prismatique de côté  $a$  et de longueur  $4a$

### 3.4.3.3. Facteurs influent sur la résistance :

La résistance de béton à la compression dépend de l'activité du ciment, du rapport E/C, de la qualité des agrégats, du degré de compacité du mélange de béton et des conditions de durcissement. Les facteurs principaux sont l'activité du ciment et le rapport E/C. Les ciments à activité plus élevée donnent des bétons plus résistants, cependant, l'activité des ciments étant la même, on peut obtenir des bétons de résistances différentes suivant la variation de la quantité d'eau dans la composition. Pour obtenir un mélange maniable le rapport de la quantité d'eau à la quantité de ciment doit être  $E/C = 0,4$  à  $0,7$  alors que pour assurer la réaction chimique de l'eau avec le ciment il ne faut que 20% d'eau du poids de ciment. L'excès d'eau qui n'entre pas en réaction chimique avec le ciment s'évapore du béton en y formant des pores dans la présence réduit la compacité et, par conséquent diminue la résistance du béton, par contre la résistance d'un béton peut être augmentée si l'on diminue le rapport eau/ciment, [01].

Les études approfondies ont étendus et mis au point l'influence des facteurs variés sur les propriétés des bétons et ont établis les relations :

$$\text{Si } E/C > 0,4 \text{ (} C/E \leq 2,5 \text{)} \quad R_b = A \cdot R_c \cdot (C/E - 0,5).$$

$$\text{Si } E/C < 0,4 \text{ (} C/E > 2,5 \text{)} \quad R_b = A_1 R_c (C/E + 0,5)$$

- $R_b$  Etat la résistance à la compression après 28j de durcissement normal.
- $R_c$  : l'activité de durcissement, c'est-à-dire la rupture par compression du mortier de ciment.
- $E/C$  : Le rapport du poids du ciment au poids de l'eau.
- $A, A_1$  : coefficient granulaire selon les propriétés et la qualité des matériaux utilisés

La vitesse du durcissement d'un béton est influencée par la composition minéralogique du ciment et par la qualité d'eau initiale dans le mélange de béton, ce dernier facteur détermine sa fluidité ou consistance. Les mélanges secs contenant peu d'eau assurent un durcissement plus rapide du béton que les compositions fluides.

**3.4.4. Retrait :**

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

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

**3.4.5. Fluage :**

C'est un phénomène de déformation différée sous charge fixe indéfiniment appliquée.

**3.4.6. Coefficient d'élasticité :**

La notion de coefficient d'élasticité d'après sa définition :

$$E = \text{contrainte unitaire} / \text{déformation relative}$$

Est assez vague à cause du fluage ; en effet la déformation totale (fluage compris) est trois fois plus grande que la déformation instantanée cela conduit à considérer deux modules élastiques :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Un module instantané : } E_{ij} \\ \text{Un module différé : } E_{vj} \end{array} \right\} E_{vj} = E_{ij} / 3$$

Le module élastique est d'autant plus élevé que le béton est plus résistant la valeur  $E_{ij}$  est suivante :

$$E_{ij} = 11000 \sqrt{f_{cj}}$$

**3.4.7. coefficient de poisson :**

En compression, comme en traction, la déformation longitudinale (dans le sens de l'effort) est accompagnée d'une déformation transversale ; le coefficient de poisson est le rapport entre la déformation transversale et la déformation longitudinale en valeurs relatives. Sa valeur varie de 0,15 à 0,30 ; il est d'autant plus élevé que le béton est plus jeune ou moins résistant. On le prend en général égal à 0,20, [01].

### **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE 3**

- [01] GHERNOUTI. Y et BELASSOUAR. R, « incorporation de tuf et de calcaire dans l'élaboration des béton a hauts résistances » mémoire d'ingénieur, Boumerdes 1998.
- [02] Stefano. d, « Lien entre la perméabilité et l'endommagement dans les béton a hautes températures » Thèse de doctorats, école nationale des ponts et chaussées, septembre 2004.
- [03] Alaejos Gutierrez P. et Fernandez Canovas M., « The modulus of elasticity of high performance concrete », Materials and structures. vol. 28, n° 184, p. 559-568, 1995.
- [04] De Larrard F., « Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances », Rapport de recherche LCPC, Paris. 1988, p. 335.
- [05] Domone P-L. and Soutsos M-N., « Proprieties of high strength concrete mixes containing PFA and ggbs », Magazine of concrete research. vol. 47, n° 173, p. 355-367, 1995.
- [06] Lang E. et Geiseler J., « Utilisation d'un laitier de hauts fourneaux à teneur importante en laitier » In : Fourth International Symposium on utilization of high-strength-high performance concrete, Paris. 1996, p.213-222.
- [07] De Larrard F., et Tondat P., « Sur la contribution de la topologie du squelette granulaire à la résistance en compression du béton », Materials and structures. vol. 26, p. 505-516, 1993.
- [08] Alaejos Gutierrez P. and Fernandez Canovas M., « High performance concrete : requirement for constitutive materials and mix proportioning », ACI Material journal. title n°93-M26, p. 233-241, May-June 1996. p.232.
- [09] Noumowe Nchambou A., « Effet des hautes températures (200-600) sur les bétons : cas des bétons à hautes performances », Thèse Doct. Ing : INSA-Lyon, juin 1995,
- [10] Dutruel F., « Les BHP et les BTHP, de quoi s'agit-il ? », Journée nationale d'échange d'informations sur les bétons à très hautes performances, organisée par le CERIB, 21 juin 1995,
- [11] Metha P-K. and Aïtcin P-C., « Microstructure basic of selection of materials and mix proportions for high strength concrete », In : Second International Symposium on high strength concrete, , Detroit : ACI 1990.
- [12] Addis B-J. and Alexandre M-G., « A method of proportioning trial mixes for high strength concrete », In : Second International Symposium on high strength concrete, Detroit : ACI 1990.
- [13] Tanaka Y., Ohta A. and Sugiyama T., « Polycarboxylate-based advanced superplasticizers for high performance concrete », In : International Symposium on the role of

admixture in high performance concrete, Edited by J-G. Cabrera and R. Rivera-Villareal, Rilem : Monterrey, Mexico, March 21-26 1999.

[14] Houst L., Flatt R. Bowen J-P. et al., « New superplasticizers : from research to application » In : Proceedings of International Conference on modern concrete materials : Binders, Additions and admixtures, Edited by Ravindra K., Dhir and Tomas D. Dyer, Dundee, Scotland, UK 1999.

[15] Malhorta V-M., « Innovative applications of superplasticizers in concrete-a review», In: International Symposium on the role of admixture in high performance concrete, Edited by J-G. Cabrera and R. Rivera-Villareal, Rilem : Monterrey, Mexico, March 21-26 1999.

# CHAPITRE 4

## La Formulation d'un Béton Autoplacant

---

## LA FORMULATION D'UN BETON AUTOPLAÇANT

---

### 4.1. Introduction :

L'idée du béton auto-plaçant était proposée en 1986 par le professeur Hajime Okamura, mais le prototype a été la première fois développé en 1988 au Japon, par le professeur Ozawa à l'université de Tokyo [01]. Sa première utilisation pratique intervient deux années plus tard pour la construction d'un pont.

Les bétons autoplaçant (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais, il est capable de se compacter sous son propre poids, sans vibration extérieure. Par ailleurs, le matériau doit être stable pour assurer l'homogénéité de la structure finale.

Les avantages d'un tel béton sont les suivants [02] :

- pour la mise en œuvre :
  - diminution du temps de coulée.
  - suppression de la vibration et donc diminution notable des nuisances sonores et de l'usure des moules métalliques et des coffrages.
  - meilleures conditions de travail, ce qui permet d'attirer une main d'œuvre qui n'appréciait pas toujours les conditions de travail « bruyantes ».
  - possibilité de couler des bétons dans des endroits inaccessibles.
  - possibilité de couler des voiles de grande hauteur en une seule opération.
- sur la qualité du béton :
  - parfait remplissage des éléments fortement ferrailés ;
  - obtention d'une bonne qualité de parement (surface de béton lisse et donc moins de pores en surface) ;
  - et d'une manière générale, obtention d'une meilleure qualité du béton, in situ, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation ; cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages.
- durabilité accrue des ouvrages :

- permet d'envisager de nouveaux types d'éléments en béton ;
- possibilité d'intégrer des réservations dans le coffrage.

Aujourd'hui, il existe deux familles des BAP selon les applications, La première emploie le terme BAP, ou (béton auto-plaçant), les bétons destinés aux applications verticales et éléments massifs (poutre, poteau, voile,...etc.), Le deuxième emploie le terme BAN, ou (béton auto-nivelant), les bétons destinés aux applications horizontales (planches, dalles).

Ils connaissent à l'heure actuelle un essor considérable en Europe et aux Etats-Unis et prendront dans les années à venir une place de plus en plus importante.

#### **4.2. Définition des bétons autoplaçant [02] :**

Le béton auto-plaçant «self compacting concrete SSC » on désigne des bétons très fluides, homogènes et stables, caractérisés par une mise en place sans vibration (la compaction des BAP s'effectuant par le seul effet gravitaire) et conférant à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en place par vibration.

Ces propriétés sont caractérisées par différents essais et les critères de résultats permettent de donner une définition quantitative pour les BAP :

- Les valeurs cibles d'étalement au cône d'Abrams sont généralement fixées dans l'intervalle de 60÷75cm selon l'AFGC et 50 à 60 cm selon la norme japonaise (et pas de ségrégation visible en fin d'essai : auréoles de laitance ou amoncellement de gros granulats au centre).
- Le taux de remplissage à la boîte en L doit être supérieur à 0.8. Pour les ouvrages de génie civil fortement ferrailés on adoptera le ferrailage mais pour des configurations plus simples on pourra utiliser un dispositif allégé du ferrailage dans la boîte en L.
- Le béton doit être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressuage limitée, l'absence de ségrégation visuelle lors de l'essai d'étalement au cône d'Abrams n'est pas suffisante. Il sera contrôlé en utilisant l'essai de stabilité au tamis.

### 4.3. Classification des BAP :

La notion de classification des BAP est apparue tardivement et constitue pourtant un paramètre essentiel du développement de ces bétons.

À l'origine, la formulation de BAP, imaginée par les Japonais (et, plus particulièrement, le professeur Okamura à la fin des années 1980), est conçue pour réaliser des ouvrages de génie civil, à forte densité d'armatures, pour lesquels des anomalies de mise en œuvre étaient redoutées. Aujourd'hui, et plus particulièrement en Europe, l'utilisation des BAP se développe dans le domaine de la préfabrication et dans celui du béton de bâtiment coulé en place, nécessitant des formulations de BAP différentes : pour le bâtiment elles doivent être moins performantes techniquement (en termes de caractéristiques mécaniques à 28 jours et de qualités d'ouvrabilité) et plus économiques.

Par contre, la problématique spécifique de la capacité à donner de beaux parements est à prendre en compte pour les applications verticales.

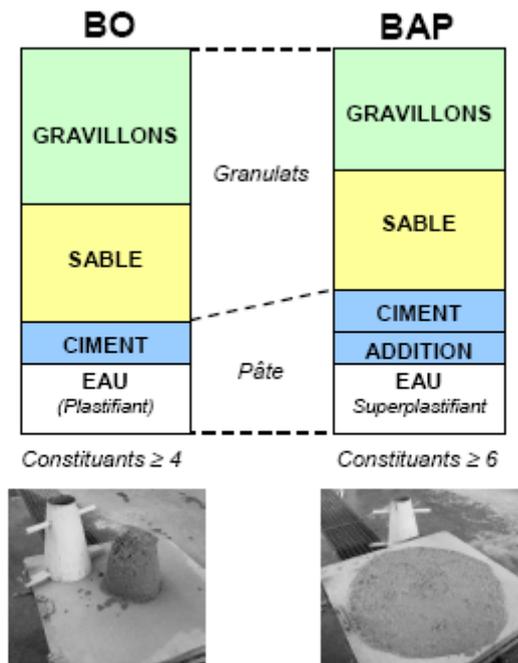
On distingue donc aujourd'hui, en France (conformément aux Recommandations pour l'emploi des BAP éditées par l'AFGC et le PN BAP), trois catégories [03] :

- **Catégorie 1** : il s'agit des ouvrages horizontaux de faible épaisseur (planchers, dallages) pour lesquels le ferrailage est léger et le béton peut être facilement réparti sur toute la surface ;
- **Catégorie 2** : elle couvre les ouvrages horizontaux épais pour lesquels les risques de ségrégation statique sont importants, et les ouvrages verticaux courants (on exclut le cas des ouvrages à très forte densité de ferrailage) ;
- **Catégorie 3** : ce sont les ouvrages exigus ou très fortement ferrillés (pour lesquels l'écoulement du béton dans le coffrage est le plus difficile).

### 4.4. Constituants des Bétons autoplaçant :

Le béton auto-plaçant est composé des mêmes matériaux que le béton ordinaire qui sont ; le ciment, gravillons et eau, avec une différence de taille c'est l'ajout d'une proportion d'additions minérales (addition calcaire, fumé de silice, cendre volante...). Ces ajouts dans certains cas peuvent être déduits du dosage en ciment. Habituellement, les mélanges chimiques (adjuvant) utilisés sont des réducteurs d'eau de haute gamme (superplastifiant) et agents viscosité, qui changent les propriétés rhéologiques du béton.

Le *Figure 4.1* suivante donne les Compositions d'un béton ordinaire (BO) et d'un béton auto-plaçant (BAP). Aspect d'un BO plastique et d'un BAP à l'état frais [04].



**Figure 4.1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.**

*Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [04].*

De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des formulations appropriées aux BAP. Les compositions tirées de la littérature [05] soulignent deux particularités :

Ces bétons contiennent un volume de fines plus important que les bétons classiques et vibrés et souvent un agent de viscosité.

Les différents constituants, en plus du ciment et de l'eau dosée de manière à obtenir une résistance mécanique donnée, qui est proposés pour composer les bétons auto-plaçant sont : Les granulats, les fines, les adjuvants et l'agent de viscosité.

#### 4.4.1. Ciment :

Le ciment est un liant hydraulique qui durcit tant à l'air que sous l'eau. Il est obtenu par broyage fin du clinker avec une quantité nécessaire de gypse et un/ ou des ajout(s) minéraux actif (ciment composé), faite simultanément ou par malaxage minutieux des mêmes matériaux broyés séparément, Les principaux composés du ciment portland sont [06] :

- ☞ Les silicates tricalciques (alite) :  $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$  [ $\text{C}_3\text{S}$ ]
- ☞ Les silicates bicalciques (belite) :  $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$  [ $\text{C}_2\text{S}$ ]
- ☞ Les aluminates tricalciques :  $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  [ $\text{C}_3\text{A}$ ]

☞ Les alumino-ferrites tétracalciques :  $4 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  [ $\text{C}_4\text{AF}$ ]

☞ Autres : (sulfates, alcalins, impuretés, . . .).

Selon la teneur des constituants autres que le gypse ajouté ou non au clinker, la norme européenne NF EN 197-1, donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en cinq types principaux à savoir :

1. CEM I – CPA Ciment Portland Artificiel ;
2. CEM II – CPJ Ciment Portland composé;
3. CEM III – CHF Ciment de haut fourneau;
4. CEM IV –CPZ Ciment pouzzolanique;
5. CEM V –CLC Ciment aux laitiers et aux cendres.

#### 4.4.2. Granulats :

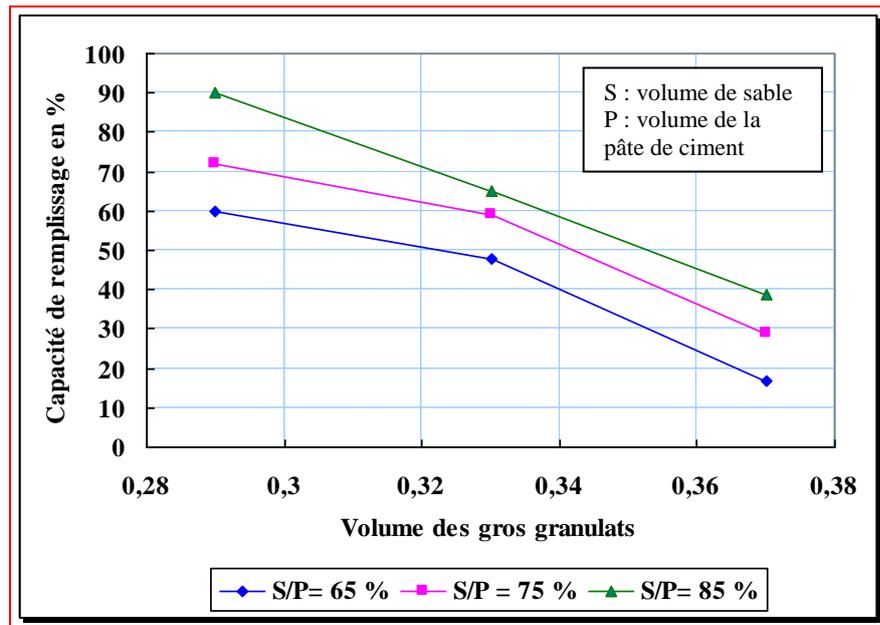
C'est l'ensemble des grains de dimensions comprises entre 0.08 et 125 mm, qui peuvent être d'origine naturelle (sables, graviers de mer et de rivières), artificiels (argile expansée) ou issue du recyclage de déchets de l'industrie (laitier de haut fourneaux).

Les granulats, qui sont généralement moins déformables que la matrice de ciment, s'opposent à la propagation des microfissures provoquées dans la pâte par le retrait. Ils améliorent ainsi la résistance de la matrice. Le choix d'un granulats est donc un facteur important de la composition du béton, qui doit toujours être étudié en fonction des performances attendues, spécialement sur le plan de la durabilité.

Dans un BAP, les granulats roulés permettent de diminuer le risque de ségrégation d'après Khayat .Yurugi et al, rapporté par Khayat [07], considèrent que le volume des gros granulats ( $D > 5 \text{ mm}$ ) dans le béton est l'un des facteurs les plus importants à prendre en considération. En effet ils ont constaté que plus la teneur en gros granulats augmente plus la capacité de remplissage diminue.

La figure 4.1 montre la très grande influence du volume de gros granulats sur le coefficient de remplissage contrairement au rapport sable sur pâte qui, lui, n'influence pas sur ce coefficient.

De plus les gravillons étant la cause de blocage en milieu confiné, leur volume est limité et le rapport gravillon / sable est proche de 1 d'après Sedran [08].



*Figure 4.2: Variation de la capacité de remplissage en fonction de la teneur en gros granulats, Pour différents rapports sable sur pâte d'après YURIGI et al. [09].*

La taille maximale des granulats est aussi un facteur non négligeable. En effet plus la taille maximale des granulats augmentent, plus le risque de blocage croit. *Le tableau 4.1.* Illustre l'influence du diamètre maximal  $D_{max}$  du granulat sur la variation du pourcentage de passants obtenu par l'essai à la passoire.

$D_{max}$ (mm)	Etalement (cm)	% Passant
20	72	28
16	70	35
14	74	91
12.5	69.5	100

*Tableau 4.1: Sensibilité au  $D_{max}$  de l'essai à la passoire [08]*

On remarque que le risque de blocage est fonction aussi de l'espacement des armatures selon les auteurs Nishibayashi S. et al. [10].

#### 4.4.3. L'eau de gâchage : NF EN 1008 :

L'eau de gâchage est un ingrédient essentiel dans le béton. Il joue deux fonctions principales : confère au béton sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement. La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du

béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure, la cinétique d'hydratation, etc [11]. L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences de la norme NF EN 1008, qui convient dans la fabrication de béton BAP, Les autres comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, eau d'origine souterraine, eau naturelle de surface et eau de rejet industriel, eau de mer et eau saumâtre, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaire ainsi que les essais chimiques et mécaniques. Etant donné que le dosage en eau influence de manière considérable la viscosité et la capacité de remplissage du béton BAP.

#### **4.4.4. Additions minérales :**

Depuis toujours les ajouts minéraux ont été cités pour leurs qualités exceptionnelles tant sur le plan économique que technique,

Les bétons autoplaçant sont caractérisés par une fluidité importante et surtout une diminution de la ségrégation et du ressuage. Pour obtenir ces propriétés et l'arrangement granulaire, on ajoute de fortes quantités en addition minérale, Selon la norme NF EN 206, les additions minérales dans le ciment sont classées en ajouts actifs et ajouts inertes.

##### **4.4.4.1. Ajouts minéraux inertes :**

Selon certains chercheurs [12], les particules de clinker de dimension supérieure à 60  $\mu\text{m}$  ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker d'une telle dimension pourrait être remplacées par celles de matériaux inertes (NF EN206-1), Parmi ces additifs on distingue le calcaire et la poussière.

##### **➤ *Filler calcaire :***

Les fillers calcaires comme étant des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, kieselguhr,...). Le calcaire se compose principalement de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ , qui existe sous plusieurs formes polymorphiques : calcite, aragonite et vaterite.

Les fillers calcaires cumulent trois propriétés intéressantes : une certaine activité hydraulique, des éléments de faible dimension qui permettent un remplissage granulaire efficace et un faible coût d'après Z.Guemmedi et al. [13].

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles [13] :

- ☞ Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique.
- ☞ Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- ☞ Un rôle chimique et physique par augmentation des résistances et amélioration de la durabilité.

#### 4.4.4.2. Ajouts minéraux actifs :

Ces ajouts qui jouent un rôle dans le processus de durcissement et sont prises en compte dans le calcul de la teneur minimale en ciment utilisée et du rapport Eau/Ciment grâce à un facteur k. Parmi ces additifs on distingue la pouzzolane naturelle, la cendre volante, La fumée de silice et le laitier de haut fourneau.

##### ➤ *La pouzzolane naturelle :*

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive, d'alumine et d'oxyde de fer [14].

Tous les matériaux appelés « pouzzolanes » ne possèdent pas forcément cette propriété. On peut, dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés : ajouts de produits chimiques, broyage à une finesse plus élevée et traitement thermique.

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

☞ **Propriétés hydrauliques des pouzzolanes :** La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de la chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.

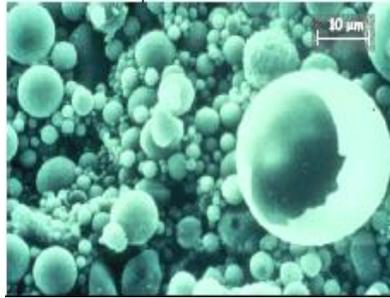
☞ **Propriétés physiques de remplissage :** En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité.

##### ➤ *Les cendres volantes NF EN 450 :*

Les cendres volantes, produits pulvérulents de grande finesse, proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques on distingue deux familles de cendre volantes [15]:

✓ **Cendres volantes siliceuses (V) :** sont principalement des particules sphériques ayant des propriétés pouzzolaniques, constituées essentiellement de silice réactive et d'alumine ainsi que d'oxyde de fer et autres composants. La teneur en chaux réactive inférieure à 5%, la teneur en silice réactive >25 %.

✓ *Cendres volantes calciques (W)* : présentent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques, contenant une teneur de chaux réactive supérieure à 5%, le reste étant de la silice réactive, d'alumine, d'oxyde de fer et d'autres composants.

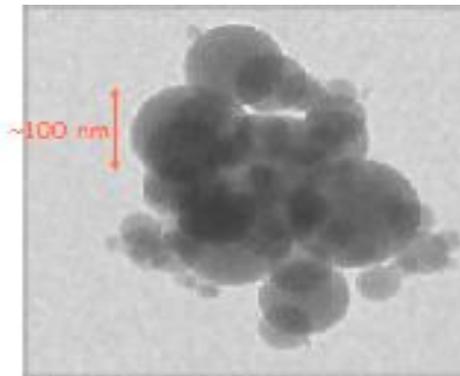


*Figure 4.3 : la particule des cendres volantes*

Plusieurs études, montrent que la présence des cendres volantes joue des rôles d'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton frais et l'imperméabilité des surfaces.

➤ *La fumée de silice NF EN 13263 :*

C'est une poudre amorphe de silice extrêmement fine, récupérée dans les cheminées lors de condensation des gaz de réaction résultant de la fabrication du silicium ou d'alliages [06]. Ce produit se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise. Les particules sont souvent inférieures au micron.



*Figure 4.4: la particule de fumée silice*

Plusieurs études, montrent que la présence de fumée de silice accélère la réaction d'hydratation du ciment portland. Cet effet accélérateur des fumées de silice est important lorsque celles-ci sont utilisées avec un fluidifiant.

Cet effet accélérateur des fumées de silice sur l'hydratation du ciment, combiné à l'effet de remplissage dû à leur extrême finesse peut conduire à de meilleures résistances du béton à court terme [06].

➤ **Le Laitier de haut fourneau NF EN 15167 :**

Le laitier, sous produit de fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, contient au moins deux tiers en masse de laitier vitreux et présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable. Son utilisation permet de diminuer la quantité de chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment, d'augmenter les hydrates dans la pâte, donc de diminuer la perméabilité du béton durci et améliorer sa durabilité aux sulfates et à l'eau de mer [16].

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- ⊗ Broyage poussé.
- ⊗ Chaleur (étuvage, autoclavage).
- ⊗ Produits chimiques (la chaux, la soude (NaOH) ou des sels de soude, le sulfate de calcium (gypse)).

#### **4.4.5. Adjuvant :**

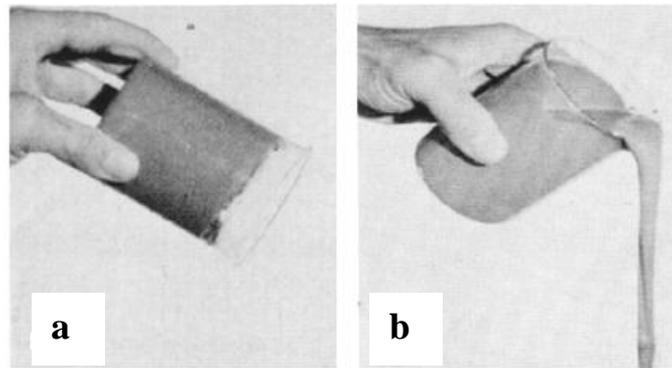
Ce sont des produits chimiques organiques ou inorganiques, incorporés en faible quantité moins de 5% de la masse du ciment sous forme de poudre ou de solution, avant ou pendant le malaxage, dans le but de modifier certaines propriétés du béton, qu'il soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement ou à l'état durci. Les adjuvants sont classés par la norme NF EN 934-2.

##### **4.4.5.1. Super-plastifiant (NF EN 934-2) :**

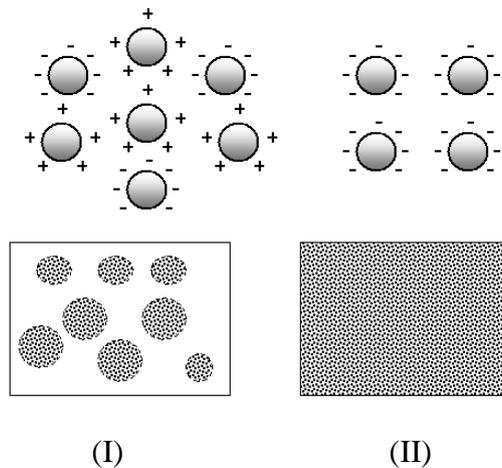
Introduits dans un béton, un mortier ou un coulis, en général peu avant sa mise en oeuvre, ils ont pour fonction principale de provoquer un fort accroissement de l'ouvrabilité du mélange.

Les superplastifiant sont des polymères organiques solubles dans l'eau dont la synthèse réalisée par une opération complexe de polymérisation produit de longues chaînes de molécules de masses moléculaires élevées et de ce fait, sont relativement chers.

La principale action des molécules à longues chaînes est de s'enrouler autour des grains de ciment et de leur conférer une charge hautement négative, de sorte qu'ils se repoussent les uns les autres, conduisant à une défloculation et à une dispersion des grains de ciment (Figure 4.5) ; Les superplastifiant ne modifient pas fondamentalement la structure de la pâte de ciment hydratée, leur principal effet étant une meilleure distribution des grains de ciment et, conséquemment, une meilleure hydratation. Cela pourrait expliquer pourquoi, dans certains cas, les superplastifiant augmentent la résistance du béton à rapport eau/ ciment constant [01].



**Figure 4.5: Effet de superplastifiant sur le ciment :**  
**(a) ciment et eau, (b) ciment et eau et superplastifiant [01].**

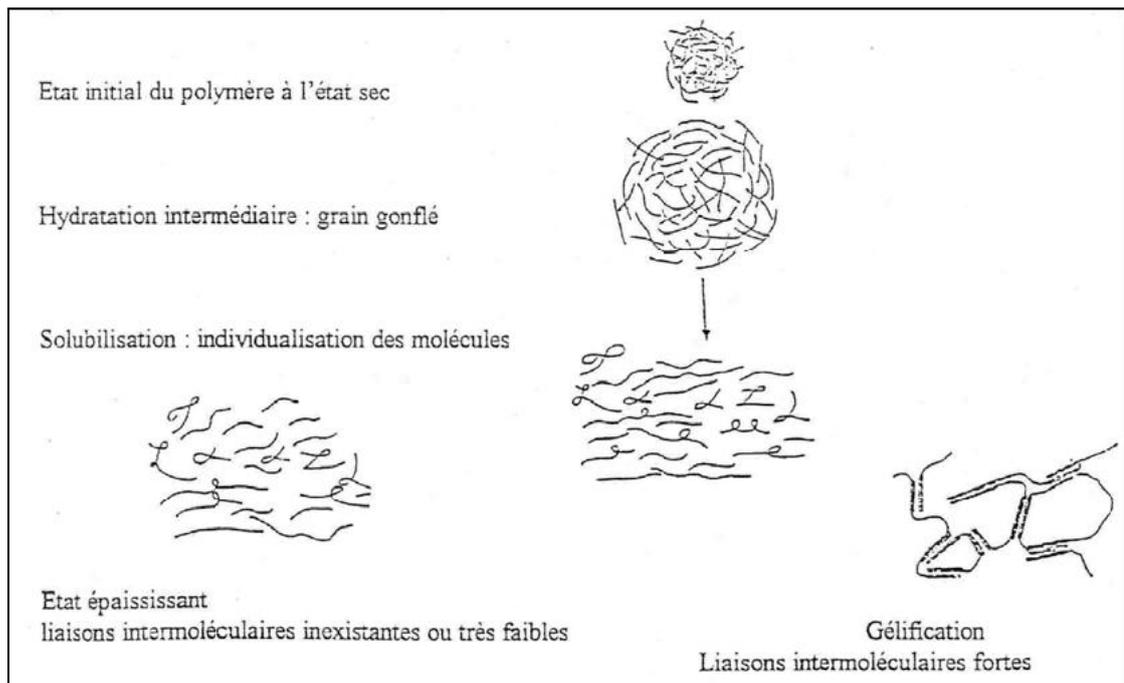


**Figure 4.6: Action de dispersion des grains de ciment :**  
**(I) pâte floculée ; (II) pâte dispersée [01].**

#### 4.4.5.2. Agent viscosité :

Généralement, les fluidifiants diminuent la viscosité du béton, ce qui rend le matériau moins stable vis-à-vis du phénomène de ségrégation [17]. Les agents viscosité ont pour propriété essentielle de modifier le comportement rhéologique des milieux aqueux dans lesquels ils sont utilisés et peuvent être utilisés avec intérêt dans la composition des BAP.

Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci (Figure 4.6). Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.



**Figure 4.7: Interaction entre l'eau et les polysaccharides [02]**

D'après Khayat [07], le mode d'action des agents de viscosité se fait par absorption des molécules d'eau sur les longues chaînes du polymère (liaison hydrogène) induisant un gonflement du polymère qui augmente la viscosité de l'eau et par conséquent celle de la pâte de ciment.

En effet pour un même squelette granulaire, en combinant agent de viscosité et superplastifiant, on améliore les propriétés du béton frais et on augmente de façon importante la résistance à la ségrégation et ressuage [08].

#### 4.5. La formulation des bétons ordinaires

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre (ouvrabilité) souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes de formulations existent:

##### **Approche graphique :**

- ↗ Méthode Faury
- ↗ Méthode Bolomey
- ↗ Méthode Dreux-Gorisse

##### **Approche expérimentale :**

- ↗ Méthode Valette
- ↗ Méthode d'Abrams

La formulation d'un béton doit intégrer avant tout les exigences de la norme NF EN 206-1, laquelle, en fonction de l'environnement dans lequel sera mis en place le béton, sera plus ou moins contraignante vis-à-vis de la quantité minimale de ciment à insérer dans la formule ainsi que la quantité d'eau maximum tolérée dans la formule. De même, à chaque environnement donné, une résistance garantie à 28 jours sur éprouvettes sera exigée aux producteurs, pouvant justifier des dosages de ciments plus ou moins supérieurs à la recommandation de la norme, et basée sur l'expérience propre à chaque entreprise, laquelle étant dépendante des ses matières premières dont la masse volumique peut varier, notamment celle des granulats.

D'autres exigences de la NF EN 206-1 imposent l'emploi de ciment particulier en raison de milieux plus ou moins agressifs, ainsi que l'addition d'adjuvants conférant des propriétés différentes à la pâte de ciment que ce soit le délai de mise en oeuvre, la plasticité, la quantité d'air occlus, etc.

#### **4.6. La formulation des bétons autoplaçant:**

Les différentes propriétés des bétons autoplaçant à l'état frais (une mobilité en milieu non confiné et confiné, résistance à la ségrégation et au ressuage...etc.) se différencie, notablement de celui d'un béton ordinaire. La formulation d'un tel béton est donc plus complexe que celle d'un béton ordinaire et implique une composition spécifique.

La majorité des formules de BAP sont conçues actuellement de manière expérimentale, La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

D'après les recommandations de l'AFGC [02], la formulation de béton autoplaçant se base selon les critères suivant :

- Une quantité de pâte élevée (de l'ordre de 40% du volume total).
- Une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/ m<sup>3</sup>).
- Le volume de gravillon est faible (rapport G/S de l'ordre de 1).
- Utilisation d'un superplastifiant (à un dosage proche du dosage à saturation).
- éventuellement utilisation d'un agent viscosant.

IL existe dans la littérature des techniques de formulation moins empiriques.

On présente dans ce qui suit quelques méthodes de formulation en revue :

#### 4.7. Modes de formulations des BAP :

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

Deux grandes familles prévalent actuellement :

- La première [Hayakawa 95, Nagataki 95] [18] concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m<sup>3</sup>) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les super-plastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants.
- Une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [Peterson 96]. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables.

##### 4.7.1. Cahier des charges minimum à l'état frais :

Plusieurs spécificités de composition des BAP découlent de ces diverses approches :

- Un BAP doit s'écouler naturellement sous son poids propre (avec un débit suffisant), c'est à dire avoir un étalement et une vitesse d'étalement importants.
- Un BAP doit aussi pouvoir remplir, sans vibration, des zones confinées et une grande fluidité du béton peut ne pas être suffisante pour cela. En effet, lors de son écoulement au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier ne résiste pas suffisamment au cisaillement (figure 4-8). Ainsi, des arches peuvent se former et interrompre l'écoulement par colmatage. Pour éviter ceci, il est nécessaire qu'un BAP ait une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement en zone confinée. [01]

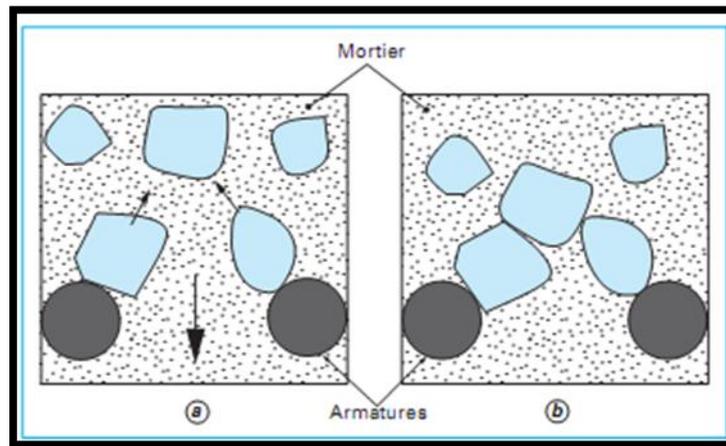


Figure 4.8: phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [sedran 95]. [19]

- Un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques.
- De plus, le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées, par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures [AFGC 00].

En résumé, le principal problème dans la formulation d'un BAP est de concilier des propriétés a priori contradictoires comme la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton. [19]

#### 4.7.2. Particularités de la composition des BAP :

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre.

##### a. Un volume de pâte élevé :

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + adjuvant+eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400l/m<sup>3</sup>).

Une quantité de fines ( $\varnothing < 80 \mu\text{m}$ ) importante :

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m<sup>3</sup>) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (et un coût de formule trop élevé).

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité (DTU 21, normes XP P 18-305 où EN 206, etc.) et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc., le filler calcaire étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les formulations de BAP) et leur proportion respective.

L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et auto-plaçantes du béton [Billberg 01].

**b. L'emploi de super-plastifiants :**

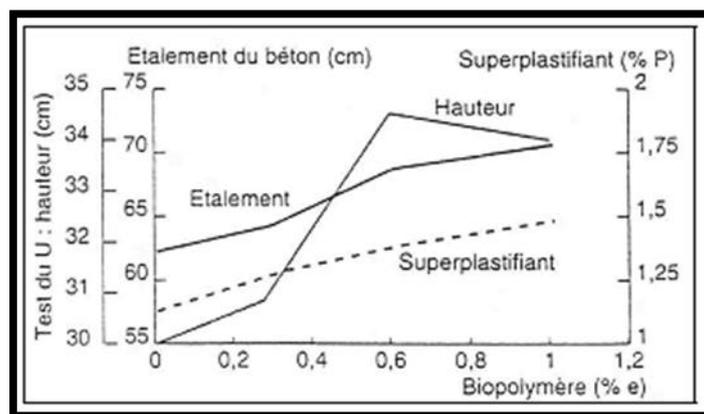
La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des super-plastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylate, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

Les *super-plastifiants* interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante [Baron 96]. [06]

**c. L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (réteneur d'eau) :**

L'ajout d'un super-plastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels où des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants. [06]

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des super-plastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité et super-plastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage (figure 04).



*Figure 4.9: optimisation du dosage agent de viscosité et super-plastifiant, d'après [tangtermsirikuls 91].*

Ces produits semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant (E/L) élevés, les fines n'étant alors pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faibles (rapport eau/fines < 0,3). Pour les bétons intermédiaires, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas.

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [Sedran 95]. [08]

#### **d. Un faible volume de gravillon :**

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée. Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée.

Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

Le diamètre maximal des gravillons (DMAX) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec DMAX, cela conduit à diminuer le volume de gravillon.

En résumé, les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes. Afin d'obtenir les

propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiant) sont nécessaires.

#### 4.7.3. Quelques points à surveiller :

Toute la gamme de résistances des bétons conventionnels peut être obtenue avec les BAP en jouant sur la nature du liant qui les compose (ciment, additions) et le rapport eau sur liant. Les résistances au jeune âge peuvent être affectées lorsque les bétons contiennent de grosses proportions d'additions, où un fort dosage en adjuvant.

Il est possible de produire et de stabiliser suffisamment d'air dans ces bétons avec un agent entraîneur d'air classique, pour les protéger efficacement du gel-dégel. Il semble toutefois indispensable d'introduire l'agent entraîneur d'air, avant la fluidification complète du béton (avant l'ajout de la totalité du superplastifiant, par exemple). En effet, l'entraînement et la stabilisation de l'air semblent plus difficiles, voire impossibles, lorsque le béton est très fluide dans le malaxeur.

Pratique actuelle de la formulation des BAP :

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

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

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

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

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m<sup>3</sup>.

- La masse de ciment est supérieure où égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m<sup>3</sup>. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m<sup>3</sup>.
- Le dosage en super-plastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certaines formulations ont certes développés leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux-Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence universelle.

Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plupart du temps directement en centrale à béton. Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale. Par ailleurs, le diagnostic d'une mauvaise formule est rendu difficile, en centrale à béton, par les erreurs inhérentes au dispositif de fabrication ; par exemple, la teneur en eau exacte du sable fait parfois défaut.

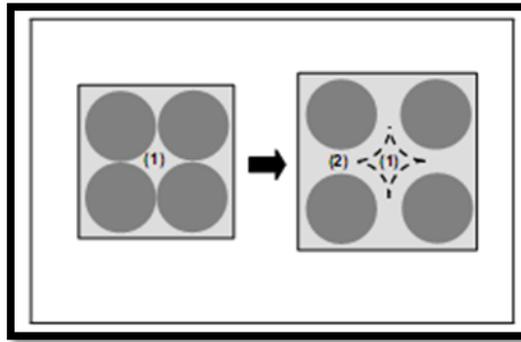
Il est à noter enfin que les précurseurs et les acteurs de la formulation - sur le terrain - sont les fournisseurs en adjuvants, ce qui est tout à fait cohérent avec le rôle fondamental du super-plastifiant dans le concept du BAP.

#### **4.8. Revue bibliographique des techniques de formulation des BAP :**

Il existe dans la littérature des techniques de formulation moins empiriques. On présente ci-dessous une revue des grandes familles d'approches.

##### **4.8.1. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte :**

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. Oh et al introduisent la notion d'excès de pâte schématisée sur la figure 10. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.



*Figure 4.10: notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2).*

Oh et al ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par Tangtermsirikul, Pettersson et Bui.[20] Cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés : un volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage.

La notion d'excès de pâte a également été proposée par Chanvillard et al dans une méthode de formulation des bétons de sable.

#### **4.8.2. Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers :**

Okamura, le concepteur des BAP [21], propose de formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en super-plastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité.

A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons. [20],

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications. Billberg et Jacobs et al montrent que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier.

#### **4.8.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire :**

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle-aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

Reprenons la figure 05, en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie.

Sedran et de Larrard [22] ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton.

Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc.). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton.

Roshavelov a également développé un modèle d'empilement granulaire, qui semble néanmoins être resté à un stade plus théorique. [23]

#### **4.8.4. Méthode basée sur un plan d'expérience :**

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressant pour connaître l'effet des paramètres de composition. Khayat et al [07] ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines  $E/(C+A)$ , la masse de Superplastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles

obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC.

#### **4.8.5. Méthode basée sur le mode de compactage :**

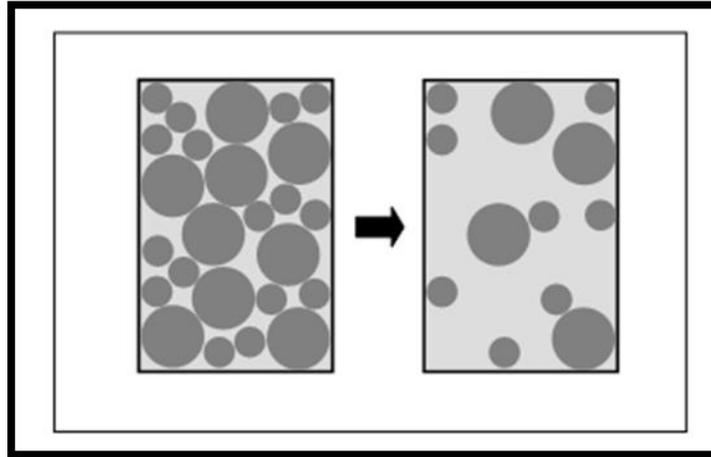
L'idée principale de cette méthode consiste à déterminer le compactage maximal du granulat en mesurant sa masse volumique avec différents rapports du sable sur le granulat puis à calculer la quantité de liants (ciment et addition minérale) en se basant sur la résistance à la compression du BAP souhaitée. En outre, les pâtes formant le liant (ciment et addition minérale) du mélange doit avoir la même fluidité. Par ailleurs, le dosage du super-plastifiant du BAP est déterminé en fixant une valeur cible d'étalement par le biais de mortier avec l'essai d'étalement au cône. Les essais de vérification à l'état frais tels que l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à la boîte en L, la stabilité au tamis (recommandations de l'AFGC) et l'écoulement à l'entonnoir (directives européennes), sont effectués après le malaxage pour vérifier la formulation du BAP.[09]

#### **4.9. Principe et application des approches :**

**4.9.1. Approche japonaise :** okamura et ozawa se sont les premiers qui ont proposé la formulation d'un béton autoplaçant [21],

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants.

➤ **Dosage des gravillons :** Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m<sup>3</sup> de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides (figure 4.11). Elle dépend bien sûr du mode de compactage.



*Figure 4.11: réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité. [04]*

A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m<sup>3</sup>. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

- **Dosage du sable :** Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.
- **Dosage du liant :** La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m<sup>3</sup>). Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.
- **Dosage de l'eau et du super-plastifiant :** Les dosages en eau et en super-plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

#### **4.9.2. Approche Suédoise : Proposée par [Peterson et al1996]**

La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par [Tangtermsirikul et al ,1995]. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégré dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le super-plastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée.

Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tous types de granulats.

#### **4.9.3. Approche Française :** ( LCPC) proposée par [De larrard et al, 1994] [22] :

Au LCPC, un modèle mathématique a été développée à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants de mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1 % à partir des constituants ci-après :

- Les distributions granulaires.
- Les proportions de mélange.
- La compacité propre.
- La densité apparente.

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- 1) La proportion de liant est fixée a priori (70% du ciment ,30% d'addition par exemple).
- 2) Le dosage, à saturation, du super-plastifiant est déterminé selon l'expérience de LCPC, se dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- 3) Le besoin en eau de ce mélange (en présence du super-plastifiant) est déterminé les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (effet de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.10<sup>4</sup>. La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton auto-plaçant est donc proposée basée sur les prévisions de modèle.

La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en super-plastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaité et par conséquent les propriétés requises pour le béton auto-plaçant sont atteintes.

#### **4.9.4. Autres méthodes :**

D'autres méthodes de formulation, que nous ne développerons pas dans cette étude bibliographique, ont été publiées telle que la méthode reposant sur la théorie de « l'excès de pâte » : proposée par [Oh et al, 1999] ; la méthode d'évaluation simple utilisée par [Ouchi et al, 1999] (étudié l'interaction entre les granulats et les particules fines du mortier frais). [21]

#### 4.10. Conclusion

A l'issue de la lecture de la littérature, il est clair qu'il n'existe pas de méthode générale de formulation pour le BAP. Cependant, les méthodes s'affinent de plus en plus. Okamura et Ouchi ont premièrement proposé une méthode empirique de formulation du BAP au Japon. La méthode de minimisation du volume de la pâte vise à trouver la teneur maximale de granulats sans provoquer de blocage autour des armatures. Bui et col. Ont amélioré cette méthode en ajoutant un critère de phase liquide. Dans la méthode proposée par Su N. et col. un coefficient de packing factor (PF) est introduit pour ajuster la teneur relative de granulats et de pâte. Sedran et de Larrard ont développé un modèle mathématique, appelé modèle d'empilement compressible, permettant de prévoir les comportements du BAP à l'état frais, en fonction des propriétés du squelette granulaire.

D'un autre côté, le choix des constituants a une grande influence sur les propriétés des bétons à l'état frais et à l'état durci. Les caractéristiques des matériaux utilisés changent d'une région à une autre. A titre d'exemple, utiliser des granulats lavés ou non lavés influencent considérablement sur les résultats obtenus.

A ce titre, il serait plus qu'intéressant de tester les différentes méthodes afin d'évaluer celle qui reste la plus appropriée pour réaliser des mélanges de BAP à bases de matériaux locaux.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE 4**

- [01] Cristien druta B.S. (mechanical eng.), Polytechnic University of Bucharest,1995 August 2003, «Tensile Strength and Bonding Characteristics Of Self-Compacting Concrete»,
- [02] Association Française de Génie Civil (AFGC), «Béton Auto-Plaçants », Recommandations provisoires, juin2000, Annales du bâtiment et des travaux publiques
- [03] Stéphan ASSIÉ, « durabilité des bétons autoplaçants », thèse doctorat l'institut national des sciences appliquées de Toulouse
- [04] Philippe Turcry,"Retrait et fissuration des bétons autoplaçants- influence de la formulation", thèse doctorat l'école centrale de Nantes, février 2004
- [05] A. Loukili and Ph. Turcry. "Effect of a viscosity agent on mechanical properties of self compacting concrete", In Proceedings of the Conference ICPCM A new era of building, 18-20 février 2003, 2003.
- [06] Baron.J, Olivier.J.P et. Weiss.JC, 1996: « Les bétons Bases et données pour leur formulation », sous la direction de Jacques .BARON, Jean-PierreOLIVIER, Ed Eyrolles.
- [07] KHAYAT K.H (1998), "Use of viscosity-modifying admixture to reduce top-bar effect of anchored bars cast with fluid concrete", ACI Material journal, vol.95 N°2, march-avril.
- [08] Thierry SEDRAN, « les bétons autonivelans, synthèse bibliographique », Bull. liaison. Labo .Petch –196-Mars –avr. 1995- Réf. 3889.pp53-60.
- [09] YURIGI M., SAKATA N., IWAI M., SAKAI G. (1993), « Mix design for highly workable concrete », Conference concrete 2000, Dundee, 7-9 September, 11p.
- [10] NISHIBAYASHI S., INOUE S., YOSHINO A., KARUDA T., KUME T. (1994),« A study on the flow of superplasticized concrete », Proc. Ffourth CANMET/ACI Int. Conf. On superplasticizers and other admixtures in concrete, Montréal-Canada, oct, p177-187.
- [11] Petrov.N, « effets combinés de différents facteurs sur l'expansion des bétons causée par la formation différée de l'étringite», Thèse de doctorat à l'Université Sherbrooke Canada, avril 2003
- [12] A.KOMAR, « matériaux et éléments de construction », troisième édition MIR pages ; 1 à 56. Moscou (1976).

- [13] Z.Guemmedi, G.Escadecuas, B.Toumi, H.Houari, P.Clastres, « Influence des fillers calcaires sur les performances mécaniques des pâtes de ciment ».1er congrès international sur la technologie et la durabilité du béton, U.S.T.H.B Alger- Algérie, pp 1-8, 24- 26 Mai 2004.
- [14] MOULI.M, « étude des propriétés physiques et mécaniques de la pouzzolane en vue de la fabrication des légers et des bétons à haute performance », thèse doctorat à l'université des sciences et de technologie Med boudiaf d'oran.
- [15] P. C. AITCIN, C., F. Autefage., A. Carles-Gibergues., A. Vaquier., « comparative Study of the Cementitious properties of different Fly Ashes”, ACI SP-91, pp 91-114, (1986)
- [16] P. C. AITCIN, « Sur les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fonte Thomas et leur utilisation dans les mortiers en bétons », Revue des matériaux de construction, pp 185-194, Mai1968.
- [17] L.HASNI, « béton autoplaçant ». Rapport de recherche N°98 – 004/98-006. Juillet 1999. Par CEBTP (centre de saint- Remy).
- [18] HAYAKAWA; MASTUOKA; SHINDOH (1993), “ Development and application of superworkable concrete”, RILEM workshop special concrete: workability and mixing; P.Bartos Ed; p25-51.
- [19] SEDRAN T ; « Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux BAP », thèse de doctorat de l'ENPC, 1999.
- [20] Van Bui et Montgomery, ”Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume, Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, 1999, Stockholm, pp 373-384.
- [21] Hajime Okamura (Professor, Kochi University of Technology, Japan) and Masahiro Ouchi (Associate Professor, Kochi University of Technology, Japan), “Self-Compacting Concrete” ,Received 14 November 2002, accepted 30 March 2003, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, No. 1, pp 5-15, April 2003 / Copyright © 2003 Japan Concrete Institute. E-mail: ouchi.masahiro@kochi-tech.ac.jp
- [22] Larrard, « Structures granulaires et formulation des bétons », Etudes et Recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA 3
- [23] T.T. Roshavelov, “Concrete mixture proportioning with optimal dry packing. In Proceedings”, of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.

# CHAPITRE 5

## Propriétés du Béton autoplaçant à L'état Frais et Durci

---

## PROPRIETES DU BETON AUTO-PLAÇANT A L'ETAT FRAIS ET DURCI

---

### 5.1. Introduction :

En plus de la capacité de sa mise en œuvre sous son propre poids sans moyens de serrage ; les propriétés les plus importantes du BAP sont sa fluidité, sa viscosité, sa résistance à la ségrégation et le ressuage

Il existe de nombreux procédés pour effectuer le contrôle de ces propriétés sur béton à l'état frais et à l'état durci.

### 5.2. Propriétés du béton autoplaçant à l'état frais :

#### 5.2.1. Caractéristiques Rhéologiques des bétons autoplaçant :

La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique.

La rhéologie donne les relations entre contraintes et déformations d'un élément de volume, en tenant compte éventuellement de leur histoire et des valeurs actuelles de leur dérivée par rapport au temps. Ces relations, dites de comportement, font correspondre les déformations d'un élément de volume aux contraintes qui lui sont imposées.

Le comportement rhéologique d'un matériau (Figure 5.1) est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement,  $\tau_0$ .

Différents modèles peuvent être utilisés pour décrire le comportement rhéologique des bétons. Dans la pratique, deux modèles sont couramment utilisés pour les BAP : le modèle de Bingham et le modèle de Herschel-Bulkley représentés sur la Figure 5.1.

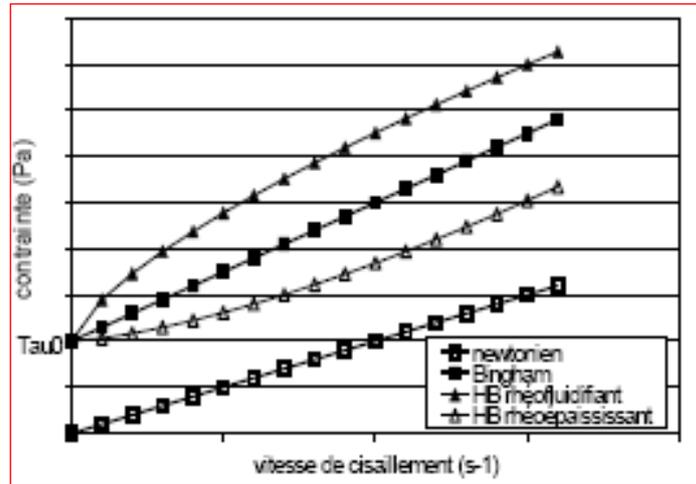


Figure 5.1: modèles rhéologiques [01]

Le fluide est considéré comme *binghamien* si la courbe d'écoulement est une droite, qui a pour équation :

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} \quad 5.1$$

Avec  $\tau$  : la contrainte de cisaillement (Pa) et  $\tau_0$  : le seuil de cisaillement (Pa)

$\eta_p$  la viscosité plastique ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ) et  $\dot{\gamma}$  la vitesse de déformation ( $\text{s}^{-1}$ ).

En ce qui concerne les bétons autoplaçants, selon De Larrard [03] a montré que l'équation de leur comportement suit le modèle de *Herschel-Bulkley*, l'équation du comportement est la suivante :

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \begin{cases} n > 1 & \text{fluide rhéoépaississant} \\ n = 1 & \text{fluide de bingham} \\ n < 1 & \text{fluide rhéofluidifiant} \end{cases}$$

Avec : K : coefficient de viscosité,

n : indice.

Toutefois, ce modèle est plus exigeant que celui de Bingham car il nécessite la détermination d'un paramètre supplémentaire.

Ces grandeurs (seuil de cisaillement, viscosité plastique) permettant de définir le comportement d'un béton lors de sa mise en place sont quantifiables à partir d'appareils appelés rhéomètres. A ce jour, les principaux dispositifs expérimentaux utilisés pour des mesures sur béton frais sont [02]:

- le viscosimètre à plaque parallèle BML (utilisé en Islande [Wallevik 90]).
- le rhéomètre coaxial BTRhéom (employé en France [De Larrard 96 b]).

- le rhéomètre coaxial CEMAGREF-IMG (utilisé en France [Hu 95]).
- le rhéomètre coaxial RhéoCAD (mis au point par la société CAD Instrumentation avec l'aide de M. Vernet, ingénieur au CTG, et employé au LMDC [Mouret 03])

Tous ces appareils mesurent le couple résistant du béton en fonction de la vitesse d'écoulement imposée (par mise en rotation de divers mobiles ou palettes). Ces deux données permettent ensuite d'obtenir, par différents calibrages, les grandeurs caractéristiques de l'écoulement du béton, à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

Cependant, la présence de granulats de tailles variées dans le béton ne permet pas de définir un matériau type pour tous ces rhéomètres, qui servirait de référence à toutes les mesures. Par conséquent, étant donné les caractéristiques inhérentes à chaque rhéomètre, les comparaisons des résultats d'un appareil à l'autre ne sont pas forcément évidentes.

### **5.2.2. Caractérisations à l'état Frais des bétons autoplaçant :**

Il n'existe pas d'essais standard, ni de critères bien défini pour assurer qu'un béton est effectivement autoplaçant. En effet, le comportement spécifique des BAP à l'état frais rend quasi inadaptés la pluparts des essais classiques sur les bétons traditionnels :

Les essais en maniabilimètre ne sont pas possibles en l'absence de vibrations et l'essai classique d'affaissement au cône d'abrams est inopérant, l'affaissement étant ici « total ».

C'est pourquoi les chercheurs et les industriels ont développé toute une série d'essais plus au moins complémentaires, mais dont l'interprétation reste bien souvent subjectif et dépendante de l'opérateur.

Dans la suite de l'étude seront présentés les essais proposés par l'AFGC qui servent actuellement de référence à défaut d'être normalisés. Les résultats de ces essais permettent de donner une vision qualitative pour les BAP. [04]

L'ouvrabilité des BAP se décompose en trois caractéristiques principales :

- 1) Mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement en cône d'abrams).
- 2) Mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L).
- 3) Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis).

### 5.2.2.1. L'essai d'étalement(EN 12350-8) :

Pour la détermination de l'étalement (Slump flow), on utilise le même cône que celui utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli du béton auto-plaçant. [04]

Le cône est ensuite soulevé et le BAP sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette du béton ainsi obtenu, qui devrait être comprise entre 650 et 750mm. La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être repartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette. Il est utile de documenter le résultat de cet essai au moyen de photographies.

La façon de disposer le cône n'est pas réglementé en suisse par une norme. L'important est de procéder toujours de la même manière. Lorsque la petite ouverture se trouve en bas (figure 5.2), le remplissage du cône avec le BAP est facilité et son soulèvement est empêché. Dans ce cas, il en résulte une valeur d'étalement plus élevée de 20 à 40 mm par rapport à celle obtenue avec le cône disposé en sens contraire pour le même béton. [04]

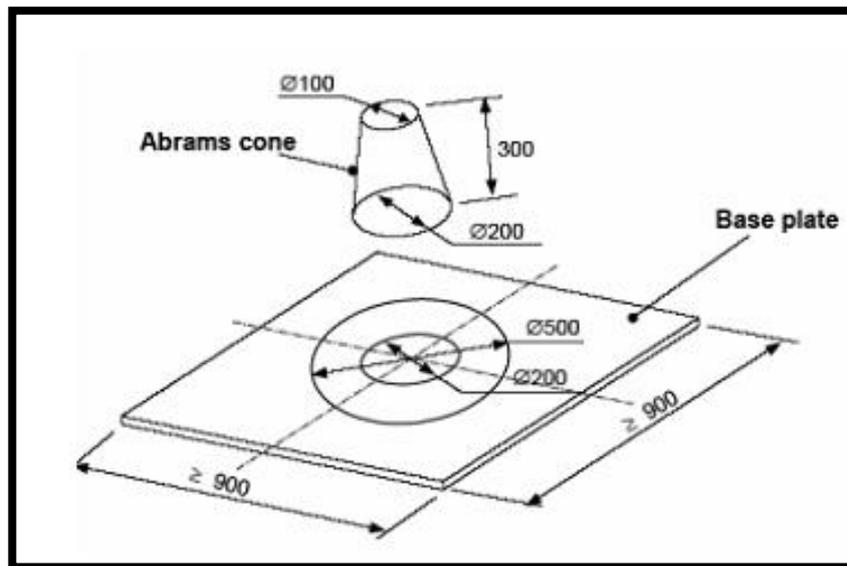


Figure 5.2: essai d'étalement (slump flow). [04]

En 2002, [06] les recommandations en termes d'étalement admissible définissaient la fourchette : 600 à 750 mm. Depuis différentes classes de BAP ont été désignées en fonction du type d'application. Ainsi, différentes classe d'étalement ont été définies :

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm.

- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm.
- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm.
- La vitesse d'écoulement : on mesure le temps d'écoulement que met le béton au cours de l'essai d'étalement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50cm. Ceci donne une idée moyenne sur la viscosité qui est une propriété rhéologique importante. La valeur typique de la vitesse d'écoulement est de 6,25 à 2,5 cm/s ; ceci correspond à un temps d'écoulement  $T_{50}$  varié entre 4 à 10 secondes. [02]

### 5.2.2.2. Essai à la boîte en L (EN 12350-10) :

La boîte en « L » (figure 5.3) permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas empêchée par des phénomènes de blocage.

La procédure d'essais dans la boîte en L est la suivante :

La partie verticale de la boîte est remplie du béton. En suite le volet est soulevé après une minute de repos, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer à travers d'un grillage, formé de trois barres d'armatures diamètre de 12mm, distantes de 59 à 41mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte. On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes. On peut aussi mesurer la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton ( $H_1$  et  $H_2$ ), afin de qualifier sa capacité d'auto-nivellement. Le rapport  $H_2/H_1$  devrait être supérieur à 0,8 pour les BAP (AFGC 2000). [05]

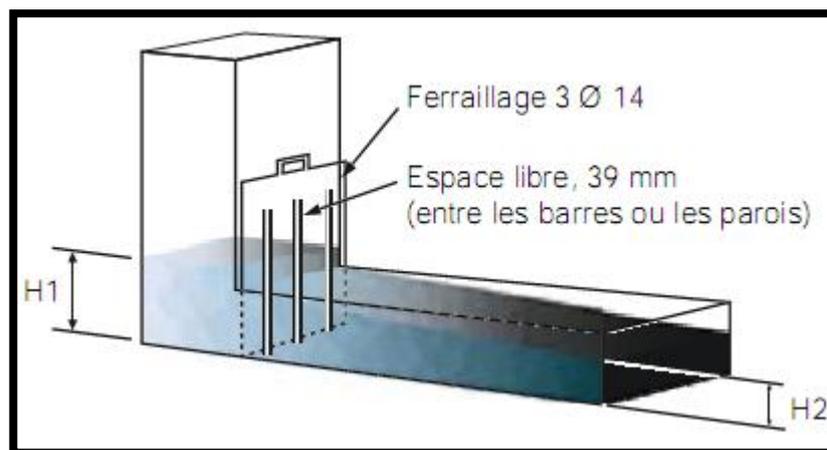


Figure 5.3: essai de la boîte en L. [04]

### 5.2.2.3. Essai de stabilité au tamis (EN 12350-11) :

Il consiste de mesurer la proportion  $\pi$  d'étalement fin du béton (laitance) passant à travers d'un tamis d'ouverture 5mm (figure 5.4) pour qualifier le béton vis-à-vis du risque de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante où non.

La procédure d'essais de stabilité au tamis est décrite comme suite :

A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés d'un seau. Après une attente de quinze minutes, une masse de 4,8 Kg de béton est versée du seau sur un tamis de maille 5 mm. Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de la pate (laitance) ayant traversé le tamis. Un pourcentage élevé de laitance par rapport à la masse initiale est un indicateur d'une faible résistance à la ségrégation.

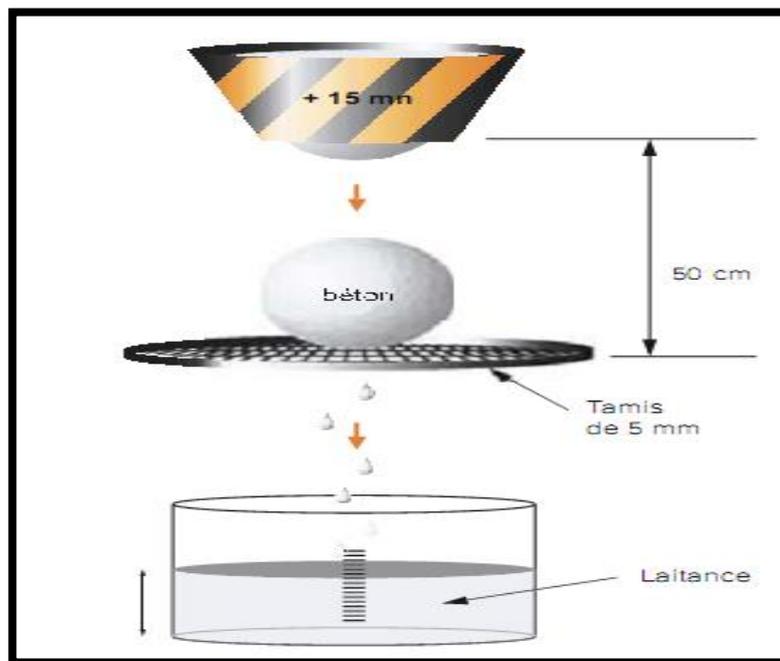
La stabilité au tamis  $\pi$  est calculée par la formule suivante :

$$\pi = (P_{\text{laitance}}/P_{\text{échantillon}}) \cdot 100\%$$

Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes :

- $0\% < \pi(\text{laitance}) < 15\%$  : stabilité satisfaisante.
- $15\% < \pi < 30\%$  : stabilité critique.
- $\pi > 30\%$  : stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).

L'AFGC a proposé en plus un essai de mesurer du ressuage, qui semble avoir été abandonnée aujourd'hui, car peu pertinent (le ressuage est faible chez les BAP) et très contraignant (utilisation d'un liquide nocif).



*Figure 5.4: essai de stabilité au tamis.*

#### 5.2.2.4. L'essai d'étalement modifié (EN 12350-12) :

L'essai de d'étalement modifié (j-Ring) (figure 5.5) fut développée au japon et consiste à faire s'écouler le béton au travers des barres d'armatures afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir de cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300mm de diamètre sont soudées des barres d'armature diamètre 16 à 18 mm, espacés régulièrement d'environ de deux fois et demi de leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchés de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière en uniforme à travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats parait homogène aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau. [04]

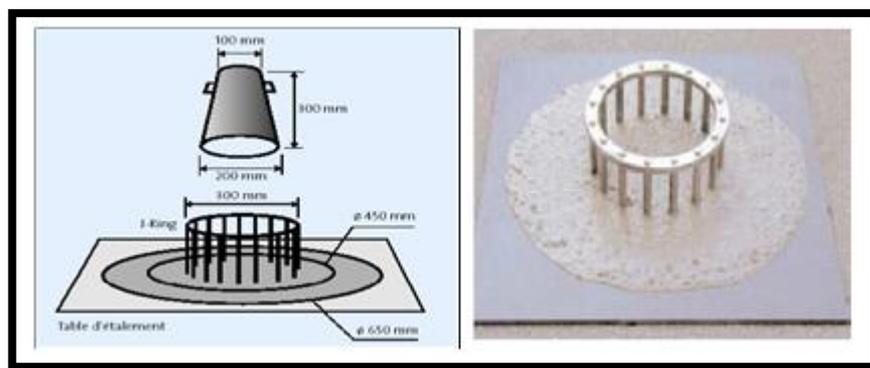


Figure 5.5: essai d'étalement modifié. [04]

#### 5.2.2.5. Essai de l'entonnoir(EN 12350-9) :

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

L'entonnoir dont les dimensions sont définis à la (figure 5.6) est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base et en suite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. [07] Dans la littérature scientifique, le temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto-plaçant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. [07] Un temps d'écoulement compris entre 9 et 25 secondes est recommandé pour les BAP. [08]

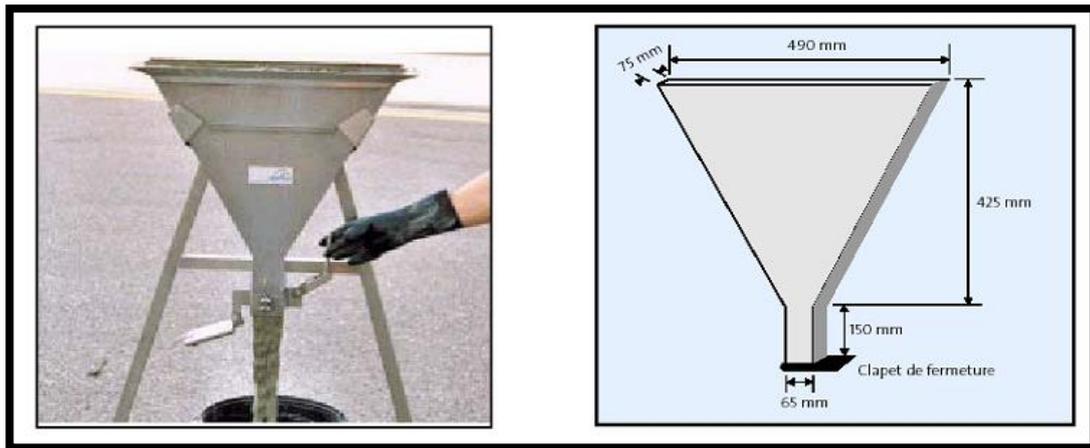


Figure 5.6: entonnoir a mortier. [07]

### 5.2.2.6. Essai de boîte en U (NBN-EN 12350-1):

Les essais du tube en U, du caisson et de la passoire permettent aussi de caractériser la ségrégation dynamique et donnent un autre aspect de la capacité de remplissage des BAP (figure 16) [Sedran, 95].

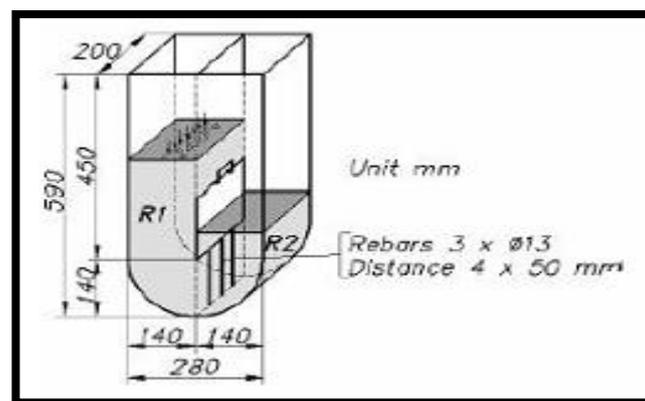


Figure 5.7: essai du tube en u. [04]

Le tableau 01 ci-après donne les valeurs préconisées pour l'obtention d'un BAP : [04]

Etalement	60 cm à 75 cm
$H_2/H_1$	$\geq 0,8$
Laitance	$\leq 15\%$
Ecoulement à l'entonnoir	9 à 25 secondes
$T_{500}$	$> 2$ secondes
Etalement modifié	visuel

Tableau 5.1 : les valeurs préconisées pour l'obtention d'un BAP

### 5.2.3. Mise en œuvre des BAP :

On peut résumer à trois les modes de mise en place des bétons autoplaçants dans des coffrages.

- Le premier consiste à déverser le béton par le haut du coffrage. Cette technique traditionnelle, commune aux bétons courants, a plusieurs inconvénients. Tout d'abord, elle augmente les phénomènes de ségrégation du béton dus à sa chute dans les coffrages. Ensuite, elle favorise la présence de bulles et de taches sur le parement et accentue le lessivage de l'agent de décoffrage utilisé. Il convient donc de réduire le plus possible la hauteur de chute pour améliorer la qualité d'aspect des parements.
- Le deuxième se fait par l'intermédiaire d'un tube plongeur introduit depuis le haut du coffrage. Cette méthode a pour avantage de limiter les effets de la chute du béton frais dans les coffrages et est utilisée pour les éléments verticaux de grande hauteur.
- Le troisième correspond à l'injection du béton par le bas de la banche à l'aide d'une pompe. Ce procédé évite la chute du béton, diminue la présence de bulles sur le parement et favorise l'auto-nivellement, mais nécessite une adaptation des banches et la présence d'une pompe (ce qui libère en contrepartie la grue).

Quelle que soit la méthode de mise en œuvre choisie parmi ces trois, la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages doit être réduite pour éviter la ségrégation dynamique du béton. Il est recommandé de limiter cette longueur à un maximum de 10 m (TC SCC RILEM).

Quant à la pression exercée par les BAP sur les coffrages, les données de la littérature en 2001 semblaient se contredire. Dans un souci de sécurité, la poussée du béton frais en pied de coffrage était prise égale à la pression hydrostatique. Depuis, les mesures réalisées sur le site de Guerville dans le cadre du Projet National BAP indiquent que la vitesse de remplissage du coffrage constitue un paramètre majeur dans l'intensité de la poussée sur les coffrages : une vitesse rapide amène à une poussée hydrostatique.

D'autre part, des précautions de mise en œuvre des BAP concernent l'étanchéité des coffrages dont il faut colmater les ouvertures vis-à-vis des pertes éventuelles de laitance (précautions identiques à celles pratiquées pour les bétons fluides classiques).

Enfin, les cures post-bétonnage des BAP sont essentielles pour limiter l'évaporation, étant donné la sensibilité de ces derniers au retrait plastique due à leur faible ressuage.

### 5.3. Propriété des bétons auto-plaçant à l'état durci :

Vu que la composition des bétons auto-plaçant est exceptionnel, il est important d'étudier les différentes propriétés mécaniques et module d'élasticité de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons ordinaires.

#### 5.3.1. Résistance mécanique :

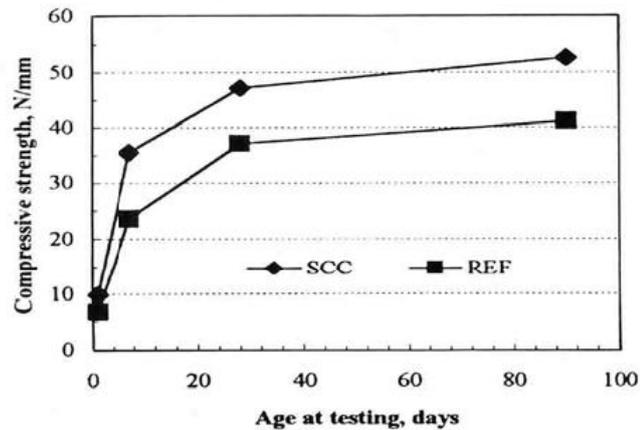
La formulation des BAP implique un rapport E/C bas, donc de nature à fournir de bonnes résistances mécaniques. Paultre et al [17] ont fait des tests comparant les bétons auto-plaçant aux 'traditionnels' BHP. Ils ont effectué des essais de compression (pour déterminer la résistance à la compression et le module d'élasticité) sur un BAP et un BHP à affaissement plus faible mais ayant une résistance mécanique égale. Les résistances en compression des BAP et des BHP sont comparables, par contre les modules d'élasticité sont moins élevés pour les BAP, comme on peut l'observer sur les résultats de ces essais, consignés dans le tableau suivant :

Nature du béton	BHP	BAP	BHP	BAP
Résistance visée (MPa)	60	60	80	80
Rapport E/L	0.5	0.42	0.35	0.37
R <sub>c28</sub> (MPa)	54.1	60	71.9	80.9
Module d'élasticité (GPa)	38	34.7	40.9	38.7

*Tableau 5.2 : Principales caractéristiques des bétons testés par Paultre et al [08]*

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [09,10]. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les super-plastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

Différentes données ont été publiées par Gibbs, Sonebi [18,19] sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparées à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes (voir Figure 5.8).



**Figure 5.8 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant**

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton.

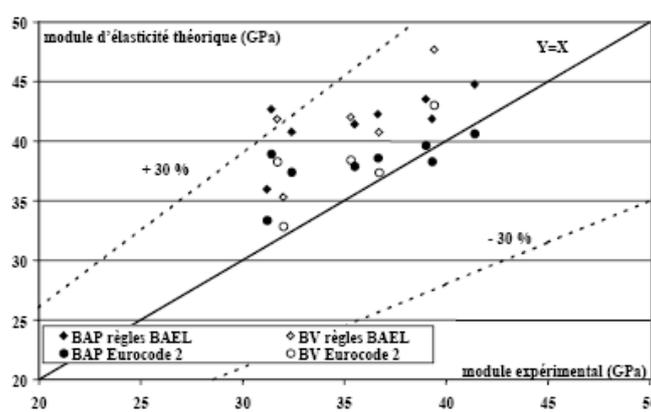
Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges par Felekoglu [20].

De même, certains super-plastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique [11]. Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

### 5.3.2. Module d'élasticité (en compression) :

Si on se réfère à la formule réglementaire du module ( $E_{ij} = 11000f_{CJ}^{1/3}$ ), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré.

Or, si ceci est vrai dans certains cas à la précision des mesures prises par Persson et Pons [12,13] (Figure 5.9), d'autres auteurs indiquent que les modules des BAP sont plus faibles que ceux des bétons vibrés [21].



**Figure 5.9 : Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [11]**

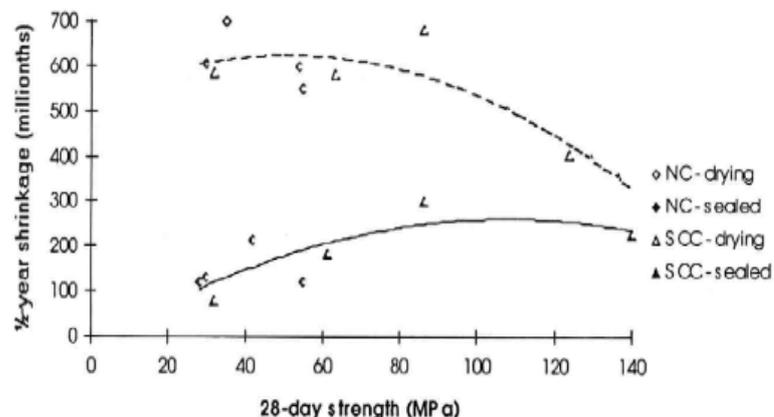
### 5.3.3. Retrait et Fluage :

#### 5.3.3.1. Retrait :

Nous distinguons deux types essentiels de retrait : retrait endogène et retrait de dessiccation ou de séchage.

- **Retrait endogène** : en utilisant plusieurs composition de béton autoplaçant et une composition traditionnelle, Hu et al [21] ont conclu que le retrait endogène des bétons autoplaçants était inférieur ou égal (les valeurs s'échelonnent entre 50 et 200  $\mu\text{m}/\text{m}$ ) que celui des bétons vibrés.

Persson [13] montre aussi que les BAP sont sujets à des déformations libres (retraits endogène et de dessiccation) équivalentes à celles des bétons vibrés pour un grand domaine de résistance (Figure 5.10).



**Figure 5.10 : Retraits endogènes et de dessiccation (à 180 jours) de divers bétons vibrés (NC)**

- **Retrait de séchage** : est lié au séchage du matériau à partir de sa surface extérieure. L'eau contenue dans les pores de la pâte de ciment (et retenue par des forces capillaires d'autant plus grandes que la dimension de ceux-ci diminue) s'évapore vers le milieu ambiant, dont l'humidité relative est moindre, et crée une dépression qui contracte l'élément en béton.

Ogawa et al [15], Rol et al [16] constatent que le retrait de séchage des bétons autoplaçant est supérieur à celui des bétons ordinaires et ceci parce que la quantité de fines qu'ils contiennent est plus importante. Rol et al [16] évalue à 50 % l'augmentation du retrait de dessiccation d'un BAP par rapport à une formulation ordinaire. Quant à Tanaka [22], il ne remarque pas de différence notable (environ 450  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour la formulation traditionnelle et la composition autoplaçante).

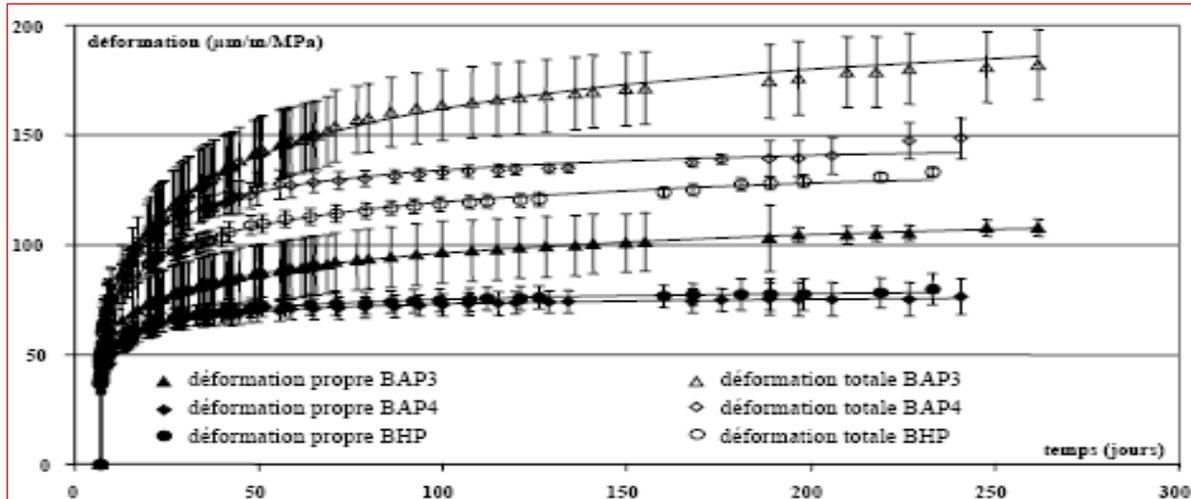
Hayakawa et al [23] ont observé un retrait de séchage plus faible (environ 200  $\mu\text{m}/\text{m}$  de moins à 3 mois). Kuroiwa et al trouvent que les BAP sont plus sensibles aux problèmes de cure et qu'à des conditions de cure identiques, le retrait de dessiccation des BAP était plus faible que celui des bétons ordinaires.

Par ailleurs des chercheurs japonais ont comparé les retraits de dessiccation des bétons traditionnels et des bétons autoplaçants de même rapport E/C avec et sans ajout d'urée. Les bétons autoplaçants renferment du filler calcaire à l'inverse des bétons traditionnels. Ces auteurs montrent que les retraits de dessiccation des BAP sont du même ordre de grandeur que les bétons traditionnels après des temps de séchage de 51 et 300 jours d'après K.Sakata [24].

#### 5.3.3.2. Le fluage :

Pons Gérard et Proust Erwan [24], font la part de déformation d'une éprouvette due à un chargement. Ils distinguent deux types de fluage : le fluage propre et le fluage de dessiccation. Le fluage propre s'effectue sans échange hydrique avec l'extérieur (éprouvette protégée par une feuille d'aluminium autocollante).

Les comportements des bétons autoplaçants peuvent différer d'une formulation à une autre (voir figure 5.11). Globalement, les BAP subissent des déformations sous charge équivalente ou légèrement supérieure à celles des bétons vibrés correspondants. Les vitesses de développement des déformations diffèrent peu d'un type de béton à l'autre. Ainsi, l'augmentation des déformations différées attendue en raison du volume de pâte plus important, ne semble pas avérée. D'après ces données, quel que soit le mode de conservation, les BAP possèdent des comportements différés sous charges semblables à ceux des bétons vibrés, d'après Proust [25].



*Figure 5.11: Déformations sous charge unitaire pour des bétons de résistance supérieure à 40 MPa [25]*

## 5.4. L'influence des compositions sur les propriétés du BAP :

### 5.4.1. Influence du dosage en gros granulats :

La quantité de gros granulats a une forte influence sur la capacité du béton à passer au travers des armatures [26,27]. Moins il y a de gros granulats, plus la capacité de remplissage est élevée. Toutefois, les gravillons augmentent la compacité granulaire du squelette ce qui permet de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir les caractéristiques rhéologiques et mécaniques souhaitées [28]. Il s'agit donc de trouver un compromis lors de la formulation du matériau.

La quantité de granulats doit être réduite pour limiter les risques de blocage. De ce fait, la quantité de matériau suspendant est augmentée. Mais la quantité de sable contenue dans le mortier ne doit pas être trop importante puisque cela augmente la résistance à l'écoulement et la viscosité. Par ailleurs, la viscosité doit être relativement faible pour que le BAP s'écoule avec un débit important. Mais nous avons vu qu'elle doit être suffisante pour résister au cisaillement généré par le déplacement des granulats lors de l'écoulement. L'intérêt d'utiliser une quantité de fines élevée apparaît donc de nouveau puisque la viscosité du matériau peut être augmentée (en augmentant la fraction volumique du fluide) tout en limitant le volume de sable.

Dans le cas des BAP, le diamètre maximal des granulats est limité (de l'ordre de 16 à 20 mm). L'étendue granulaire reste malgré cela relativement importante. Il est donc nécessaire de comprendre l'influence des différentes fractions granulaires les unes par rapport aux autres. Certains auteurs se sont notamment intéressés à l'influence de la distribution granulaire sur la ségrégation.

### **5.4.2. Influence des additions minérales :**

Les différentes additions minérales suivant: cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice et filler calcaire, Ces additions peuvent avoir une influence chimique et/ou un rôle physique selon leur nature.

#### **5.4.2.1. Filler calcaire :**

Zhu et Gibbs [29], ont étudié l'influence de différent type de filler calcaire. Dans le cas des pâtes de ciment, le type de filler utilisé ne semble pas avoir d'influence sur l'étalement et ce pour deux superplastifiants différents. En revanche, leur étude sur bétons montre que le type de filler a une forte influence sur la demande en superplastifiant (choisit dans leur étude) pour obtenir un étalement donné. Les fillers à base de craie nécessitent plus d'adjuvant que les fillers calcaires et ceci sont particulièrement remarquable dans le cas où le niveau de remplacement est important. Les causes possibles de différences entre les comportements des fillers sont la présence d'impuretés, les différences entre les compacités et les possibles différences d'adsorption entre les matériaux. Malgré cela, quel que soit le type de filler utilisé, leurs résultats montrent que plus il y a de filler en remplacement du ciment, moins il faut de superplastifiant pour atteindre un étalement donné.

#### **5.4.2.2. Les cendres volantes :**

Le remplacement d'une partie du ciment par des cendres volantes à une influence faible sur le seuil et la viscosité des pâtes de ciment [30]. Certains auteurs remarquent cependant que leur utilisation peut améliorer la fluidité, car leur forme sphérique permet de réduire les frottements entre les grains de ciment. Ferraris et al. [31] montrent par ailleurs que le diamètre moyen des cendres volantes a une légère influence sur la valeur du seuil d'écoulement, les mélanges les plus fluides étant obtenus avec les particules les plus fines (diamètre moyen 3,1  $\mu\text{m}$ ). Associées à un superplastifiant, les cendres volantes permettent de réduire le dosage en adjuvant nécessaire à l'obtention d'une certaine fluidité (seuil de l'ordre de 20 Pa), mais le rapport E/C doit être suffisamment important (équivalent au rapport utilisé pour l'échantillon témoin) sinon la demande en adjuvant augmente fortement.

#### **5.4.2.3. Fumées de silice :**

L'influence des fumées de silice doit être clarifiée. Pour certains auteurs [30,32], elles augmentent les valeurs de seuil et de viscosité en augmentant la compacité des mélanges, alors que pour Carlswald, par exemple; les fumées de silices ne modifient pas la viscosité. Par

rapport à la rhéologie d'un mélange de référence, Ferraris et al. [33] montrent que l'utilisation de fumée de silice augmente la demande en eau et en super-plastifiant que ce soit pour des pâtes de ciment ou pour des bétons.

#### 5.4.2.4. Laitier de haut fourneau :

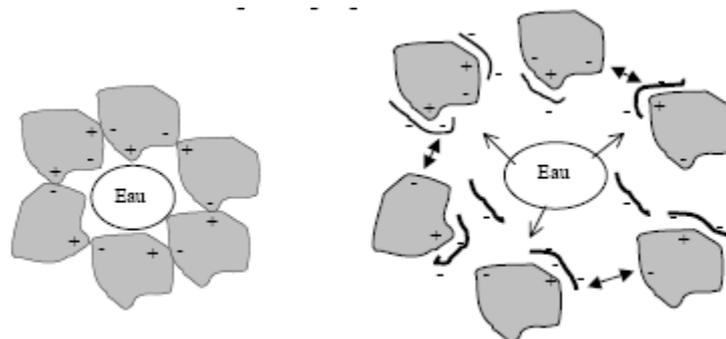
Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil et la viscosité des pâtes de ciment [30]. Shi et al. [32] montrent par exemple que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le superplastifiant. Il est donc possible que la demande en superplastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou valeur de seuil.

#### 5.4.3. Influence des adjuvants :

Les adjuvants les plus utilisés dans les compositions de béton autoplaçant sont les super-plastifiants et les agents de viscosité.

##### 5.4.3.1. Influence de superplastifiant :

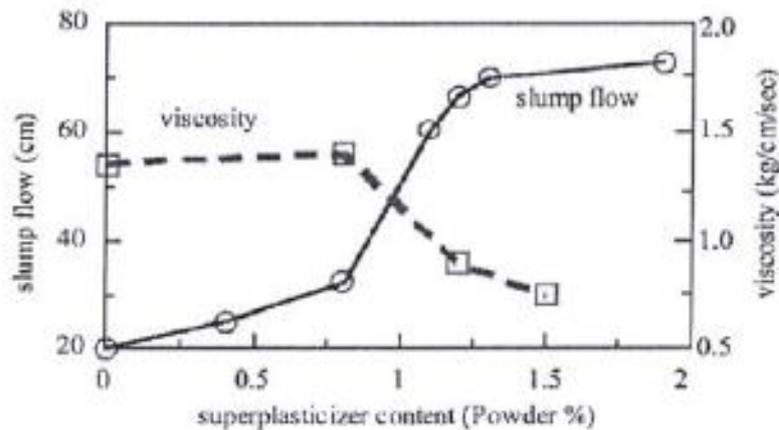
L'apparition des bétons autoplaçant et des bétons Hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des super-plastifiants (SP) [34]. Les super-plastifiants permettent en effet de défloculer les grains de ciment. Ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau initialement piégée entre les floccs est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange (Figure 5.12). Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons à faible rapport E/C, faciles à mettre en place [35].



*Figure 5.12: Action des super-plastifiants - Défloculation des grains de ciment.*

L'ajout d'un super-plastifiant permet ainsi d'augmenter significativement la fluidité des BAP que ce soit du point de vue de leur étalement ou du point de vue de leur seuil d'écoulement.

La Figure 5.13 montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en super-plastifiant [35].



**Figure 5.13: Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [35]**

D'après Jolicoeur et Simard [36], les interactions ciment et superplastifiant peuvent être vues comme une réaction entre deux systèmes chimiques polyphasiques. En effet, les superplastifiants interfèrent avec les interactions entre grains de ciment mais aussi avec le processus d'hydratation. Non seulement, ils peuvent réagir avec le ciment par adsorption sur les charges négatives mais ils peuvent également réagir avec les hydrates.

Flatt et Houst [37], décomposent l'action d'un superplastifiant lorsqu'il est introduit dans un mélange selon 3 mécanismes :

- ✓ une partie est adsorbée,
- ✓ une partie est consommée par les réactions avec les hydrates,
- ✓ une partie, en excès, reste en solution.

Ces auteurs [37] montrent qu'une couche de gel ou de monosulfo-aluminate peut se former autour du ciment ce qui augmente la surface que doit recouvrir le super-plastifiant pour disperser les grains. Donc plus le ciment est réactif plus la quantité de polymère à ajouter sera importante.

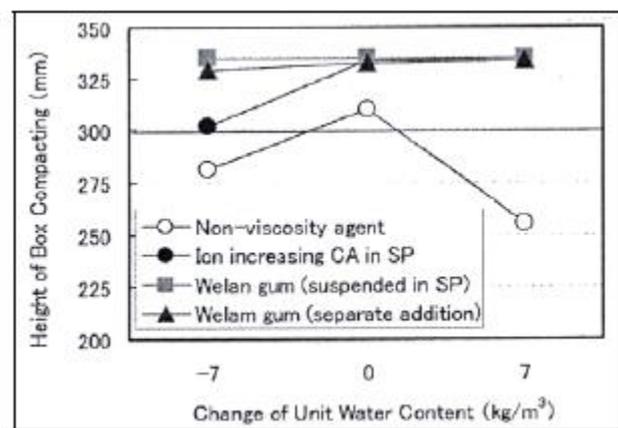
Différents auteurs [34] ont montré que le moment d'introduction du Super-plastifiant lors du malaxage joue un rôle sur le dosage à saturation. Si l'introduction est retardée, le dosage à saturation est plus faible, il est obtenu pour une plus faible quantité de super-plastifiant. Ceci

est en accord avec ce que nous avons vu, car si l'hydratation du ciment est amorcée alors la consommation du super-plastifiant par les hydrates sera moins importante. Ainsi, le fait de retarder son introduction, permet au super-plastifiant d'être plus efficace et d'obtenir des mélanges plus fluides que s'il avait été introduit en début de malaxage.

Les différentes études présentées jusqu'ici traitaient de la relation super-plastifiant et ciment. Or un article de Nakamura et Ogawa [38] et le principe de la méthode des coulis de l'AFREM montrent que le superplastifiant peut également interagir avec le sable. L'adsorption du superplastifiant sur le sable dépendrait de type de matériau utilisé et se produirait principalement sur les particules fines du sable. L'ordre d'introduction des matériaux lors du malaxage a une importance. Si le ciment est introduit après malaxage du sable et du superplastifiant, la fluidité du mélange est plus faible que lorsque sable et ciment sont introduits au même moment. Naoki et al, d'après [39], auraient également remarqué que plus le volume de sable d'un mortier était élevé plus la quantité de superplastifiant nécessaire pour obtenir un étalement donné augmentait.

#### 5.4.3.2. Influence de l'agent de viscosité :

L'utilisation d'agent de viscosité permet d'obtenir des bétons autoplaçants moins sensibles aux variations de teneur en eau, comme le montre la Figure 5.14 [40].

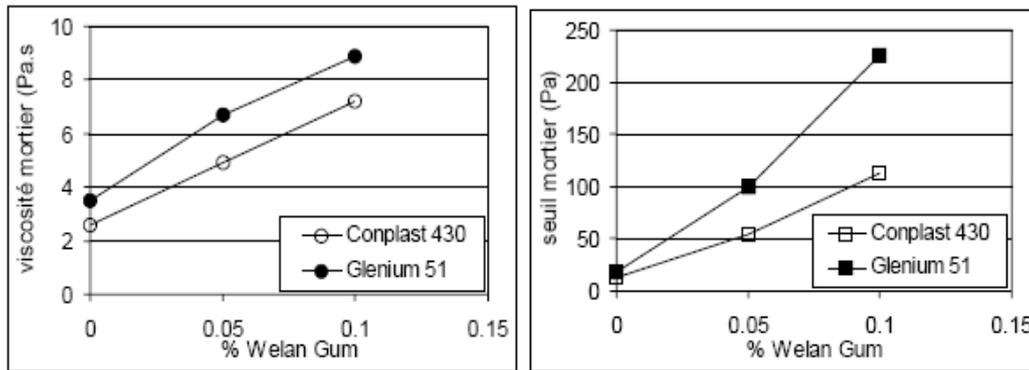


**Figure 5.14: Influence d'un agent viscosant sur la robustesse (variation du dosage en eau) essai de boîte U [40]**

L'utilisation d'un agent viscosant aurait pu être intéressante dans le cas d'une étude présentée par Aarre et Domone [41]. Il s'agissait d'évaluer différentes méthodes d'essais dans le cadre du projet européen « Testing SCC ». Les différents partenaires de l'étude utilisaient les mêmes matériaux dans les mêmes proportions. Malgré cela, les différents étalements

obtenus présentaient de grandes variations. La cause d'une telle dispersion proviendrait de la quantité d'eau apportée par les granulats. Certains laboratoires utilisaient des granulats secs et d'autres des granulats humides.

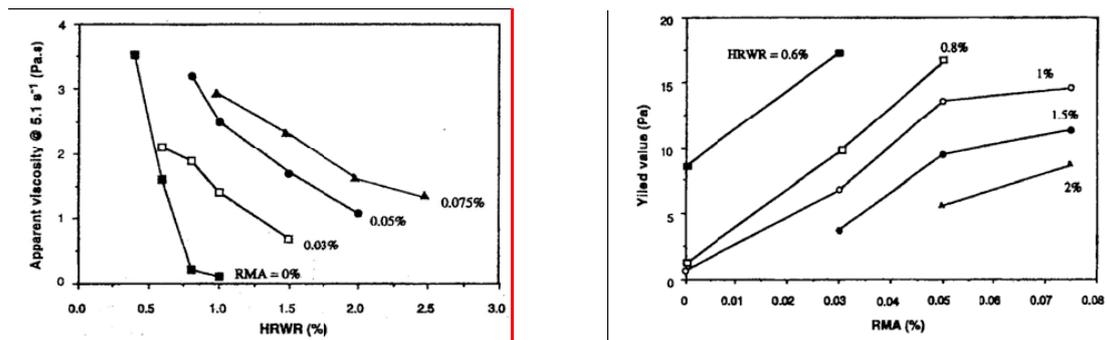
L'incorporation d'agent viscosant permet d'augmenter la valeur du seuil et la viscosité apparente et ce quels que soient le rapport eau sur ciment, le type et la quantité de superplastifiant contenu dans la pâte (Figure 5.15).



**Figure 5.15 : Evolution du seuil d'écoulement et de la viscosité d'un mortier en fonction du type et du dosage en agent viscosant repris d'après [73].**

Cependant, l'utilisation d'un agent viscosant peut modifier l'action du superplastifiant.

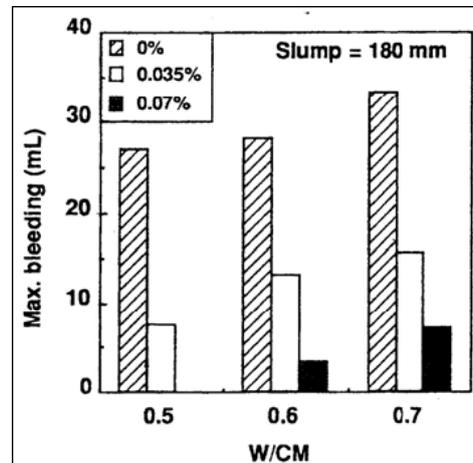
En générale, pour obtenir une certaine fluidité, la demande en superplastifiant augmente avec l'augmentation du dosage en agent viscosant. La figure 5.16 présente l'évolution de la viscosité apparente et du seuil d'écoulement en fonction des dosages en agent viscosant et en super-plastifiant.



**Figure 5.16 : Variation de la viscosité apparente (a) et du seuil d'écoulement (b) en fonction du dosage en super-plastifiant et en agent viscosant [42].**

On suppose généralement que la ségrégation statique s'opère dans une matrice cimentaire stable, i.e. seuls les plus gros granulats peuvent ségréger. Cependant, la matrice peut également être sujette à des instabilités telles que le ressuage du fait de sa fluidité.

L'utilisation d'agent viscosant permet d'améliorer la capacité du béton à résister au ressuage comme présenté sur la figure 5.17.



**Figure 5.17 : Influence de la teneur en agent viscosant et du rapport eau/ciment vis-à-vis du ressuage d'un béton [42]**

D'après l'AFGC [04], l'utilisation des agents viscosants se justifie dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne seraient pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton.

### 5.5. Application du BAP :

Les bétons auto-plaçant sont utilisés dans plusieurs domaines, le Tableau 5.2 ci dessous donne les différentes publications durant plusieurs années (comme fin de projet).

Ce tableau illustre les pays qui ont utilisé ce béton dans différents éléments voire différents projets (poteaux, tunnel, bâtiment...).

En outre, ce tableau contient : le volume de béton coulé, que ce soit préfabriqué ou in situ, ainsi une idée sur la composition du béton autoplaçant (le volume et la taille des granulats, le volume de la pâte, quantité et type de la composition des poudres et le rapport E/L), et les essais réalisés sur ce béton.

Application	date	pays	Volume	placement	granulats		poudre		W/E
			m <sup>3</sup>		taille Max	Vol %	composition	Kg/m <sup>3</sup>	
Voiles et poteaux de bâtiment En élévation	1993	japon	3900	In situ	20	32.1	Pbfc+pfa	500	0.34
tours de pont	1993	japon	1000	In situ	20	34.2	Pbfc+pfa	500	0.34
Poteaux dans bâtiment haute élévation	1993	Japon	885	In situ	20	34.9	Pbfc+pfa	500	0.34
Mur de structure	1993	Japon	80	In situ	20	30.6	Pbfc+pfa	500	0.34
Blocs d'ancrage de Pont en suspension	1994	Japon	4000	In situ	40	42.3	Pbfc+pfa+Isp	410	0.34
Chapeaux de pilier de pont	1996	Japon	1000	In situ	20	31.2	Pbfc	470	0.35
Chapeaux de pilier de pont	1996	Japon	1000	In situ	20	37.5	Pbfc+ pfa	472	0.35
Reconstruction de jetée	1997	Japon	1190	In situ	20	31.0	Pc+ggbs+gyp	448	0.40
Piliers des viaducs	1996	France	50	In situ	20	32.9	Pc+csf	473	0.38
Mur de soubassement	1998	Canada	4	In situ	25	32.5	Pc+pfa+csf	466	0.45
Réparation au mur de parking	1998	Canada	3	In situ	14	29.6	Pc+pfa+csf	532	0.41
Poutres et Poteaux du logement	1999	U.K	7.5	In situ	20	28.3	Pc+isp	525	0.38
Blocs d'ancrage de Pont de suspension	1999	Japon	13000	In situ	20	33.2	Pc+isp	470	0.35
Mur et dalle de pont	1999	Suède	460	In situ	16	29.5	Pc+isp	595	0.28
Mur et dalle de pont	1999	Suède	230	In situ	16	31.0	Pc+isp	526	0.31
Tunnel	1999	Suisse	73000	In situ	16	29.5	Pc+pfa	434	0.48
Barrage	1999	Japon		In situ	20	32.9	Pc	533	0.30
Eléments de tunnel en bétons	1999	Japon	7200	préfabriqué	20	31.0	Pc+ggbs	554	0.32

armés									
Eléments d'anneau de tunnel	1999	Suisse	0.9chacun	préfabriqué	16	30.1	CEM II	480	0.36
Elément préfabriqué d'une construction	1999	Japon	10000	préfabriqué	20	30.3	Pc+ggbs	607	0.29
Usine de purification d'eau	1999	Japon	200000	In situ	20	31.0	Pc+isp	501	0.33
Poteaux cylindriques	2000	UK	400	In situ	20	30.0	Pc+pfa	550	0.35
Mur de diaphragme sous-marin	2000	Japon	11200	In situ	20	31.8	Pc+pfa+ggbs	500	0.32
Mur de diaphragme souterrain	2001	Corée	32800	In situ	20	29.9	Pbfc+isp	438	0.41
Mur d'un réservoir de stockage	2001	Japon	6600	In situ	20	30.6	Pc+isp	529	0.30
Elément de pont	2001	Allemagne	14	préfabriqué	20	29.4	CEM II/A-L+pfa	570	0.29
Mur de quai	2001	Suède	3200	préfabriqué		29.8	Pc+isp	538	0.33
Réparation de mur	2002	Canada	100	In situ	10	29.7	Pc+csf	480	0.37
Poteaux dans bâtiment haute élévation	2002	Argentine		In situ	19		Pc+ggbs	500	0.34
Poteaux de construction	2002	Canada	2100	In situ	10	34.0	Pc+ggbs	450	0.42
Elément de construction préfabriqué	2002	U.S.A		préfabriqué		35.8	Pc+pfa	474	0.35
Mur architectural	2002	Italie		In situ	16	31.3	CEM II+isp	500	0.36
Béton de structure	2002	Italie		In situ	22	34.5	CEM I+csf	530	0.33
Béton	2002	Italie		In situ	22	31.1	CEM III+pfa	435	0.41
Poutre de pont	2003	Japon		préfabriqué	20	28.1		575	0.30

**Tableau 5.3** : Les applications des bétons autoplaçants des les pays [62]

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE 5**

[01] **HAYAKAWA; MASTUOKA; SHINDOH** (1993), “ Development and application of superworkable concrete”, RILEM workshop special concrete: workability and mixing; P.Bartos Ed; p25-51.

[02] **Stéphan ASSIÉ**, « durabilité des bétons autoplaçants », thèse doctorat l’institut national des sciences appliquées de Toulouse.

[03] **KLUG Y. and HOLSCHEMACHER K.**, “Material properties of hardened self-compacting concrete”, ICPCM – A new era of building, Le Caire, Egypte, 18-20 février 2003.

[04] **Association Française de Génie Civil (AFGC)**, «Béton Auto-Plaçants », Recommandations provisoires, juin2000, Annales du bâtiment et des travaux publiques.

[05] **NISHIBAYASHI S., INOUE S., YOSHINO A., KARUDA T., KUME T.** (1994),« A study on the flow of superplasticized concrete », Proc. Ffourth CANMET/ACI Int. Conf. On superplasticizers and other admixtures in concrete, Montréal-Canada, oct, p177-187.

[06] **A. Loukili and Ph. Turcry.** “Effect of a viscosity agent on mechanical properties of self compacting concrete”, In Proceedings of the Conference ICPCM A new era of building, 18-20 février 2003, 2003.

[07] **Hajime Okamura** (Professor, Kochi University of Technology, Japan) and **Masahiro Ouchi** (Associate Professor, Kochi University of Technology, Japan), “Self-Compacting Concrete” ,Received 14 November 2002, accepted 30 March 2003, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, No. 1, pp 5-15, April 2003 / Copyright © 2003 Japan Concrete Institute. E-mail: ouchi.masahiro@kochi-tech.ac.jp

[08] **HAYAKAWA; MASTUOKA; SHINDOH** (1993), “ Development and application of superworkable concrete”, RILEM workshop special concrete: workability and mixing; P.Bartos Ed; p25-51.

[09] **LARRARD F.**, “Concrete mixture-proportioning - A scientific approach ”, Modern Concrete Technology Series, N°9, E&FN SPON, 1999.

[10] **PERA J., HUSSON S. and GUILHOT B.**, “Influence of finely ground limestone on cement hydration”, Cement and Concrete Composites, pp. 99-105, 1999.

[11] **SHI C., WU Y., SHAO Y. and RIEFLER M.**, “Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete”, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, pp. 349-354, 12-13 novembre 2002.

[12] **PONS G., PROUST E. and ASSIE S.**, “Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete”, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 645-645, 17-20 août 2003.

[13] **PERSSON B.**, “A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete”, Cement and Concrete Research, 31, pp.193-198, 2000.

[14] **HU C. ; BARBBIERI B.** (1998), « Comparaison des retraits des BAN et d’un béton fluide traditionnel », Sciences des matériaux et propriétés des bétons, 1ère rencontre internationale, p 265- 272.

[15] **OGAWA ; SAKATA ; TANAKA** (1995), « A study on reducing shrinkage of high flowable concrete », second international symposium of CANMET/ACI, Las Vegas, p 55-72.

[16] **ROL S. ; AMBROISE J. ; PERA J.** (1997), « Development of an admixtures for self-leveling concrete », 5th CANMET/ACI, Int. Cof. on superplasticizer and other chemical admixture in concrete, sp 173, Rome, Oct., p 493-509.

[17] **PAUTRE, KHAYAT, LANGLOIS, TRUDEL, CUSSON** (1999), « Structural performance of some special concrete », Ffourth international symposium on the utilization of high strength/high performance concrete, Paris, mai, p 787-796.

[18] **SONEBI M. and BARTOS P.J.M.**, “Hardened SCC and its bond with reinforcement”, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 275-289, 13-15 septembre 1999.

[19] **GIBBS J.C. and ZHU W.**, “Strength of hardened self-compacting concrete” Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 199-209, 13-15 septembre 1999.

[20] **FELEKOGLU B., YARDIMCI M. Y. and BARADAN B.**, “A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete”, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 446-456, 17-20 août 2003.

- [21] **HU C. ; BARBBIERI B.** (1998), « Comparaison des retraits des BAN et d'un béton fluide traditionnel », Sciences des matériaux et propriétés des bétons, 1ère rencontre internationale, p 265- 272.
- [22] **TANAKA K.; SATO K.; WATANABE S.; ARIMA I.; SUENAGA K.** (1993), “Development and utilization of high performance concrete for the construction of the akashi kaikyo bridge”, Int. Symposium on high performance concrete in science environments, SP 140, ACI, Detroit, p 25-51.
- [23] **K. SAKATA**, « Durability of self compacting concrete and low heat high performance concrete », CONSEC 98, International conference. Pp 2057- 2064- Tronso C.B- 1998.
- [24] **PONS GERARD et PROUST ERWAN**, « Etude du comportement différé des bétons autoplaçants : Retrait et Fluage », Rapport Final- juillet 2000, Institut National des Sciences Appliquées (INSA), pp 1- 44.
- [25] **PROUST E.**, « Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés », thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2002.
- [26] **Carlsward et al.**, “Effect of constituents on the workability and rheology of selfcompacting Concrete”, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 143-153.
- [27] **Yahia et al.**, “Effect of rheological parameters on self compactability of concrete containing various mineral admixtures”, 1999, Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, Stockholm, pp 523-536.
- [28] **de Larrard**, « Structures granulaires et formulation des bétons », Etudes et Recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA 34.
- [29] **Zhu et Gibbs**, Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, Cement and concrete research, 2005, vol 35, pp1457-1462.
- [30] **Park, Noh, Park**, “Rheological properties of cementitious materials containing mineral Admixtures”, Cement and concrete research, 2005, vol 35, pp 842-849.
- [31] **Ferraris, Obla et Hill**, “Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete”, Cement and concrete research, 2001, vol 31, pp245-255.
- [32] **Shi and al.**, “A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste”, Transactions of the Japan Concrete Institute, 1998, vol 20, pp 9-14.

- [33] **Carlsward et al.**, “Effect of constituents on the workability and rheology of selfcompacting Concrete”, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 143-153.
- [34] **Bury, Christensen**, “The role of innovative chemical admixtures in producing selfconsolidating concrete”, Proceedings of the first North American conference on the design and use of self-consolidating concrete, 12-13 Novembre 2002, Chicago, pp 141-146.
- [35] **Shindoh et Matsuoka**, “Development of combinaison type Self-Compacting Concrete and Evaluation Test Methods”, Journal of Advanced Concrete technology, 2003, vol 1, n°1, pp 26-36.
- [36] **Jolicoeur et Simard**, « Chemical admixture-Cement interactions: Phenomenology and physico-chemical concepts », Cement and Concrete Research, 1998, vol 20, pp 87-101.
- [37] **Flatt et Houst**, “A simplified view on chemical effects perturbing the action of Superplasticizer”, Cement and Concrete Research, 2001, vol 31, pp 1169-1176.
- [38] **Nakamura, Ogawa**, “Influence of interaction between sand and superplasticizer on the fluidity of concrete”, Transactions of the Japan Concrete Institute, 1999, vol 21, pp 15-20.
- [39] **Jin**, “Properties of mortar for self-compacting concrete”, PhD thesis de l’Université de Londres, 2002, 398 pages.
- [40] **Sakata et al.**, “Study on new viscosity agent for combination use type of self-compacting Concrete”, Journal of advanced concrete technology, 2003, vol 1, n°1, pp 37-41.
- [41] **Aarre et Domone**, Reference concretes for evaluation of test methods for SCC, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 495-505.
- [42] **Khayat et Yahia**, “Effect of Welan Gum – High Range Water Reducer Combinations on Rheology of Cement Grout », 1997, ACI Materials Journal, vol 94 n°5, Septembre- Octobre.

CHAPITRE 6  
GENERALITE SUR  
LE BETON DE FIBRES

## GENERALITE SUR LE BETON DE FIBRES

---

### 6.1- Introduction

Depuis que le matériau béton existe, les ingénieurs ont toujours cherché à améliorer ses performances et combattre ses défauts. Le principal est sans doute sa fissurabilité et par voie de conséquence sa résistance en traction. En tant que matériau, il est lui-même source d'amorces de rupture. L'ajout d'éléments fibreux dans une matrice afin d'en modifier les propriétés physiques n'est nullement une technique nouvelle. Depuis longtemps on a songé à renforcer les matériaux de construction à l'aide de fibres afin d'accroître leur résistance mécanique et d'améliorer leur stabilité.

L'intérêt porté actuellement au béton armé de fibres ressort du très grand nombre d'articles et de rapports publiés sur le sujet, [1].

### 6.2- Définition

Le principe du béton armé consiste à disposer des armatures d'acier aux endroits, et dans les directions où des contraintes de traction sont susceptibles d'apparaître. Il en résulte un matériau hétérogène, à peu près obligatoirement conçu et réalisé « sur mesure », chaque pièce étant ferrillée en fonction des efforts qu'elle aura à subir dans la structure dont elle fait partie.

La technique du béton de fibres consiste au contraire à disposer au malaxage, en vrac, une certaine proportion de fibres formées d'une matière résistante à la traction, de façon à obtenir un matériau isotrope, et doué lui-même d'une certaine résistance. Le principe d'un tel matériau est d'ailleurs fort ancien, puisqu'on le retrouve dans le pisé, mélange de paille et d'argile, pendant des siècles, la plupart des habitations ont été construites. La même idée se retrouve également dans l'amiante-ciment, mélange d'une pâte pure de ciment avec des fibres d'amiante, dont la résistance à la traction est de l'ordre de 5 MPa, [2].

De nombreuses recherches ont pour thème le béton de fibres, et nous nous proposons de faire le point de cette technique, et de ses perspectives.

### **6.3- Nature et propriétés des fibres**

Des fibres de toute nature ont été expérimentées. Les plus répandues sont : l'acier, le verre, et certaines matières plastiques, nylon et polypropylène. Les qualités à attendre des fibres sont : la compatibilité chimique avec la pâte de ciment, et les caractéristiques mécaniques, du point de vue chimique, l'acier et les matières plastiques conviennent, mais le verre est attaqué par les alcalis contenus dans le ciment ; il faut donc employer, soit un ciment peu d'alcalis, soit un mélange de ciment et de cendre volantes, celles-ci fixant les alcalis, soit des verres spéciaux, soit enfin des fibres de verre ordinaire enrobées de résine.

Les fibres sont formées soit d'un seul fil (cas de l'acier par exemple), soit de plusieurs filaments. Dans le cas d'un seul fil, le diamètre varie de 0,15 à 1mm, et la longueur de 10 à 100 mm. Celle-ci est commandée par l'adhérence du matériau au béton, qui doit être suffisante pour que la mise en traction de l'armature puisse s'effectuer. Le dosage des fibres dans le béton est variable suivent les expérimentateurs ; il est en général de 1 à 3% en volume, [7]. On trouve dans la nature beaucoup de fibres d'origine animal, végétale ou minérale. Les fibres artificielles, organique ou minérales sont encore plus nombreuses.

#### **1. Fibre de carbone**

Elles présentent des propriétés très intéressantes (résistance et rigidité très importante) et sont chimiquement inertes, c'est-à-dire non attaquées par certains agents agressifs du ciment. Cependant leur prix très élevé. Pour les applications courantes. Leur principal inconvénient est leur fragilité. A tel point qu'il semble impossible de les mélanger avec le béton dans un malaxeur.

#### **2. fibres de verre**

Elles présentent des liaisons assez fortes avec la matrice (liaisons mécaniques et chimiques).. Malheureusement les caractéristiques mécaniques du béton armé de fibres de verre, diminuent rapidement avec temps et ce à cause de l'action corrosive des alcalins contenus dans le ciment sur les fibres (problème de durabilité).

#### **3. fibres polymère :**

Le module de YOUNG de ces fibres est du même ordre de grandeur que celui de béton, ce qui limite inévitablement le rôle de reprise des efforts au travers des fissures qu'elles devraient jouer. L'adhérence fibre béton est faible, du fait qu'il n'y a aucune liaison chimique possible entre les fibres et la matrice. Ces fibres résistent bien aux acides, sels et alcalins du béton, [3].

#### 4. Fibres d'acier :

Elles sont les plus utilisées dans la fabrication des matériaux composites à matrice cimenteuse et c'est avec ce type de fibres que les recherches les plus importantes ont été entreprises jusqu'à présent. Elles se caractérisent par :

- une résistance à la traction élevée
- un module d'élasticité élevée
- une bonne résistance au feu

On distingue les fibres BERKAERT, les fibres EUROSTEEL, les fibres HAREX et les fibres de pont à Mousson.

##### - Les fibres BEKAERT (DRAMIX)

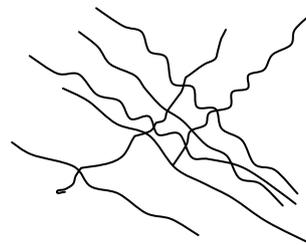
Ce sont des fibres droites à crochets, livrées sous forme de petits paquets accolés ce qui entraîne ou facilite considérablement leur incorporation dans le béton et le malaxage. Elles sont fabriquées en acier étiré à froid ayant une résistance à la traction minimale de 1100 MPa, une masse volumique de  $7,85 \text{ T/m}^3$ , un diamètre de  $\phi = 0,5 \text{ mm}$  et une longueur de  $l=30 \text{ mm}$  (figure 1), [4].



**Figure 6.1 : Fibres BEKERT**

##### - les fibres EUROSTEEL :

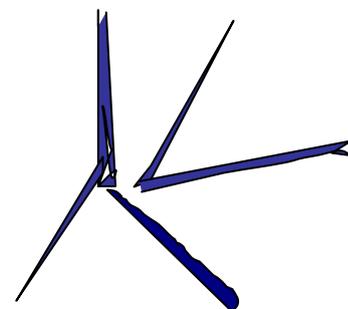
Ce sont des fibres ondulées en acier à haute résistance, tréfilées, dures à teneur en carbone inférieure à 0,15 %. La contrainte limite de rupture en traction est 1400 MPa (figure 6.2) [5].



**Figure II.2 : Fibres EUROSTEEL.**

##### - les fibres HAREX :

Elles sont obtenues par fraisage. Les copeaux produits légèrement enroulés sur eux-mêmes possèdent une résistance à la traction d'environ 700 MPa (figure 6.3), [5].



**Figure II.3 : Fibres HAREX**

- fibres pont à mousson :

Le centre de recherche de pont à mousson a étudié un procédé de fabrication de rubans métalliques à base de fonte. L'idée de base consiste à utiliser la fonte préfabriquée, et la modifier pour la rendre amorphisable afin d'obtenir un matériau à propriétés mécaniques et chimiques intéressantes, soit :

- une augmentation de la résistance aux agents agressifs,
- une augmentation du degré d'inoxidabilité.
- une bonne adaptation au procédé de projection élevée. Celle-
- le tableau 1 présente quelques caractéristiques de certaines fibres, [6].

#### **6.4- Avantages et inconvénients des Béton de fibres**

Les améliorations suivantes des propriétés des béton de fibres sont considérées comme acquises, [7] :

- une résistance à l'impact plus élevée.
- Une augmentation de l'énergie de rupture.
- Une amélioration de la ductilité.
- Un comportement différent à la fissuration entraînant un retard de la fissuration franche.

Parmi les inconvénients, on peut citer :

- la réduction de la maniabilité quand le pourcentage de fibres est élevé.
- Un prix relativement élevé et de ce fait, le prix de revient du mètre cube du béton de fibre peut paraître excessif par rapport à celui du béton traditionnel.
- L'introduction d'un certain type de fibres dans le béton avec les moyens traditionnels se révèle très difficile.

#### **6.5- Fabrications et mise en œuvre des BFM**

Le béton mise en œuvre doit être homogène, et isotrope ; il faut donc obtenir une dispersion parfaite des fibres, en évitant la formation de boules de fibre. Ceci est assez facile dans le cas de matières synthétiques, mais, dans le cas de l'acier, il est nécessaire de prendre des précaution particulière : on peut, soit introduire les fibre en fin de malaxer d'abord le mélange gravillons – sable – fibres, et introduire ensuite le ciment et l'eau en laissant tourner le malaxeur. Quelle que soit la nature des fibres, le béton obtenu est raide, et difficile à mettre en place ; pour améliorer son ouvrabilité, il nécessaire d'augmenter la teneur en eau de diminuer la dimension des gros granulats. Ou d'utiliser un adjuvant plastifiant. De plus, la vibration

demande un soin particulier, car elle peut conduire à une ségrégation, ou à orientation des fibres, [7].

### 6.5.1- La maniabilité

Le renforcement par les fibres ne peut être efficace qu'à partir d'une quantité suffisante de fibres ajoutées à la matrice.

Cependant des concentrations trop importantes de fibres provoquent une réduction de la maniabilité du béton. L'une des causes de cette diminution de l'ouvrabilité liée à l'introduction des fibres semble être l'augmentation du volume des vides du fait de la forme des fibres et des granulats (mauvaise liaison entre ces deux constituants) ce qui se traduit par un degré de compacité plus faible que celui d'un béton normal, [8].

Il existe plusieurs procédés pour mesurer la maniabilité dont voici les plus courants :

- Essai VEBE
- Cône d'ABRAMS (slump Test).

#### ❖ Influence de la géométrie des fibres

Il est admis que pour une matrice donnée, la maniabilité d'un béton de fibres est d'autant plus faible que les fibres sont longues et fines. A cause de plus grande tendance à s'enchevêtrer.

SWAMY et MANGAT [9] ont mis en évidence une relation linéaire entre le temps d'écoulement (VEBE) et l'élancement des fibres d'acier. Selon ces auteurs la formation d'oursine se ferait pour des élancements supérieurs à 100. L'élancement est défini par le rapport  $l/d$  (Longueur/ diamètre).

#### ❖ Influence du dosage en fibres

Toutes les études qui ont été réalisées à ce jour sont arrivées à la même conclusion, c'est-à-dire que si dans un mélange la quantité de fibres augmente, on constate une diminution notable de la maniabilité, la composition de la matrice étant conservée, [9]. Cela peut s'expliquer par le fait qu'il existe pour des pourcentages élevés en fibres une sorte de verrouillage gravier-fibre qui empêche toute mobilité de la matrice (figure 6.4)

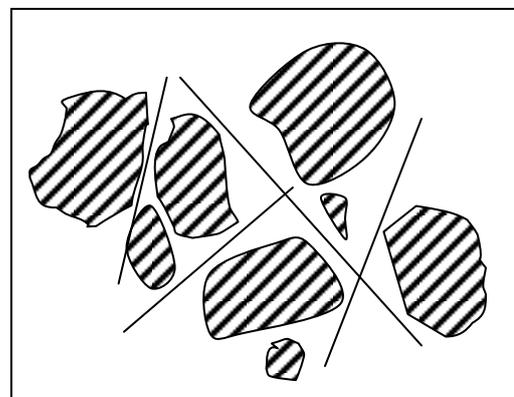


Figure 6.4 : verrouillage gravier-fibre

### 6.5.2- Méthodes de formulation des BFM

SERNAROS, [10] a proposé une méthode de composition des bétons de fibres basée sur la méthode de BARON-LESAGE, [11] qui s'applique aux bétons courants.

Il a été établi grâce à cette méthode un abaque qui permet, pour un dosage en ciment compris entre 300 et 500 kg/m<sup>3</sup>, un dosage en fibre, un module de finesse du béton traditionnel donné et une maniabilité souhaitée, d'aboutir à la granulométrie optimale du béton de fibre.

### 6.6- Propriétés des bétons de fibres

La résistance à la traction peut atteindre deux à trois celle béton non armé, et c'est là le principal avantage de l'emploi des fibres ; cette amélioration port aussi bien sur la contrainte d'apparition de la première fissure, que sur la résistance à la rupture, dans le cas de fibres d'acier ; dans le cas de fibres synthétique, au contraire seule la résistance à la rupture est augmentée, car leur module élastique est trop faible pour qu'elles interviennent avant la fissuration du béton. On note également une légère augmentation de la résistance à la compression, de l'ordre de 20 à 30% au maximum.

Une autre caractéristique du béton de fibres est sa déformabilité importante avant rupture, ce qui lui confère une bonne résistance aux chocs, en raison de sa capacité d'absorption d'énergie. En ce qui concerne enfin la durabilité, le béton de fibres d'acier présente un inconvénient, car les fibres situées à proximité du parement sont insuffisamment protégées contre la corrosion, et sujettes à l'oxydation ; il est donc nécessaire, en atmosphère agressive, de disposer une protection efficace. Les fibres synthétiques, au contraire, sont protégées par le béton, et leur vieillissement ne semble pas à craindre.

#### 6.6.1- Caractéristiques physico-chimique des BFM

- **Conductibilité thermique et électrique**

La conductivité des fibres d'acier, allée à leur distribution aléatoire, contribue à une augmentation de la conductivité du béton. L'apport des fibres dans la conductivité thermique a été souligné par UHER et COOK, [12], qui ont trouvé que l'addition des fibres d'acier dans le béton peut prolonger la durée de vie des structures en cas de chocs thermique et températures élevées. D'autre part, A.M PAILLER et J.J SERRANO [13] ont effectué des essais de traitement thermique par effet joule, du béton frais et du béton durci avec un dosage de fibres de 1% et sont arrivés pour deux applications différentes et dans chaque cas, à des résultats très encourageants.

- **Durabilité.**

Les essais de corrosion accélérée réalisés par DEHOUSE et MORSE [14] ont montré aucune différence au bout de 2 mois. On constate seulement une attaque superficielle qui n'affecte en rien le comportement général de béton de fibre métallique.

- **le retrait**

Selon certains auteurs l'introduction de fibres dans un béton ne joue aucun rôle vis-à-vis du retrait, mais retarde l'apparition des premières fissures, et leur propagation. La présence des fibres exerce une légère influence sur le retrait libre, puis qu'elle ne le réduit que de 20%.

### 6.6.2- Propriétés mécaniques

- **Résistance à la compression**

La présence des fibres améliore très peu la résistance à la compression du béton. On ne peut espérer qu'une amélioration de 10% pour  $V_f$  1/d de 100. D'autres auteurs donnent des résultats très variés et quelquefois annoncent une diminution de la résistance à la compression. On peut penser, dans ce dernier cas, que cette diminution est due à une mauvaise mise en œuvre, liée à une faible maniabilité, qui entraînent la formation de vides responsables des résistances plus faibles que celles du béton traditionnel.

- **Résistance à la traction et à la flexion**

Bien que l'augmentation de la résistance à la traction, qui peut atteindre 30% soit supérieure à celle de résistance à la compression, leur rapport continue à être négligeable.

L'essai de traction directe présente de sérieux inconvénients à cause de la fragilité du matériau, aussi lui préfère-t-on l'essai de flexion. Cet essai donne des résultats beaucoup plus encourageants, avec une amélioration de 100% à 200%. Toutefois, admettre une telle augmentation serait avoir une fausse idée, étant donné qu'on attribuerait alors à la résistance mécanique ce qui en réalité est dû à la déformabilité.

SWAMY [16] a établi une formule de régression qui permet de prévoir la résistance à la flexion, d'un béton de fibres, en fonction de celle du même béton sans fibres.

$$\sigma_{c.f} = \sigma_{m.f} (1 - V_f) + 3,4 V_f \frac{1}{d}$$

$\sigma_{Cf}$  : résistance à la flexion du béton de fibres.

$\sigma_{mf}$ : résistance à la flexion du béton sans fibres.

$V_f$ : pourcentage de fibres en volume.

1/d : longueur relative des fibres.

- **Coefficient de poisson**

Le module de poisson est le même dans la mesure ou le comportement élastique ne varie pas. Il se situe entre 0,15 et 0,20.

- **Le fluage.**

Le fluage est une déformation différée apparaissant sous efforts dans le temps. Certains auteurs ont montré que le fluage n'est pas modifié par l'introduction de fibres.

Dans l'étude réalisée par BONZEL et SCHMIDT [17] les résultats font apparaître une bonne concordance entre le fluage du béton courant et celui du béton renforcé de fibres.

**Tableau 6.1 :** influence des fibres métalliques sur certaines propriétés mécaniques du béton  
(pour un pourcentage de fibres compris entre 2,5 et 1,5 %)

<b>Propriétés mécaniques</b>	<b>La présence de fibres a-t-elle une influence ?</b>	<b>Observations</b>
Résistance à la compression	Non	Les fibres n'ont qu'un effet peu important sur la résistance à la compression. Par contre le mode de rupture peut être totalement modifié d'une manière très favorable.
Résistance à la traction	oui	On obtient une légère augmentation.
Résistance à la flexion	oui	Une augmentation importante de la résistance à la flexion est obtenue les fibres apportent une plus grande ductilité dans le comportement en flexion et minimisent les ouvertures des fissures.
Résistance A la Fatigue	oui	La résistance en fatigue du béton de fibres en flexion est égale à 80 ou 90% de la résistance à la flexion statistique (et seulement 55% pour le béton traditionnel).
Résistance au Choc	oui	Une augmentation importante est obtenue. Les fibres accroissent de manière importante la dissipation d'énergie.
Module D'élasticité.	Non	—

### 6.7- Domaine d'utilisation

Les matériaux armés de fibres peuvent trouver certains domaines d'utilisation mettant à profit leurs propriétés de résistance améliorées en traction par flexion (permettant de fabriquer des pièces plus mince, des éléments ayant des formes complexes), ainsi que leur très bon comportement à l'action des chocs et à l'usure [18]. A titre d'exemple nous citons :

- Voiles minces, plaques, panneaux minces de façade comportant des reliefs.
- Poutres creuses, tuyaux, réservoirs.
- Dalles, élément de clôtures, couvercles de regards d'assainissement, fosses, bordures de trottoirs.
- Encadrements de fenêtres.
- Traverses de chemin de fer.
- Silos.
- Aires et pistes d'aérodromes (plusieurs exemple aux Etats -Unis).
- Chapes de ponts, sols industriels.
- Sols de parking.
- Bordures et tuiles de grand format pour les couvertures.
- Béton léger armé de fibres.
- Élément de protection des quais maritimes.
- Bateaux a coques minces : certaines réalisation ont été faites soit avec des fibres d'acier, soit avec des fibres de polymères ou de verres spéciaux (comme un bateaux de sauvetage à Liverpool).

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE 6**

- [1] Extrait de CSTC – revue n°3 – septembre 1977.
- [2] **ROGER L, ALBERT. F ET HENRI. T** « traité de béton » 61 boulevard saint germain – 75005 paris 1982.
- [3] **FIBER. M** , « fibres synthétiques pour renforcement des bétons » USA- 1983.
- [4] **ROSSI P, HAROUCHE P, et LE MAOU F**, « comportement mécanique des bétons à fibres métalliques utilisés dans les structures en béton armé et en béton précontraint » annales de L'I. T. B. T. P. n°479 bis série matériaux 73 – décembre 1989.
- [5] **OUCIEF. H** ; « formulation et comportement mécanique d'un béton à base de fibres métalliques » thèse de magister en génie – civil, université de Annaba – 16 mars 1992.
- [6] **REDJEL. B**, « matériaux composites : cours de poste –graduation, matériaux ,1991/92 » dpt Matériaux – institut de génie – civil, Université de Annaba.
- [7] **PAILLIERE. A** et **SERRANO J** ; « utilisation de la conductivité des fibres métalliques dans le traitement thermique des bétons frais et dans le chauffage du béton durci ».bulletin de liaison –L .C .P .C. n°113 -mai 1981.
- [8] **HUGHES. B** et **FATTULI. I**; « the workability of steel fibre reinforced concrete”.magazine of concrete research n°28 -1976.
- [9] **SWAMY R-N-** et **MANGAT P-S-**; “influence of fibre geometry on the properties of steel fibre reinforced concrete “ cement and concrete research – vol-4-n°3-1974.
- [10] **SERNA ROSP PEDRO**, « étude de la contribution des fibres métalliques à l'amélioration du comportement des bétons au cisaillement ». Thèse de docteur – ingénieur en génie – civil présentée à l'école nationale des ponts et chaussées –septembre 1984.
- [11] **BARON J-** et **LESAGE R** ; « compacité maniabilité des bétons hydrauliques ». rapport de recherche L .C. P. C. - n°3 .
- [12] **COOK D .G** . et **UHER C** ; « the thermal conductivity of fibre reinforced concrete ». USA –cement concrete research vol .4 n°4- pp 497 – 509-july 1974.
- [13] **PAILLELE A .M.** et **CERRANO J. J** ; « utilisation des fibres métalliques dans les bétons de granulats légers essai pour l'étude du comportement à la rupture à la flexion ». rilem symposium – Sheffield -1978.
- [14] **MORSE D .C** et **WYLLIAMSON G . R**, « corrosion behaviour of steel fibrous concrete ».USA – army constr – eng . res-lab publication C.E.R.L-TR-M-A-36P-mai 1977.

[15] **REHAILIA H**; « application de la mécanique linéaire élastique de la rupture aux bétons à fibres ».thèse de magister en génie civile, Université de Annaba -30 juin 1992.

[16] **SWANY R M , MAMGAT P.S.et PAO**, « the machanics of fibre reinforced ciment matrices » USA – ACI – SP44- I –PP 128 – 1974.

[17] **BONZEL J et SHCMIDT L**, « distribution and orietation of steel fibres in concrete and their inflionce on the carcaterestics of steel fibre concrete ».rilem symposium – sheffield - 1986.

[18] **CUYKENS T, et VENSTERMANS J**, « béton renforcé de fibres on acier ». extrait de C .S .T .C revue n°3 septembre 1977.

# CHAPITRE 7

## Renforcement et réhabilitation des structures en béton

---

## Renforcement et réhabilitation des structures en béton

---

### 7.1. Introduction

Le projet d'une structure consiste à définir avec précision chacun des éléments qui la composent ainsi que la manière de la construire, le tout en accord avec son usage ou sa fonction finale. Si une structure est bien conçue et correctement exécutée, elle n'aura besoin d'aucun renforcement au moment de sa mise en service. Cependant, suite à des erreurs dans le projet ou dans l'exécution, ou suite à diverses circonstances lors de la vie en service (chargements maximums dépassés, changement des conditions d'exploitation, fluage, fatigue, incendies, attaques chimiques dues à l'environnement...), des renforts peuvent s'avérer nécessaires.

Dans ce chapitre nous présentons les méthodes les plus utilisées dans le domaine de renfort des structures. Il s'agit principalement des techniques de renfort avec une incorporation de profils métalliques, ou bien une modification de la section structurelle et la plus récente qui utilise des matériaux composites en tant que renfort externe.

### 7.2. La nécessité d'un renforcement

Les causes qui conduisent à un renforcement structurel sont aussi nombreuses que le nombre de structures elles-mêmes, chaque cas devant être considéré comme un cas particulier.

Les plus fréquentes sont :

- ❖ **Accroissement des charges qui sollicitent la structure :**
  - changement d'usage de la structure (ex : bâtiment d'habitation réhabilité en centre commercial),
  - augmentation du niveau d'activité dans la structure (ex : anciens ponts soumis au trafic actuel),
  - installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels.
- ❖ **Défauts dans le projet ou dans l'exécution :**
  - armature insuffisante ou mal placée,

- mauvais matériaux,
- dimensions insuffisantes des éléments structurels.
- ❖ **Rénovation des structures anciennes :**
- prise en compte de renforts par des sollicitations non considérées au moment du projet ou de la construction (vibration, actions sismiques et autres),
- connaissance des insuffisances de la méthode de calcul utilisée lors de la conception, ainsi que des limitations montrées par des structures calculées durant une époque ou période,
- vieillissement des matériaux avec perte des caractéristiques initiales.
- ❖ **Changement de la forme de la structure :**
- suppression de poteaux, piliers, murs porteurs, élargissement de portées de calcul,
- ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs.
- ❖ **Dégâts dans la structure :**
- corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton,
- impacts contre la structure,
- incendies.
- ❖ **Nécessité d'améliorer les conditions en service :**
- diminuer les déformations et flèches,
- réduire la contrainte des armatures,
- diminuer l'ouverture des fissures.

### 7.3. Techniques de renfort des structures en béton armé

La décision de procéder aux réparations peut être prise afin d'atteindre un ou plusieurs des objectifs suivants (ACI, 1984) [1]:

- rétablir ou augmenter la résistance;
- rétablir ou augmenter la dureté;
- augmenter la performance;
- procurer une étanchéité;
- améliorer l'apparence de la surface de béton;
- améliorer la durabilité;
- prévenir l'attaque d'agents corrosifs des barres d'armature.

Plusieurs facteurs vont influencer le choix de la méthode de réparation. Ces facteurs peuvent être d'ordre technique, économique ou pratique. Par exemple, les méthodes de réparation applicables vont changer selon le type de dégradation, l'emplacement et le budget alloué. Dépendant de la nature des dommages, on peut avoir recours à plusieurs méthodes de réparation simultanément. [1].

### **7.3.1. Méthode traditionnelle d'augmentation des sections avec ou sans armatures**

L'objectif de la méthode consiste à améliorer la ductilité du poteau ou de l'ensemble de la structure en confinant le béton dans les zones critiques. En effet ces zones proches des nœuds sont souvent insuffisamment frettées. Les cadres empêchent également les armatures de flamber. Il faut néanmoins veiller à ne pas augmenter la raideur des poteaux traités, sinon ils vont reprendre plus de charges et risquent de devenir sous dimensionnés. Une solution consiste à utiliser seulement des cadres, sans armatures longitudinales de sorte que l'augmentation de résistance en flexion apportée par le renforcement soit négligeable.

Garantir la localisation des rotules plastiques. On utilise un ferrailage classique (longitudinal et cadres), pour renforcer aussi la résistance du poteau en flexion dans le but de sur dimensionner le poteau; on souhaite en effet que les rotules plastiques se forment dans la poutre. Cette technique entraîne une redistribution des efforts du fait que le poteau a une plus grande raideur; il faut alors vérifier l'ensemble de la structure par un calcul d'ensemble intégrant le renforcement. Augmenter la résistance globale de la structure. Le chemisage revient à augmenter la section de béton armé. Là encore on utilise un ferrailage classique. On applique cette technique à plusieurs poteaux [2].

Il s'agit d'augmenter la section d'origine en béton à l'aide d'un coffrage de manière à envelopper l'élément existant. Le béton sera coulé dans ce coffrage.

Lorsque la détérioration du béton est importante, le remplacement du béton altéré par du nouveau béton est nécessaire. Lors de l'enlèvement des matériaux détériorés, il faut s'assurer de ne rien laisser qui pourrait empêcher l'accrochage du nouveau matériau à l'ancien. Afin de délimiter les zones à enlever, on pratique des traits de scie de 25 à 50 mm de profondeur tout autour de celle-ci et on procède ensuite à sa démolition. Parmi les nombreuses techniques d'enlèvement des matériaux, on retrouve: le broyage, le repiquage, le sablage, le décapage et le lavage.

Après l'enlèvement des matériaux, il faut nettoyer soigneusement le substrat, le nettoyage se fait à l'aide d'un jet de sable suivi d'un jet à l'eau et à l'air propulsé. Pour finir, le surplus d'eau restant à la surface du béton est éliminé en utilisant un jet à l'air [1].



**Figure 7.1** : Disposition des armatures pour chemisage des fondations et des poteaux [1].

Percer la dalle et éventuellement les poutres pour permettre le passage des armatures de continuité.

Disposer les barres de continuité et les fixer au ferrailage. Pour ce qui est du plancher bas du premier niveau, les barres de continuité doivent être scellées dans les têtes de fondation. Sceller des barres courtes dans le poteau pour assurer la continuité du ferrailage. Mettre en place le nouveau ferrailage (cadres et armatures longitudinales) et les lier aux barres de scellement, ensuite projeter le béton [2].





**Figure 7.2 :** Réparation d'un poteau par augmentation de section. [2]

### 7.3.2. Méthode adjonction d'armature complémentaire

L'objectif de la reconstitution du parement est non seulement de restaurer l'apparence du béton mais aussi d'arrêter le processus de corrosion tout en rendant à la structure son intégrité. Il s'agit de réparations à caractère discontinu, ponctuel et superficiel.

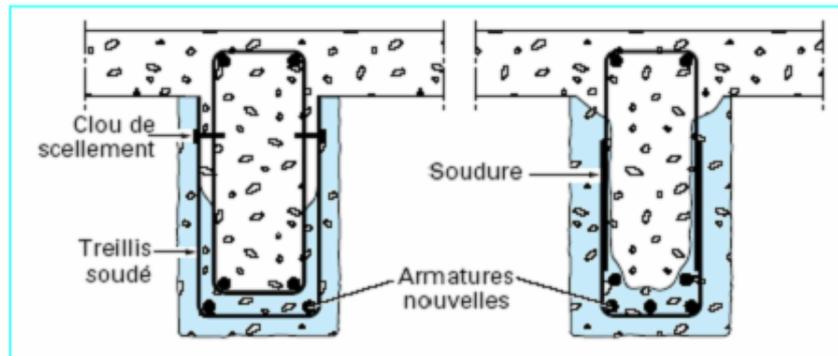
Avant de réparer les zones dégradées (armatures apparentes, éclatements de béton, traces de rouille, etc.), les revêtements en place doivent être retirés sur toute la surface par un moyen mécanique ou chimique [3].

Pour traiter les armatures corrodées, il convient de les dégager par burinage, repiquage ou bouchardage, jet d'eau ou sablage. Le dégarnissage doit être effectué jusqu'à ce qu'un acier sain apparaisse (sans trace de rouille) et la longueur de cet acier doit être dégagée sur toute sa périphérie, selon la norme NF P95 95.101 (un dégagement d'un minimum de 2 cm derrière l'armature est conseillé). Lorsque les armatures qui ne sont pas parallèles au parement sont corrodées à leurs extrémités, le béton avoisinant doit être enlevé et ces extrémités doivent être amputées de 2 cm, pour rétablir un enrobage suffisant.

A l'étape de remplacement des armatures, un contrôle du diamètre résiduel des armatures les plus fortement attaquées sera effectué (à l'aide d'un pied à coulisse par exemple).

Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place par scellement ou soudure afin de restituer la situation initiale avec une tolérance de 5%, en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement, et des armatures de couture. Dans le cas de soudure,

celles-ci devront être effectuées selon les normes en vigueur après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée [3].



**Figure 7.3:** Réparation de poutre par adjonction d'armature. [3]

La protection des armatures, consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont dégagées (périphérie complète), un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion. Ce traitement n'est réellement nécessaire que si, pour des raisons techniques ou esthétiques, l'enrobage ne peut pas avoir la valeur prévue dans les règlements (BAEL 91 révisé 99, par exemple), pour un fonctionnement donné. Il est également fonction de la nature du produit de reconstitution du parement.

Cette application doit suivre immédiatement le décapage car l'oxydation des armatures risque de s'amorcer et de compromettre la bonne tenue de la réparation [3].

La réfection des bétons consiste à rétablir l'enrobage des armatures par la mise en œuvre de mortier. Ce dernier doit respecter les critères [3]:

- de tenue verticale sans coffrage ;
- de montée en résistance rapide et de résistance mécanique supérieure au béton support ;
- d'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support ;
- d'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs ;
- de coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité dynamique équivalent au béton support ;
- de bonne protection des aciers.

### 7.3.3. Méthode d'injection des coulis

Coulis d'injection est un coulis à base de ciment hydraulique de très haute performance, formulé spécialement pour s'injecter dans les fissures de 1,5 à 5 mm dans la maçonnerie ou le béton.

La surface doit être propre et solide. Elle peut être sèche ou humide. Enlever les impuretés, huile, graisse et autres matières qui nuisent à l'adhérence. Pour préparer la surface utiliser un marteau piqueur ou d'autres moyens mécaniques appropriés. Placer les points d'injection. Sceller les fissures avec le produit approprié pour le type de support.

Utiliser approximativement un ratio de 4 parties de produit pour une partie d'eau potable. Utiliser un contenant propre. Verser la quantité d'eau requise premièrement et ajouter la poudre en brassant. Mélanger manuellement ou utiliser un malaxeur. Mélanger jusqu'à l'obtention de la consistance du sirop. Eviter un surplus d'eau. Eviter le brassage prolongé. Ne pas mélanger plus de produit que l'on ne peut pas installer pendant 10 minutes.



**Figure II.4** : Pistolet manuel d'injection [5]

Pour injecter, utiliser une seringue ou cartouches d'injection jetables. Lorsque le produit de scellement a durci, injecter le coulis dans le point d'injection inférieur jusqu'au moment où le produit sort par le point d'injection supérieur. Arrêter l'injection et boucher le point d'injection inférieur. Injecter dans le point supérieur celui déjà bouché. Répéter l'opération en montant jusqu'au dernier point d'injection. Laisser le coulis durcir au moins 3 heures.

Enlever les points d'injection. Finir la réparation avec le même produit utilisé pour le scellement des fissures.

### 7.3.4. Méthode de béton projeté

Cette technique, très au point, utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défailtantes que pour la réparation d'ouvrage endommagés, exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé. Le béton projeté peut être, ou non, combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires. La projection est réalisée soit par voie sèche, soit par voie mouillée. Dans le premier cas, la grande vitesse de projection (80 à 100 m/s) fait que le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des ouvrages car il permet d'obtenir un béton très compact. Dans le second cas, la faible vitesse de projection (10 à 40 m/s) rend indispensable l'exécution préalable d'une couche d'accrochage. Après durcissement, le béton projeté possède les propriétés d'un béton coulé, puis vibré. La projection est possible dans toutes les directions, en particulier en plafond (figure 2-12). Une description détaillée de cette technique est donnée dans l'ouvrage de Resse [Resse C. et Venaut M. 1981] [4]. c'est une erreur

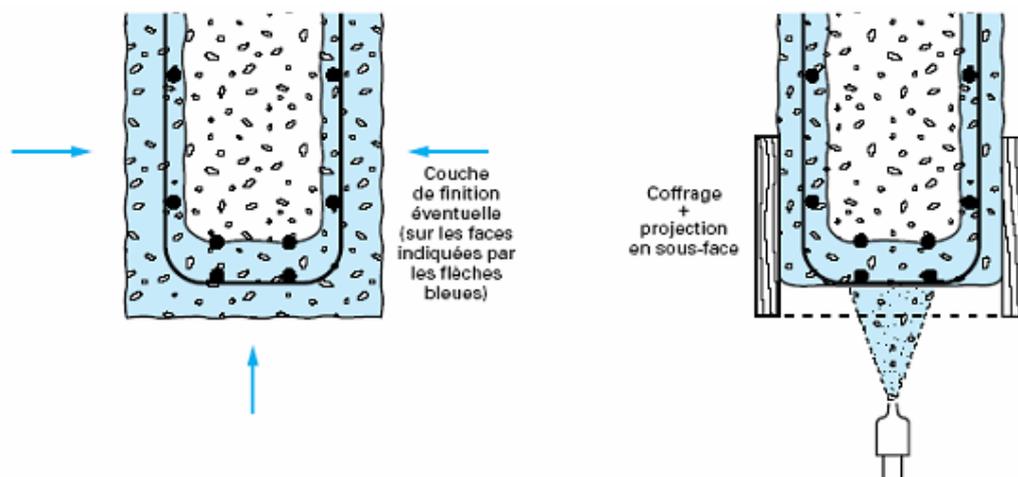


Figure II.5 : Réparation de poutre par béton projeté. [4]

Selon Resse [5], les travaux de réparation par béton projeté se regroupent en deux catégories : les réparations superficielles et les réparations profondes. Grâce à son adhérence au support, à ses caractéristiques très proches de celles du béton coffré, aux possibilités de mise en place et d'enrobage d'armatures de renfort qu'il procure, le béton projeté permet de réaliser économiquement de telles réparations.

La difficulté de l'emploi de cette méthode provient essentiellement du mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problèmes d'hygiène et de sécurité) [5].

### **7.3.5. Méthode d'adjonction de matériaux composites**

Les enjeux économiques ont été à l'origine de la prise de conscience, de l'importance de la maintenance et, ainsi, au développement des techniques de réhabilitation. Les techniques traditionnelles ont montré leurs limites au comportement à long terme (oxydation des tôles d'acier, durabilité du béton projeté, etc.). En même temps, la rentabilité d'une opération de maintenance est conditionnée par sa durabilité, et donc, par la baisse des fréquences d'intervention. La recherche dans le domaine de réhabilitation s'est orientée vers l'utilisation de nouveaux matériaux capables de répondre aux différents critères exigés par les opérations de la maintenance des ouvrages. Plusieurs raisons ont permis aux matériaux composites, restés longtemps limités aux applications militaires et à l'industrie aéronautique, de s'implanter dans le domaine de génie civil. On peut citer parmi ces raisons le développement qu'a connu l'industrie des composites durant les trois dernières décennies et la crise qu'a traversé l'industrie aéronautique depuis le début des 90 ce qui avait comme conséquence une baisse des prix des composites. Aussi, le génie civil est un domaine qui nécessite trop de main d'œuvre, le coût de cette main d'œuvre dans les pays développés est devenue assez élevé de telle sorte que le prix de la matière première ne joue plus le rôle du "critère économique primordial". Ceci implique que le prix des composites ne peut plus être considéré comme un handicap, surtout aux applications de réparation et de renforcement [6].

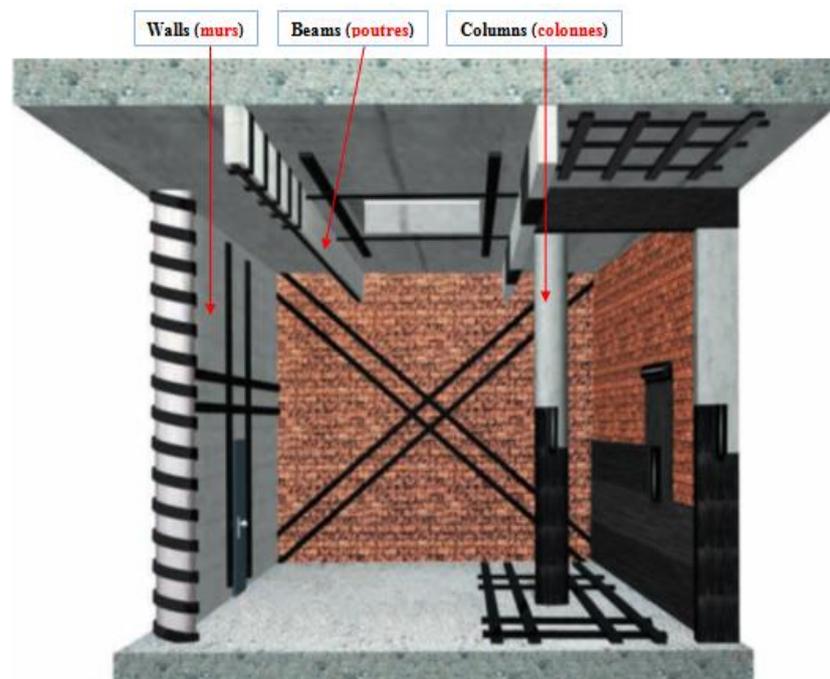
Depuis leurs premières applications en génie civil il y a maintenant 20 ans, l'intérêt des composites s'est généralisé sur l'ensemble de la communauté internationale, groupes industriels et laboratoires de recherche, et s'est particulièrement accentuée ces dernières années si l'on juge par l'importance du nombre de publications et colloques internationaux qui traitent quotidiennement de ce sujet.

Les matériaux composites utilisés en génie civil sont essentiellement des tissus en fibres de carbone, voir en fibre de verre pour certaine applications. Il reste évident que les résines adéquates doivent être utilisées pour optimiser l'emploi des fibres. Plusieurs procédés de renforcements sont apparus au cours de ces quinze dernières années. Les principaux utilisent directement les fibres sous formes de fil continu et d'autres font appel à des semi-produits plus ou moins sophistiqués, tels que les tissus secs, les tissus prépréimnés ou des produits putrides.

#### 7.4. Le polymère renforcé de fibre (PRF)

Le terme « polymères renforcés par des fibres » appelé FRP d'après la traduction anglaise « fiber reinforced plastics » sont en voie d'être considérés comme une alternative préférable aux plaques d'acier pour le renforcement externe de certaines membrures en béton armé. [7]

Les polymères renforcés de fibres (PRF) sont des matériaux composites constitués d'une matrice polymère renforcée par des fibres. Le polymère est généralement une résine époxy, vinylester ou polyester thermoplastique, ces matériaux composites (PRF), fabriqués à partir des millions de fibres continues organique et inorganiques assemblées et colées à la résine, ont des avantages incontestables par rapport aux aciers traditionnels : par exemple, une haute résistance à la traction, une excellente résistance à la corrosion, un poids volumique bas. En raison de leur très haute résistance à la corrosion, leur légèreté (qui facilite leur usage dans les processus de construction) et fait qu'il puissent être fabriqués sur mesure pour répondre aux besoins d'un ouvrage donné, ils ont déjà été employés dans importants travaux au niveau mondial. [8].



**Figure 7.6 :** Structure renforcée par polymère renforcé de fibre (PRF). [8]

##### 7.4.1. Histoire des PRF dans le domaine de construction

La maintenance des ouvrages de génie civil est un problème de plus en plus préoccupant dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé. Le but est de réparer en assurant la performance, aussi bien du point de vue de l'économie que de la durabilité de ces ouvrages. En 1950 s'était l'apparition des premiers produits PRF utilisés comme

renforcement de béton. Il s'agissait surtout de plaques et de coques à base d'éléments tubulaires coulés.

Cette technique de renforcement par PRF est devenue depuis une vingtaine d'année, la plus efficace pour les désordres structurels est la réhabilitation des structures en béton armé par collage extérieur des matériaux composites (PRF).

Actuellement, les PRF les plus utilisés en génie civil sont les suivants : les polymères renforcés par des fibres de verre (PRFG), les polymères de tissu renforcés de Carbone (PRFC), et les polymères de tissu-renforcés d'aramide (PRFA). D'une manière générale, les matériaux composites de type polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC) présentent beaucoup d'avantages dès qu'il s'agit de la protection, la réparation, le renforcement des ouvrages en béton et même le renforcement parasismique. S'il est vrai que vis-à-vis d'ouvrages métalliques, les performances mécaniques de ces matériaux semblent moins intéressantes, les évolutions des technologies (techniques de mise en œuvre, qualité des adhésifs, disponibilité de composites à haut module) laissent penser que cette méthode de réhabilitation pourrait être également davantage appliquée aux structures métalliques.

Le renforcement des ouvrages en béton par collage des PRFC sont devenus relativement courants. De nombreuses applications des PRFC sont intégrées dans le génie civil dans le monde entier. La première application du PRFC est dans la construction du pont « Strait of Gibraltar » (Meier, 1987), et plusieurs projets au Japon dans les années 80. En 1991, en l'espace de trois nuits, Meier et son équipe ont fêté la première mondiale des lamelles de PRFC lors de la rénovation du pont de l'Ibach (1913-2001) dans le canton de Lucerne dont la capacité portante avait fortement diminué (Meier, 2002). Une dizaine d'années après, en 2000, environ 1500 structures en béton dans le monde ont été renforcées par les PRFC. Aujourd'hui, cette technologie de renforcement a fait ses preuves sur d'innombrables ouvrages de construction. [30]

Compte tenu du vaste choix de fibres et de résines, joint aux multiples combinaisons de couches, d'orientations et de dispositions des fibres, les PRF ont chacun des propriétés propres. De plus, le mode de fabrication et la méthode d'ancrage à la membrure à réhabiliter ont aussi un effet sur le comportement structural des pièces renforcées.

#### **7.4.2. Caractéristiques des PRF**

Un FRP consiste en deux ou plusieurs matériaux distincts combinés à l'échelle macroscopique afin de produire un produit possédant des caractéristiques qui dépassent celles de leurs composantes seules. Un FRP est une combinaison de fibres à haute résistance (les fibres de

verre, de carbone et d'aramide sont les plus utilisées) dans une matrice (polyester, vinylester, époxy ou autre). Le matériau ainsi obtenu est hétérogène et anisotrope. Les fibres donnent la résistance mécanique alors que la matrice unit les fibres, les protège et transfère les charges aux fibres par cisaillement.

Les plaques de PRF sont des lamines (ou stratifiées) constituées d'un certain nombre de couches appelées plis. Un pli est une couche de fibres ou de fibres tissées, imprégnées dans une matrice. Lorsque les plis sont empilés les uns sur les autres dans une combinaison d'orientation définie à partir des propriétés mécaniques désirées, le produit s'appelle alors laminé.

Les fibres peuvent être disposées de différentes façons dans un pli. On distingue le pli à fibres unidirectionnelles (aussi appelé nappe unidirectionnelle), le pli à fibres tissées (appelé tissu) et le pli mat (fibres disposées dans un plan sans aucune orientation préférentielle).

La plus importante caractéristique des PRF est leur rapport résistance-masse élevé. On peut facilement produire un PRF dont la résistance à la traction est supérieure à celle de l'acier, et cela pour une masse correspondant à moins de 10 % de celle de l'acier. Les PRF ont une grande rigidité (certaines fibres de carbone à haut module ont un module d'élasticité d'environ deux fois celui de l'acier), généralement une bonne résistance à la fatigue (excepté pour les fibres de verre), une excellente résistance à la corrosion et un poids très léger. Ils sont aussi reconnus pour leur neutralité électromagnétique.

Malgré que le poids des PRF soit quatre à cinq fois inférieur à celui de l'acier, leur coût demeure relativement élevé. Par contre, l'utilisation croissante de ces nouveaux matériaux et le développement de la technologie font que les prix ont tendance à diminuer graduellement

-les PRF:

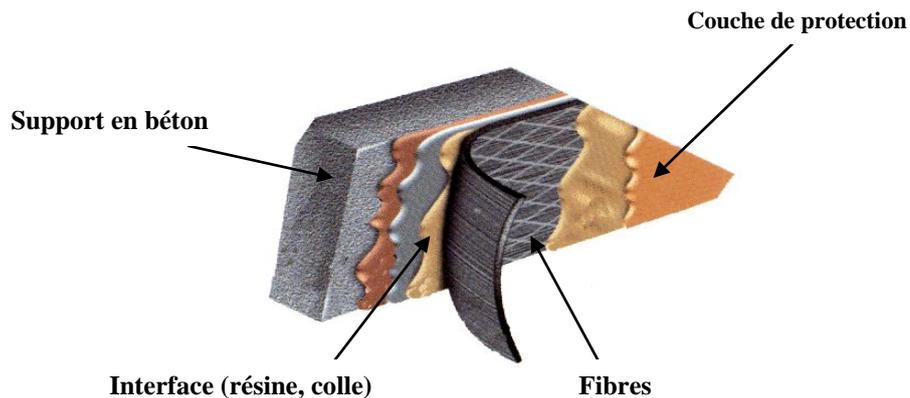
- ont un rapport résistance-masse élevé ;
- ont une résistance à la traction supérieure à celle de l'acier ;
- sont plus légers par rapport à l'acier ;
- ont une grande rigidité (module d'élasticité plus grande à celui de l'acier) ;
- ont une bonne résistance à la fatigue ;
- ont une excellente résistance à la corrosion ;
- ont un coût élevé ; [9]

### **7.4.3. Principe de renforcement par des PRF**

Avec un rapport résistance/poids très élevé (10 à 15 fois plus grand que celui de l'acier), une excellente résistance à la corrosion et à la fatigue (3 fois plus élevée que l'acier) et faible

expansion thermique, le PRF remplace de plus en plus les plaques en acier pour la maintenance des infrastructures.

Une grande difficulté dans l'application de PRF consiste à l'adhérence entre les bandes de PRF et la structure en acier ou en béton. Les comportements mécaniques, en particulier le comportement en flexion de la structure renforcée, dépendent fortement du collage, qui, avec les fissures du béton, entraîne rapidement à l'endommagement des PRF. Cela demande d'une matrice à base de résine époxy qui devient aujourd'hui indispensable dans l'utilisation de PRF.

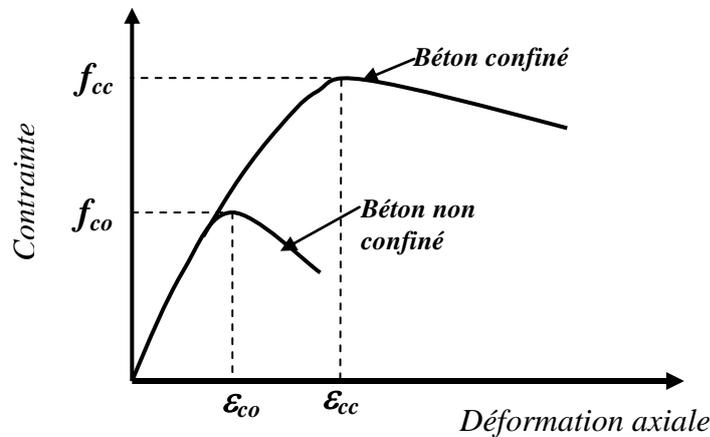


**Figure 7.7.** Principe d'un renforcement par matériaux composites (PRF) [6].

#### 7.4.4. Lois de comportement du béton confiné en compression

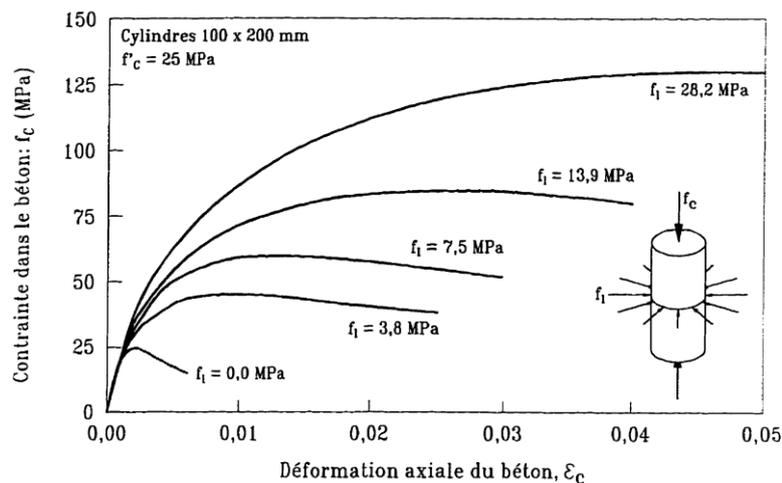
Plusieurs auteurs ont prouvé que le confinement des colonnes en béton chargées axialement augmente la résistance et la ductilité de ces colonnes d'une quantité considérable. Lorsque le béton est soumis à une compression axiale, celui-ci se déforme latéralement. Cette déformation produit une fissuration qui augmente avec l'accroissement de la charge et qui conduit finalement à la rupture du béton. Si le béton est retenu latéralement de façon à réduire cette déformation, la résistance du béton et sa ductilité seront augmentées. Ce phénomène est communément appelé confinement du béton [10]. Le confinement de béton qui consiste à empêcher ces déformations, peut être réalisé soit par une enveloppe externe, soit par un faible espacement entre les étriers. La figure suivante présente les courbes typiques contraintes déformations pour des bétons confinés et non confinés. Cette figure met en évidence les différences de comportement entre ces deux bétons. Le confinement augmente en général deux caractéristiques du béton: la résistance en compression  $f_{cc} > f_{co}$  et la déformation correspondant à la contrainte ultime de compression  $\varepsilon_{cc} > \varepsilon_{co}$ .

Le confinement augmente considérablement le pouvoir absorbant d'énergie du béton. Ainsi dans des régions sismiques, le renfort est fourni pour confiner le béton et par conséquent pour augmenter la ductilité des colonnes et des poutres [11] (figure 7.8).



**Figure 7.8 :** Courbes contraintes déformations d'un béton confiné et non confiné [11]

La figure II.9, montre l'effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton [14]. Richart, Brantzaeg et Brown [12-13], ont signalé que la pression de confinement latérale augmente considérablement la force et la rigidité des cylindres de béton et augmente la contrainte à laquelle l'effort maximal est atteint. Les pressions de confinement latérales réduisent la tendance pour l'augmentation interne de fissuration et minimisent la propagation de ces fissures, de ce fait on aura une augmentation de la résistance et de la ductilité du béton confiné.



**Figure 7.9:** Effet de la pression de confinement, [14]

Un exemple d'une étude expérimentale faite par Fam et Rizkalla (2001a) [15], L'étude a décrit le comportement des tubes de GFRP remplis de béton axialement chargés, ainsi que l'effet bénéfique de confinement dans des applications pratiques et des conditions de charge réalistes. Pour évaluer l'effet bénéfique de comportement sur toute la portance des cylindres, le comportement axial mesuré (charge-déformation) a été comparé à celui obtenu par la superposition du comportement axial du tube creux de GFRP et du noyau de béton témoin (figure II.10).

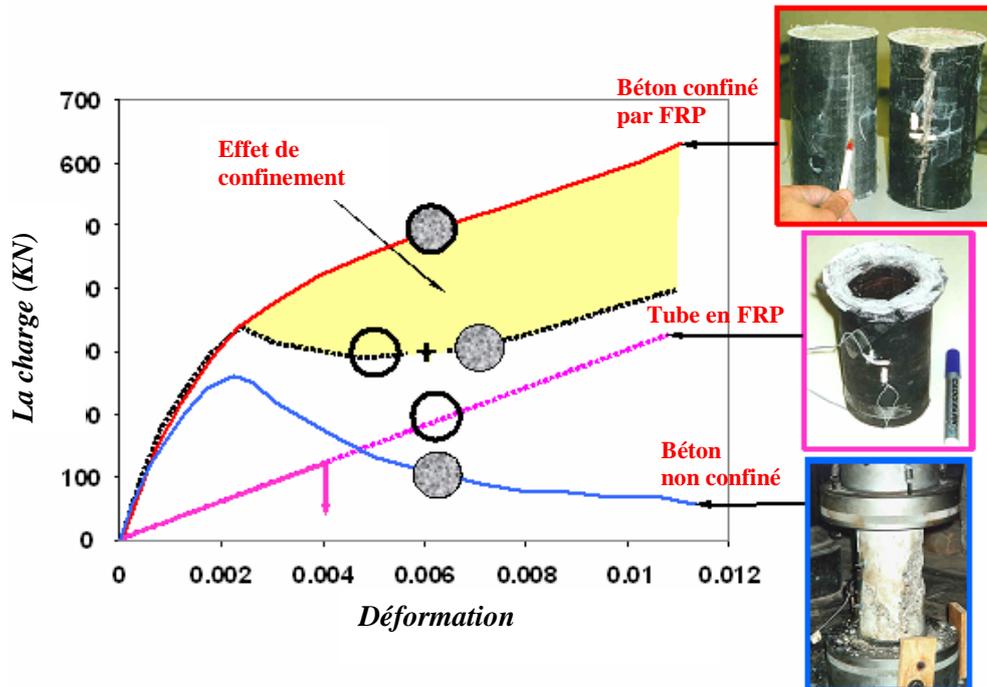
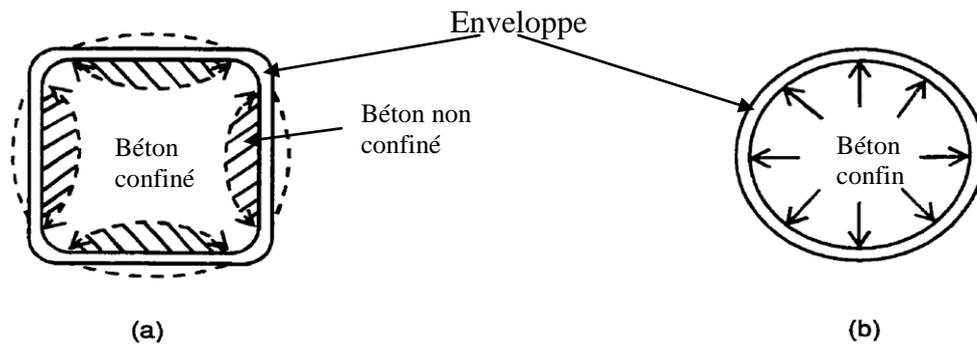


Figure 7.10 : Effet de confinement sur le comportement du béton [15]

#### 7.4.5. Mécanisme de confinement

Dans la pratique, les colonnes sont confinées par un renfort latéral, généralement sous forme de spirales en acier étroitement aligné ou d'enveloppes. Pour un faible effort appliqué au béton, le renfort latéral est à peine soumis à une contrainte, ainsi le béton présente le comportement d'un béton non confiné. Quand les efforts approchent de la résistance uniaxiale, la fissuration interne s'intensifie et provoque des déformations latérales élevées. Le renfort latéral, applique alors une réaction d'emprisonnement au béton et par conséquent le béton présente le comportement d'un béton confiné [16]. Les enveloppes circulaires, en raison de leur forme, fournissent une pression d'emprisonnement uniforme et continue autour de la circonférence (figure II.11.b). Cependant, dans le cas d'enveloppes sous forme carré ou rectangulaire, la pression d'emprisonnement s'applique uniquement aux coins (figure II.11.a), de ce fait une partie du noyau de béton demeure non confinée [16].



**Figure 7.11:** Mécanisme de confinement de béton [16]

(a) Section rectangulaire, (b) Section circulaire

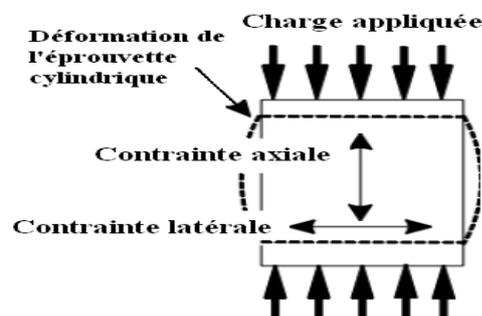
### 7.5. Contribution du polymère renforcé de fibre (PRF) au renforcement

L'encasement par un polymère renforcé de fibres d'une colonne de béton contribue à améliorer ses propriétés mécaniques. Ceci facilitera la compréhension de l'influence des différents paramètres caractéristiques du PRF sur les propriétés de confinement d'un élément de structure en béton exposée ci-après.

La littérature est riche d'analyse pour différentes structures et différentes contraintes mais nous nous limitons volontairement à l'exemple d'éléments de structure type colonne ou poteaux en béton (armé ou non) soumis à une charge uniaxiale de compression. En effet, c'est cette configuration qui sera testée dans la phase expérimentale de ce programme.

Le renforcement par FRP est une solution performante utilisée lors de réparation suite à des tremblements de terre [17-18]. De nombreuses études sont donc menées sur l'effet du renforcement sur la résistance à des contraintes excentriques comme celles rencontrées lors de tels événements mais nous ne considérerons pas ici cette thématique puisque la problématique sismique n'est pas une contrainte majeure dans nos régions.

Une éprouvette en béton soumise à une charge uni axiale de compression se dilate latéralement sous la contrainte.



**Figure 7.12 :** Contrainte et déformation d'une éprouvette cylindrique soumise à une charge uni-axiale de compression [19].

L'enchérissement par un PRF permet donc de retarder la dilatation latérale de l'éprouvette de béton en la confinant, limitant la propagation de fissures internes ce qui repousse la charge nécessaire à la rupture du béton.

Le mécanisme de rupture suggère que le dimensionnement du renfort ne devrait pas être basé uniquement sur la résistance à la rupture ou sur la déformabilité de l'enveloppe de renfort et que les gains de résistance devraient être réduits selon l'augmentation de la friabilité et de l'excentricité du béton [19].

D'autres paramètres sont à prendre en compte comme nous le détaillerons ci-dessous.



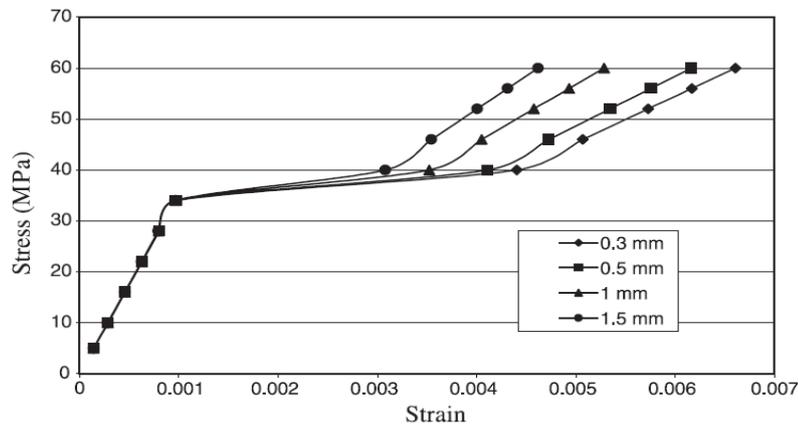
**Figure.7.13** : Modes de rupture d'un béton renforcé par un FRP à base de fibres de verre et de résine époxy soumis à une charge de compression [20].

Les courbes de déformation en fonction de la contrainte de compression d'éprouvettes de béton renforcées présentent trois régions distinctes [21] :

- une première zone similaire à celle d'un béton non renforcé, elle représente donc la réponse du béton à la sollicitation,
- une zone intermédiaire de transition plus ou moins importante selon la présence d'armatures,
- une troisième zone pseudo-plastique caractéristique du FRP : une fois seulement le béton endommagé le renforcement prend le contrôle des déformations de l'éprouvette et sa participation à la résistance peut être mesurée. La forme et la pente de cette droite dépendent de la rigidité du renforcement.

### 7.5.1. Epaisseur du renforcement

L'épaisseur du renforcement conditionne le confinement de l'éprouvette et donc améliore sa résistance à la contrainte axiale. Il a été prouvé que, et ce quel que soit la nature du PRF, plus l'épaisseur du renforcement augmente, plus la résistance à la compression du béton enchemisé s'améliore [19].



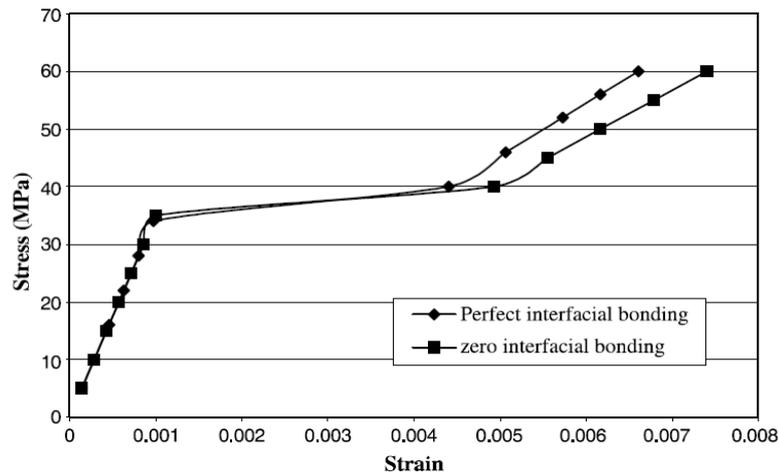
**Figure.7.14** : Influence de l'épaisseur du FRP sur le comportement contrainte/déformation[21].

Cependant, les résultats d'une étude canadienne montrent que les gains en résistance ne sont pas linéairement reliés à l'épaisseur de l'enveloppe de renfort : aucune proportionnalité entre ces deux paramètres n'a donc pu être établie [22].

L'épaisseur du renfort est pourtant limitée car au-delà d'un certain nombre de couches la ductilité du renfort se trouve affectée et donc il sera moins performant car moins apte à se déformer pour confiner le béton [23].

### 7.4.2. Adhésion entre le béton et le PRF

L'état de l'interface entre le béton et le FRP et plus particulièrement la liaison entre les deux éléments est évidemment un des principaux paramètres gouvernant l'efficacité du renforcement [21].



**Figure.7.15 :** Effet de l'état de liaison sur le comportement contrainte/déformation [21].

### 7.5.3. Application du PRF

Le choix du système de renforcement dépend fondamentalement du type de sollicitations auxquelles est soumis l'élément à renforcer ainsi que ses caractéristiques géométriques et physiques.

Dans ce paragraphe seront différenciés les systèmes in-situ et des systèmes préfabriqués.

Les systèmes in-situ consistent à appliquer une « feuille » ou un tissu de fibres, unidirectionnel ou orientable, sur le substrat déjà imprégné de résine. Si besoin est, on ajoutera ultérieurement davantage de résine pour obtenir un meilleur recouvrement du tissu et ainsi augmenter son comportement mécanique.

Dans un FRP préfabriqué les fibres sont déjà absorbées dans la matrice de résine, il ne reste plus qu'à assurer son adhésion avec l'élément à renforcer. Ces éléments peuvent se présenter sous forme de bandes, plaques, chemises ou barres.

Il est aussi important de différencier les techniques courantes (de base) et particulières. Les premières consistent à appliquer le PRF, in-situ ou préfabriqué, de manière manuelle. Dans cette technique on place les fibres les plus parallèlement possibles à la direction principale des tensions.



**Figure.II.16 :** polymère renforcé de fibre (PRF) appliqué in-situ.

Les techniques particulières (cas limités) sont fonction de la géométrie de l'élément à renforcer. Parmi ces techniques d'application on peut mentionner celles liées à l'application d'une enveloppe automatique, de FRP précontraint, de FRP chauffé, de FRP préfabriqués de manière complexe, des « near-surface-mounted barres » ou encore l'enchemisement par mortier.

### 7.6. Etude antérieures des techniques de réparation

De nombreuses techniques de renforcement ont été testées expérimentalement au cours des quinze dernières années. La majorité de ces renforcements ont été conçus avec l'un des trois matériaux béton, acier et matériaux composites. Dans la plupart des études expérimentales, les spécimens testés correspondaient à des poteaux en béton armé avec des armatures similaires à ceux endommagés lors des importants séismes en Californie. Chaque spécimen consiste en un poteau ancré dans une fondation surdimensionnée pour éviter toute fissuration ou rotation plastique de la semelle durant l'essai. L'objectif principal de ces essais quasi-statiques cycliques réside dans l'étude du comportement sismique (résistance, rigidité, dissipation d'énergie) de la partie poteau d'une pile de pont en béton armé. Les Tableaux suivants résument une partie des études expérimentales [24].

**Tableau 7.1** : Etudes expérimentales avec une chemise en béton [25]

Géométrie de la section	Références	Remarques
Carrée	Bett et al. (1987)	(1) aucune influence des armatures de ligature ancrées dans le poteau avec de l'époxy adhésive (2) augmentation de 150% du déplacement 3) rupture en flexion/cisaillement pour les spécimens renforcés
Carrée	Ersoy et al. (1991)	influence entre renforcement et réparation
Carrée	Chronopoulos (1986)	(1) évaluation entre renforcement et réparation (2) guide pratique de redimensionnement pour des poteaux endommagés

**Tableau 7.2** : Etudes expérimentales avec une chemise en acier [24]

Géométrie de la section	Références	Remarques
Circulaire	Marsh (1992)	influence de cycles répétés a une ductilité de 4 sur la perte en résistance et le mode de rupture
Carrée	Griezic et al.(1996)	renforcement combiné avec un déplacement de la rotule plastique
Circulaire	Chai et al(1991)	(1) les semelles conçues avec les prescriptions post 1971 sont prédisposées à une rupture en cisaillement
Circulaire Rectangulaire	Priestley et al. (1994b)	(1) augmentation du déplacement inter-étage de 5% pour un renforcement en flexion (2) augmentation du déplacement inter-étage de 4% pour un renforcement en cisaillement
Circulaire Rectangulaire	Priestley et al. (1994a)	(1) formulation de la résistance à l'effort tranchant (2) renforcement plus efficace pour une chemise circulaire/elliptique pour une section rectangulaire
Carrée	Fuse et al (1992)	(1) modification du mode de rupture en flexion (2) influence d'un coulis de ciment sans retrait
Rectangulaire	Aboutaha et al (1994)	influence des boulons d'ancrage pour le renforcement vis à vis du glissement

**Tableau 7.3** : Etudes expérimentales avec une chemise en matériaux composites [24]

Géométrie de la section	Références	Remarques
Circulaire	Gamble et ai. (1995)	(1) renforcement actif (rouleau d'acier précontraint) (2) renforcement passif (fibres de verre)
Rectangulaire	saadatmanesh et al (1997b)	(1) chemise rectangulaire ou elliptique (2) bandes de fibre en polymère renforcé a haute résistance
Rectangulaire Circulaire	saadatmanesh et al (1994)	étude paramétrique sur l'efficacité des bandes de fibres (carbone ou verre) composite (époxy) à haute résistance
Rectangulaire	saadatmanesh	réparation de poteaux endommagés avec des bandes de

Circulaire	et al (1997a)	fibre plastique renforcées
Circulaire	saadatmanesh et al (1996)	(1) renforcement avec des fibres de verre renforcées avec de l' époxy (2) comparaison confinements actif/ passif
Circulaire	Xiao et al (1997)	renforcement et réparation de poteaux avec une chemise préfabriquée en fibre de verre renforcée
Rectangulaire Circulaire	Seible et ai. (1995)	renforcement avec des bandes de fibres de et procédure de réalisation carbone
Rectangulaire	Seible et ai. (1993)	comparaison entre un renforcement avec une chemise en acier et une chemise en fibres de verre avec de l'époxy

## 7.7. Durabilité environnemental des PRF

Les propriétés mécaniques des matériaux d'ingénierie sont d'une importance capitale pour les concepteurs en structure envisageant leur utilisation. Cependant, les considérations environnementales et de durabilité sont également importantes dans l'évaluation des matériaux et des systèmes à employer dans les infrastructures. L'exposition à une variété de conditions défavorables peut modifier de manière significative la performance mécanique des matériaux de PRF et omettre de considérer les effets des facteurs tels que la température, l'humidité, les rayons ultraviolet, les différents produits chimiques et l'incendie peut mener à des performances insatisfaisantes. Cette section examine brièvement un certain nombre de facteurs importants qui peuvent influencer la durabilité des matériaux de PRF utilisés dans la construction. Il est important d'être conscient du fait que tous les matériaux d'ingénierie sont sensibles à différents environnements de différentes manières. Les facteurs énumérés dans cette section ne devraient en aucun cas être interprétés comme étant spécifiques aux PRF. En fait les PRF offrent des avantages de durabilité significatifs par rapport aux matériaux conventionnels tels que l'acier dans plusieurs domaines.

### 7.7.1. Durabilité sous climat froid

La durabilité sous climat froid est éprouvée par une exposition prolongée à des températures extrêmes (- 18°C ou - 40°C) ou par des cycles (environ 300) de gel/dégel l (de -18°C à 15°C). Lors d'une exposition de longue durée au froid, la résistance mécanique du béton réparé n'est pas affectée par la température et peut même être améliorée par rapport à celle du béton de

référence (béton réparé conservé à température ambiante) : cet accroissement est dû au durcissement de la matrice du FRP à basse température qui augmente la rigidité du renforcement dans la région plastique. Cependant, le mode de rupture des bétons renforcés devient fragile à basse température : la rupture est soudaine et brutale et ceci peut devenir problématique car aucun signe avant coureur n'apparaît et une simple inspection visuelle de la structure ne suffit pas à prévenir la rupture. Lors de la diminution de la température la rigidité des fibres augmente. Le transfert des contraintes de la matrice aux fibres n'est plus continu et peut devenir préjudiciable [26].

Par contre, l'alternance de gel et dégel diminue la capacité mécanique du béton enrobé par des PRF, notamment car les liaisons à l'interface entre le béton et le renforcement sont rompues suite à l'expansion puis la rétraction des matériaux avec la température qui ne se fait pas de la même manière pour le béton et le composite étant donné leurs différents coefficients de dilatation thermique. Cet effet est plus marqué pour les polymères à fibres de verre que pour ceux à fibres de carbone car plus rigides et plus sensibles à l'humidité [27].

### 7.7.2. Durabilité en milieu corrosif

La corrosion du béton est due à la pénétration de chlorures (provenant du milieu marin, de sels de déverglaçage, etc.) ou la carbonatation du béton. Ces deux phénomènes sont gouvernés par la porosité du béton. La question est de savoir si le renforcement d'éléments fragilisés par la corrosion va stopper ou non leur corrosion.

Green et al. Soumettent différentes éprouvettes (enveloppées de PRF, non enveloppées ou enrobées en cours d'expérience) à une ambiance corrosive (solution saline à 40°C). Ils mesurent au cours du temps le courant décorrosion résultant [26].

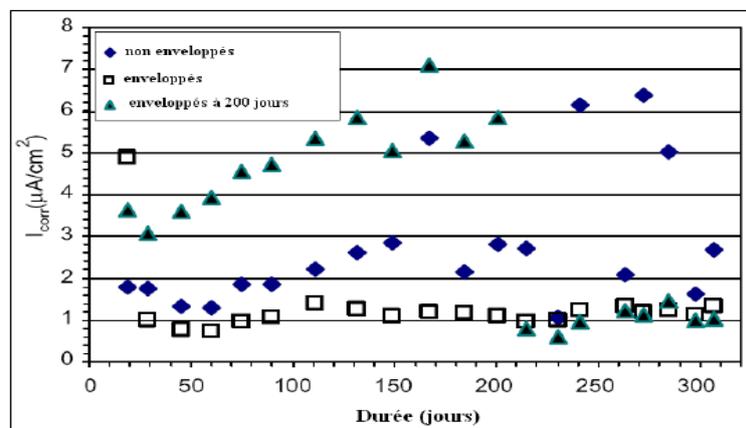


Figure.7.17 : Effet de la corrosion sur différents éléments réparés par PRF [26]

L'application de PRF, et ici même si elle survient après 200 jours de corrosion, permet de diminuer le courant de corrosion à une zone de valeurs pour lesquelles la vitesse de corrosion est très faible et non menaçante. L'action anticorrosive de l'enveloppe réside essentiellement en la barrière physico-chimique que constitue sa compacte couche de résine.

Dans le cas de renforcement d'éléments corrodés, deux techniques d'enrobage sont utilisées :

- Enveloppement après déchlorurations par des méthodes électrochimiques de l'élément,
- Enveloppement immédiat.

La première est bien sûre conseillée si le milieu environnant est particulièrement agressif et induit une corrosion rapide. La deuxième, recommandée dans des cas moins préjudiciables, nécessite néanmoins une surveillance par inspection ou monitoring des éléments réparés. Bien que l'enchemisement par PRF isole le béton du milieu extérieur et le protège ainsi de la pénétration d'agents extérieurs, la corrosion dans les éléments enveloppés perdure si le nécessaire n'est pas fait car l'humidité emmagasinée et avec tous les éléments corrosifs dissouts dans cette phase aqueuse sont désormais confinés par le renfort et prolongent leur attaque.

### **7.7.3. Rayons ultraviolets**

Les rayons ultraviolets (UV) peuvent endommager les matériaux de PRF. Les fibres d'aramide sont connues pour être particulièrement sensibles aux rayons UV, alors que les fibres de carbone et les fibres de verre sont résistantes à la lumière UV. De plus, la plupart des matrices de polymère se dégraderont légèrement en raison des rayons UV. La dégradation due à la lumière UV peut être empêchée par l'utilisation de divers additifs dans la matrice, l'application d'un enduit gélifié pigmenté sur l'extérieur d'un PRF ou en appliquant sur le PRF une peinture opaque. Par exemple, dans la plupart des cas de renforcement du béton par collage extérieur de plaques ou de feuilles de PRP. La finition du PRP consiste à appliquer une peinture résistante aux UV qui ressemblent au substrat de béton et "cache" bien le matériau de réparation.

### **7.7.4. Température**

La température est un facteur extrêmement important dans la conception et l'utilisation des matériaux de PRF dans les infrastructures. Aux températures élevées, les matériaux de polymères se décomposeront ou dans certains cas brûlent. La température en service d'un composant de PRF est donc limitée à environ 20 °C de moins que la température de transition vitreuse de verre (Tg), pour une résine d'époxyde, ou à la température de déformation

thermique, pour un vinylester ou un polyester. A ce température, on observe d'importants changements des propriétés mécaniques des matériaux de matrice de polymère qui entraînent une détérioration rapide de propriété mécanique de composant en PRF. Les températures élevées peuvent également avoir des effets important sur la durabilité à long terme de matériaux de PRF. Tel que discuté ci-dessus. Les basses températures ne constituent pas en général une préoccupation pour la matrice de polymère des PRF dans la plupart des usages structuraux, excepté dans des cas rares où les températures extrêmement basse (cryogéniques) provoquent la fragilisation des matériaux de matrice de polymère. Les effets de la température sur les PRF sont variés et complexes et la recherche sur les effets de la température sur les matériaux de PRF est en cours. Parmi ces dernier on peut citez :

- Les températures élevées augmentent le taux de fluage des matériaux de PRF
- les températures plus élevées augmentent le taux de dégradation des PRF dû aux attaques chimiques ou à l'absorption d'humidité
- la dilatation thermique différentielle (entre les fibres et la matrice, ou entre le PRF et le substrat dans les cas où le PRF est collé sur le béton, l'acier ou le bois) peut mener au développement de contraintes thermiques qui pourraient endommager l'interface matrice-fibre ou l'interface entre le PRF et le substrat. Les contraintes thermiques, dues aux différences de coefficients d'expansion thermiques (CET), varient en fonction de la nature des constituants du PRF.

La répétition de cycles thermiques et des contraintes qui en résultent peuvent endommager les matériaux de PRF par fissuration de la matrice et la rupture des fibres, ce qui peut aggraver les problèmes dus à l'absorption d'humidité et/ou à l'attaque chimique.

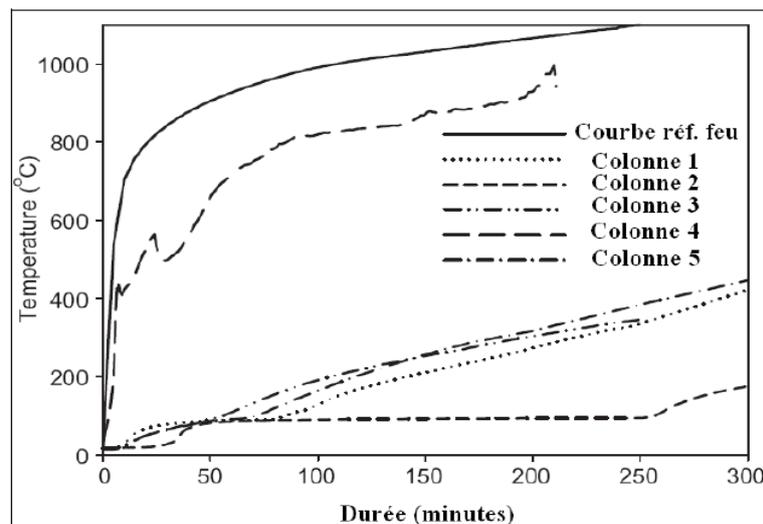
#### **7.7.5. Résistance au feu**

La résistance au feu est une problématique importante car les éléments à renforcer ; qu'ils se trouvent à l'intérieur de parkings, d'habitations ou qu'ils soient des éléments de tunnels ou de ponts ; doivent garantir un maintien structurel pendant une certaine durée en cas d'incendie. D'autre part, les matériaux de construction doivent limiter au maximum la propagation des flammes et leur combustion ne doit pas générer ni de fumées toxiques ni d'émanations dangereuses. Ces points sont critiques pour des matériaux chimiques tels que les polymères renforcés de fibres.

Les FRP sont très sensibles à l'élévation de température : dès que la température approche celle de transition

vitreuse des fibres, de la matrice ou encore de l'adhésif ( $T_g$ , généralement entre 65 et 100°C pour les matériaux ici traités), le composite se détériore : la rupture des liaisons chimiques rend le renforcement totalement inutile.

En l'absence de données, les PRF sont déclarés inefficaces vis-à-vis de la résistance au feu. Des produits spécifiques d'isolation des PRF ont été développés par des industriels pour leur conférer une tenue au feu. Ils ont été testés lors de simulation d'un incendie sur différentes colonnes en isolation d'une ou deux couches de renforts CFRP ou GFRP (respectivement numérotée 1, 2, 3 et 5 sur la figure suivante) et comparée à une colonne renforcée non isolée (colonne 4) [26]. L'isolant est un mortier contenant des fillers et des hydrofuges spécifiques.



**Figure 7.18:** Tenue au feu pour différents éléments renforcés et isolés par PRF [26]

Les résultats présentés sur la figure précédente démontrent que sans isolant la résistance au feu d'une colonne renforcée est pratiquement nulle alors qu'avec un isolant la tenue au feu de la colonne renforcée permet d'atteindre les niveaux réglementaires d'endurance. Il faut donc adapter le type de fibres, de polymère et d'adhésif en fonction de l'environnement extérieur auquel sera exposé le renforcement et des contraintes mécaniques subies par l'élément en béton. L'inspection et la maintenance sont des aspects clef pour assurer la pérennité des structures renforcées afin de prévenir tout désordre. Une inspection uniquement visuelle n'est pas envisageable car les renforcements masquent les signes de dommages (fissuration, délamination, ...) qui surviennent le plus souvent dans le béton ou à l'interface entre le béton et le renfort. Un suivi par thermographie ou radar est conseillé [28].

### Conclusion

L'étude bibliographique concernant les techniques de renforcement et réhabilitation des structures en béton nous permet de formuler les conclusions suivantes :

- Il existe plusieurs facteurs peuvent jouer un rôle important dans les différents processus de dégradation du béton. Dans de nombreux cas, les dégâts résultent de la combinaison de divers mécanismes (chimiques, physiques et mécaniques). Donc la nécessité d'un renfort est un moyen indisponible.

- Avec l'essor que connaissent les matériaux composites, suite à leurs performances mécaniques, de plus en plus des techniques de renforcement et de réparation de structures de génie civil sont développées et proposées. Le renforcement de béton par matériaux composites, permet d'éviter tous les inconvénients mentionnés au cours de renforcement par les autres méthodes.

- Une grande difficulté dans l'application de PRF consiste à l'adhérence entre les bandes de PRF et la structure en acier ou en béton. Les comportements mécaniques, en particulier le comportement en flexion de la structure renforcée, dépendent fortement du collage, qui, avec les fissures du béton, entraîne rapidement à l'endommagement des PRF. Cela demande d'une matrice à base de résine époxy qui devient aujourd'hui indispensable dans l'utilisation de PRF.

Les PRF offrent des avantages de durabilité significatifs par rapport aux matériaux conventionnels tels que l'acier dans plusieurs domaines, La durabilité des PRF dépend principalement à l'effet des facteurs tels que la température, l'humidité, les rayons ultraviolet, les différents produits chimiques et l'incendie peut mener à des performances insatisfaisantes.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE 7**

[1] DESBIENS V, "restauration de la stabilité et de la rigidité des ouvrages en béton par la méthode de l'injection", thèse de L'EST université du Québec pp 3-4-15-16-19-20-22-23-24.

[2] Guide complément PPRT technique relatif a l'effet de surpression," Recommandations et précautions en vue de réduire les risques", pp 77-78

[3] AFGC, Documents scientifiques et techniques "Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion" pp 39-40-41

[4] RESSE C. et VENAUT M., "Projection des mortiers béton et plâtres, Techniques et applications bâtiment et TP", 1981

[5] ROCHDI El Houssain , "contribution a l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites", thèse de l'université Claude Bernard - Lyon 1 pp16-17

[6] HAMELIN P., "Composite infrastructure applications: concept, design, and durability control and prediction", Journal of Composites Technology and Research, ASTM, 1998.

[7] PIERRE ALEXANDRE BRIEMEL, «simulation numérique de renforcement de structures en béton armé par des renforts en fibres végétal et comparaison au renforcement par des fibres de carbone».

[8] <http://www.st-ds.net/beton/info/lois-comportement-beton-acier.html>

[SIK\_06] SIKA FRANCE S. A. Notice technique sikadur 330 [en ligne]. Disponible sur: <http://www.sika.fr/construction/document/nt/nt997.pdf> [consulté le 03.01.2006].

[9] TAOUCHE F, HANNACHI N, AIT TAHAR K, «influence du type de renfort sur la pression latérale de confinement», UniversitéMouloud Mammeri de Tizi ouzou – Algérie.

[10] RICHARD MARANDA., " Analyse par éléments finis de poteaux mixtes avec section d'acier en I de classe 4". Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise en sciences appliquées (génie civil), école polytechnique de Montréal, décembre 1998.

[11] GHERNOUTI. Y, «conception et analyse mécanique de confinement des éléments cylindriques du béton à renfort mixte», thèse doctorat, UMBB. F.S.I. 2009.

[12] RICHART F.E., BRANDTZAEG A et BROWN R.L., "A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses". University of Illinois, Engineering Experimental Station, Urbana, Bulletin no 185, 104 p. 1928.

[13] MASTER BUILDERS, Inc. and Structural Preservation Systems. (1998) "M Brace Composite Strengthening System: Engineering Design Guidelines", 2nd edition. Cleveland, OH: Master Builders, Inc

[14] DANIEL MONGEAU., "Effet des étriers à haute limite élastique sur le comportement des poteaux en béton a haute performance". Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, spécialité : génie civil, université de scherbrook, août 1996.

[15] FAM A. Z et RIZKALLA S. H., "Behavior of axially loaded concrete-filled circular fiber-reinforced polymer tubes". ACI structural Journal, Vol. 98, No. 3, pp 280-289. 2001.

[16] PARK R et PAULAY T., "Reinforced Concrete Structures", John Wiley and Sons, New York, N.Y, 2 1-23 pp. 1975.

[17] PRIMIS G., FERRIER E., HAMELIN P. (2009) – Effect of external FRP retrofitting on reinforced concrete short columns for seismic strengthening – Composite Structures, Vol.88, p. 367 – 379.

[18] TASTANI S.P., PANTAZOPOULOU S.J. (2008) – Detailing procedures for seismic rehabilitation of reinforced concrete members with fiber reinforced polymers – Engineering Structure, Vol. 30, p. 450 – 461.

[19] PARVIN A., Jamwal A.S. (2005) - Effects of wrap thickness and ply configuration on composite-confined concrete cylinders. – Composite Structure, Vol.67, p. 437 – 442.

[20] LAU K-T., L-M. ZHOU (2001) – The mechanical behaviour of composite-wrapped concrete cylinders subjected to uniaxial compression load – Composite Structures, Vol.52, p. 189 – 198.

[21] Li G., KIDANE S., PANG S-S., HELMS J.E., STUBBLEFIELD M.A. (2003a) – Investigation into repaired RC columns – Composite Structures,.

[22] SHRIVE P.L., AZAMEDJIAD A., TARDOS G., MCWHINNIE C. and SHRIVE N.G. (2003) - Strengthening of concrete columns with carbon fibre reinforced polymer wrap. – Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 30, p.543-553.

[23] ROCHETTE P, LABOSSIÈRE P. (2000) - Axial testing of rectangular column models confined with composites – Journal of Composite Construction, ASCE, Vol. 4, Issue 3, p.129–136.

[24] DAUDEY X, "évaluation et renforcement sismique de piles de pont en béton armé" conçues selon les prescriptions prévalant avant 1971 pp 94-95-96

[25] PHILIPPE DUQUETIE, " Renforcement en flexion des poutres en béton armé à l'aide de plaque en matériaux composites réalisées in situ", février 1998.

[26] GREEN M.F., BISBY L.A., FAM A.Z., KODUR V.K.R. (2006) – FRP confined concrete columns: Behaviour under extreme conditions - Cement and Concrete Research, Vol. 28, p. 928-937.

[27] BELARBI A., BAE S-W. (2007) – An experimental study on the effect of environmental exposures and corrosion on RC columns with FRP composite jackets – Composites - Part B: Engineering, Vol. 38, p. 674 – 684.

[28] ARYA C., CLARKE J.L., KAY E.A., O'REGAN P.D. (2002) – TR 55: Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials; a review- Engineering Structures, Vol. 24, p. 889-900.

# CHAPITRE 8

## Généralités sur le béton a haute performance (BHP)

---

## Généralités sur le béton a haute performance (BHP)

---

### 8-1. INTRODUCTION

La résistance à la compression est généralement considérée comme la principale propriété caractéristique du béton. Depuis la découverte du béton armé, les études ont été axées sur la recherche de méthodes permettant de renforcer cette résistance. Des progrès considérables ont été enregistrés dans ce domaine au cours de ces dernières décennies. Aux Etats-Unis, durant les années 1950, une résistance à la compression de 35 MPa était considérée comme une résistance élevée. Dans les années 1970, la limite a été portée à 70 MPa, alors qu'en 1990, la notion de béton à haute résistance était réservée à un béton d'une résistance à la compression comprise entre 80 et 100 MPa. Et cette évolution n'est pas terminée ! Des résistances à la compression supérieures à 120 MPa ont été réalisées lors de constructions récentes. La notion de 'haute résistance' est dès lors très relative et, de toute évidence, évolutive. Il n'est dès lors pas étonnant que coexistent plusieurs définitions du 'béton à haute résistance'. Selon la norme européenne EN 206-1, le béton est considéré comme un 'béton à haute résistance' à partir d'une classe de résistance de C55/67. Le premier nombre derrière la lettre C fait référence à la résistance à la compression caractéristique mesurée sur des cylindres de 300 mm de hauteur et d'un diamètre de 150 mm, et le deuxième nombre, à la résistance à la compression caractéristique mesurée sur des cubes de 150 mm de côté [3].

L'augmentation de la résistance à la compression du béton s'accompagne fréquemment de l'amélioration d'autres propriétés, comme la résistance à la traction, la rigidité, la résistance à l'usure, la durabilité, etc. Pour certaines applications, ces propriétés peuvent même être plus essentielles que le niveau de résistance atteint. Dans pareil cas, le choix des composants et de la composition ne doit pas être axé sur l'obtention d'une résistance maximale, mais davantage sur l'obtention d'une prestation optimale des propriétés souhaitées. La résistance supérieure obtenue est une incidence de second ordre. En effet, le contenu de l'expression 'béton à haute résistance' s'avère insuffisant. De préférence dès lors l'appellation 'béton à hautes

performances', qui est clairement plus générale. Il est parfaitement possible d'obtenir un béton présentant des hautes performances pour une propriété donnée, tout en ne possédant pas une résistance nettement supérieure. C'est ainsi que le béton autocompactant a été initialement décrit au Japon comme un béton à hautes performances, en raison de son ouvrabilité exceptionnelle et de sa (très probable) amélioration au niveau de la durabilité. Le béton autocompactant ne doit cependant pas nécessairement être un 'béton à haute résistance' [4,5].

## 8-2 DÉFINITION D'UN BÉTON À HAUTE PERFORMANCE

Le béton à haute performance n'est pas un matériau révolutionnaire, car il contient exactement les mêmes constituants que le béton ordinaire. Les constituants de ce nouveau matériau sont : Les granulats ordinaires quoique de bonne qualité, du ciment Portland ordinaire (ciment Portland à haute résistance initiale), lorsque des résistances élevées au jeune âge sont nécessaires à un dosage important de (450 à 550 kg/m<sup>3</sup>), et il est constitué aussi par la fumée de silice (généralement de 5 à 15% de la masse totale du liant) , et parfois par d'autres ajouts minéraux comme des cendres volantes; ou du laitier de haut fourneau granulé broyé...etc. : toujours du super plastifiant, le dosage en varie entre 5 et 15 litres par mètre cube de béton selon la teneur en matières sèches et sa nature ; un tel dosage permet de réduire la quantité d'eau du béton de 45 à 75 kg /m<sup>3</sup>. 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 si un bon mûrissement humide est nécessaire.

Généralement le béton à haute performance se différencie à des autres bétons par son très faible rapport eau/ciment : toujours inférieur à 0,3 quelquefois ne dépassant pas 0.25 et occasionnellement 0.20 [6].

## 8-3 HISTORIQUE

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) sont apparus il y a environ une vingtaine d'années. De résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 70 MPa, ils présentent un squelette granulaire conventionnel noyé dans une matrice de compacité accrue grâce à l'utilisation de superplastifiants (réducteurs d'eau) et des produits ultrafins amorphes ou cristallisés jouant à la fois un rôle de complément granulaire et pouzzolanique. En plus de la fumée de silice jusqu'alors reconnue comme jouant le mieux ce rôle, d'autres ultrafins (laitier, métakaolin, cendres volantes ...) peuvent être utilisés.

Avant 1980, les (BHP) Bétons à Hautes Performances ou BHR (Bétons à Hautes Résistances) était uniquement produits en laboratoire. Cette situation a beaucoup évolué vers les années quatre vingt, avec l'arrivée des superplastifiants et des fumées de silice. En effet, vers 1970,

les restrictions environnementales ont contraint les industries de ferro-silicium à collecter la poussière de leurs cheminées. Comme conséquence, ces fumées se sont retrouvées dans l'industrie du béton.

De résistance en compression de l'ordre de 50 MPa, les BHP ont été utilisés pour la première fois en 1984 dans la construction d'un petit pont.

De nos jours, la production de bétons de résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 100 MPa est très fréquente dans bons nombres de laboratoires dans le monde et, leur utilisation sur les chantiers commence à se développer.

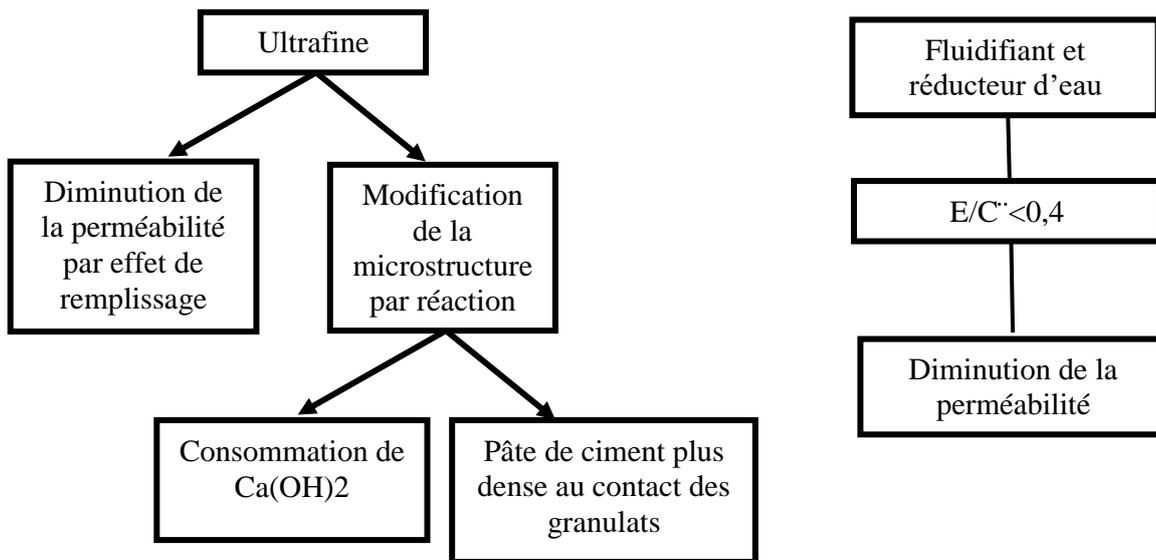
L'emploi des BHP permet d'envisager la réalisation d'ouvrages ou d'éléments en béton de sections réduites ou de plus grandes portées et donc des gains en poids et en matières intéressants. Elle permet aussi d'envisager dans certains cas, le remplacement d'autres matériaux tels que le bitume, l'acier ou le bois par le béton et d'ouvrir de nouveaux marchés à ce dernier (constructions multiétagées en Amérique du Nord, viaducs sophistiqués en France, revêtements routiers aux États Unis).

D'autres aspects non liés à la résistance et la durabilité (propriétés très connues des BHP) ont été soulignés par Aïtcin [4] pour l'utilisation bénéfique de BHP dans le futur. En effet, les BHP offrent des propriétés recherchées, avec peu de matériaux. Ils sont donc plus économiques en matériaux naturels que les bétons classiques. cependant l'utilisation des ultrafines.

L'utilisation des ultrafines dans la fabrication des BHP est devenue alternative indispensable pour l'amélioration de la microstructure et de la résistance mécanique, ainsi que la durabilité de ces bétons.

Ces particules ultrafines, généralement des fumées de silice condensées sont des sphères de petites dimensions (granularité entre 0.02 et 1 $\mu$ m, diamètre moyen d'environ 0.4 $\mu$ m) comparées à celles des grains de ciment (granularité entre 1 et 80 $\mu$ m, diamètre moyen d'environ 15 $\mu$ m). Le remplacement d'une partie de ciment par la fumée de silice permet d'augmenter la compacité, et particulièrement dans la zone de transition entre la pâte durcie et les granulats parce qu'elle comble les vides d'empilements entre les composants granulométriques plus grossiers du mélange.

L'incorporation des fumées de silice permet d'une part, de réduire fortement la porosité initiale de la pâte de ciment du béton ; qui est un effet de remplissage, et d' autre part elles ont un effet pouzzolanique qui est dû a leur réaction avec Ca(OH)<sub>2</sub>, [7] .



**Figure 8-1 :** Caractéristiques microstructurales du BHP par rapport au béton ordinaire [7]

Les ultrafines, et particulièrement les fumées de silice, représentent un constituant majeur et indispensable dans les bétons à haute performance, et par conséquent ces matières fines, sont très coûteuses dans le marché de Génie Civil.

La contrainte économique ajoutée au non -disponibilité de cette matière, nous à pousser à rechercher d'autres matières qui peuvent remplacer, les fumées de silice.

Les ajouts minéraux inertes et actifs représentent une bonne alternative pour jouer ce rôle. Cette tendance a été confirmée par plusieurs auteurs dans d'autres pays; P.C AITCIN a conclu que 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.

En poussant au maximum le broyage (7500-10000cm<sup>3</sup>/g), ces ajouts peuvent être extra ultrafines, et jouent un rôle très proche de celui des fumées de silice non disponibles dans notre pays.

En Algérie, la technologie des BHP demeure encore à l'état embryonnaire et l'utilisation de ce matériau n'a pas encore dépassé le 7% [8] .Cependant les horizons et les perspectives de l'évolution de ce matériau sont encourageantes.

## 8-4 CLASSES DE BÉTONS

Les BHP sont souvent classés selon leur résistance caractéristique à la compression à 28 jours  $f_{C28}$  en MPa. C'est ainsi que les spécialistes distinguent :

- Bétons ordinaire 20 à 50 MPa.
- Bétons à hautes performances 50 à 100 MPa.
- Bétons à très hautes performances 100 à 150 MPa.
- Bétons exceptionnels  $\geq$  150 MPa.

Les BHP nécessitent l'emploi du ciment choisi, type HPR. Dosé à environ 400kg/m<sup>3</sup>, leur fabrication suppose l'utilisation d'adjuvants réducteurs d'eau qui permettent de maintenir le rapport E/C à des valeurs comprises entre 0.35 et 0.40 tout en garantissant une bonne maniabilité n'est pas utile d'utiliser des granulats spéciaux à condition que ceux-ci soit propres. Les BTHP sont obtenus en réduisant le rapport E/C à des valeurs de l'ordre de 0.20 à 0.35, ceci implique l'emploi de super plastifiants réducteurs d'eau à dosage élevé. Tous les composants du béton doivent être de bonne qualité. Il devient nécessaire d'utiliser de ultrafines telles que les fumées de silice, les granulats doivent être résistants de forme cubique ou sphérique, et ils présentent un module d'élasticité proche de celui de la pâte durci pour réduire les déformations différentielles entre granulats et matrice de béton. Il semble préférable de retenir des granulats de 10 à 12 mm de dimension maximale.

Les bétons exceptionnels, de résistance supérieure à 150MPa, ne sont encore fabriqués que dans un laboratoire. Un béton de 280 MPa a été obtenu dans un laboratoire avec un E/C= 0.16 [4].

## 8-5 CHOIX DES MATERIAUX

### 8-5-1 LE CIMENT

La compatibilité entre le superplastifiant et le ciment est un facteur très important pour le choix du ciment. La finesse du ciment et sa composition chimique peuvent affecter le comportement du superplastifiant. Il est nécessaire de faire des essais sur coulis ou sur mortier pour le choix du superplastifiant. Les ciments à temps de prise très longue sont à éviter, des dosages élevés en superplastifiant ne permettent pas le démoulage même après 24 heures.

L'obtention de bonnes résistances mécaniques dépend de la finesse de mouture du clinker. On augmente ainsi la proportion d'hydrates dans le ciment durci. La finesse du ciment confère au béton une résistance précoce. La surface spécifique Blaine doit être de l'ordre de 3 500 à 4 000 cm<sup>2</sup>/g.

Cependant, l'augmentation de cette surface conduit à l'obtention d'un ciment à très forte teneur en fines donc à forte chaleur d'hydratation et par suite il y a risque de prise instantanée. Ce phénomène induit des contraintes d'origine thermique et donc des fissurations de peau dans des pièces massives. En outre, du point de vue de l'obtention d'une forte compacité dans les BHP, les particules les plus fines du ciment ont des interactions granulaires néfastes avec les grains d'ultrafines. En règle générale, il est recommandé de limiter la taille inférieure des grains de ciment à 1  $\mu$ m. Certaines études avaient préconisé l'utilisation des laitiers ultrafins et des ciments au laitier pour diminuer la chaleur d'hydratation, maintenir la maniabilité et améliorer la durabilité.

Les dosages préconisés pour les BHP sont compris entre 350 et 600 kg/m<sup>3</sup> suivant la résistance projetée et le coût comparé de l'ultrafine.

Le dosage en eau conduit à des rapports eau/ (ciment + ultrafine) compris entre 0,2 et 0,3. Si on veut atteindre des résistances élevées, il est important de réduire au plus bas rapport tout en gardant une maniabilité convenable. Un rapport E/C de 0,35 représente à peu près la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation du ciment. Ce qui signifie qu'un volume assez important de grains de ciment reste anhydre dans un BHP et ceci même à long terme. Le ciment en plus de sa fonction liante joue aussi le rôle d'un granulat inerte de petite dimension [9]. Le choix du ciment fait intervenir à la fois des critères rhéologiques et des critères de résistance mécanique.

### **8-5-2 LES GRANULATS**

Les granulats occupent environ 70 % du volume du matériau et, à ce titre interviennent directement sur les propriétés du béton à l'état frais comme à l'état durci. Ils semblent même plus sollicités dans les BHP que dans les bétons classiques. D'une manière générale, les qualités demandées aux granulats pour l'obtention des BHP concernent essentiellement la forme et l'état de surface, la porosité, la granularité, les propriétés mécaniques et la nature minéralogique.

#### **a- forme et état de surface**

La forme intervient directement sur la compacité propre du béton. La rugosité de la surface favorise l'imbrication de la pâte de ciment. Les granulats concassés à coefficient de forme élevé sont préférés aux granulats roulés lisses (adhérence plus élevée).

Le coefficient de forme est le rapport du volume effectif du granulat sur le volume de la sphère circonscrite. Plus il sera élevé, meilleure sera la compacité. En outre, les formes très anguleuses sont très néfastes quant à l'obtention des bonnes résistances, elles poinçonnent la matrice lors d'une sollicitation.

En effet, lorsque le béton est soumis à une sollicitation de compression, on peut assimiler les granulats à des plateaux de compression d'une presse et, la matrice se trouve donc poinçonnée. Les granulats lisses favorisent la détérioration rapide de la liaison granulat – pâte très haute performance.

#### **b- porosité**

Les granulats poreux (avec une porosité communicante) modifient la consistance du matériau par absorption d'eau dans le malaxeur. Il est recommandé d'utiliser des granulats de coefficient d'absorption inférieur à 1 %.

#### **c- nature minéralogique**

Elle est caractérisée par la résistance mécanique des grains, la texture (la rugosité de surface) et la possibilité des réactions à l'interface granulat – pâte de ciment.

Les granulats présentant des risques de réactions alcali – granulat sont à proscrire car ces réactions détruisent l'étanchéité des enceintes et la stabilité à long terme des ouvrages. La présence des poussières ou d'argile sur les granulats réduit l'adhérence et exige une augmentation de la teneur en eau entraînant une chute des résistances.

#### **d- granularité**

C'est elle qui régit la compacité du mélange et sa maniabilité. Les dosages en ciment dans les BHP étant élevés, il n'y a pas intérêt à utiliser des sables fins, Alaejos Gutierrez et al. [10] recommandent le sable de rivière qui réduirait la demande en eau. Dutruel [11] recommande de limiter la dimension maximale du gros granulat à 12 mm pour avoir des résistances élevées. Metha et al. [12] sans s'y opposer, recommandent les granulats de dimension maximale comprise entre 20 et 25 mm ; Addis et al. [13] avaient trouvé que la résistance du tait avec la dimension du gros granulat entre 13,5 et 26,5 mm ; Alaejos Gutierrez et al. [14] ont affirmé qu'on obtient les meilleurs résultats avec des granulats de dimension maximale comprise entre 13 et 14 mm et un coefficient Los Angeles inférieur à 15. De Larrard a recommandé un rapport gravier/sable (G/S) compris entre 1,5 et 2 [4].

### **8-5-3 LES SUPERPLASTIFIANTS**

#### **8-5-3-1 INTÉRÊT DE LEUR UTILISATION**

La maniabilité des bétons classiques dépend essentiellement du dosage en eau. Malheureusement, l'augmentation de la teneur en eau conduit à la modification des propriétés du béton : à long terme, chute des résistances mécaniques, porosité accrue et donc durabilité réduite ; à court terme, ségrégation accrue et perte d'homogénéité du matériau.

Les BHP sont définis par trois critères : résistance, durabilité et ouvrabilité. Aitcin et al. [4] ont pensé que les aspects les plus importants à développer sont la fluidité et la capacité de mise en oeuvre. Ces suggestions nécessitent l'utilisation des superplastifiants qui peuvent procurer au béton d'excellentes fluidité et résistance à la ségrégation grâce à leur propriété dispersante. Ils permettent de défloculer les grains de ciment ayant tendance à se regrouper en grappes une fois introduits dans l'eau. Leur rôle est donc essentiellement de modifier l'équilibre des forces existant entre les particules de ciment.

Les trois propriétés des BHP citées ci-dessus sont encore améliorées lorsque les superplastifiants sont associés à d'autres produits tels que la fumée de silice, le métakaolin, les cendres volantes, le laitier.

### **8-5-3-2 Les superplastifiants: état actuel des connaissances**

La tendance actuelle est de les classer d'après leur composition et leur mode de préparation en quatre catégories [15] :

- 1ère catégorie : lignosulfonates de calcium ou de sodium modifiés (LMS)

On sait que les lignosulfonates proviennent de l'industrie de la pâte à papier. Ce sont des produits tensio-actifs utilisés comme réducteurs d'eau. On peut les utiliser comme fluidifiants à condition d'opérer une sélection (poids moléculaire élevé, faible teneur en sucre) et de faire subir un certain nombre de traitements : précipitation, neutralisation, ultrafiltration (pour augmenter le poids moléculaire), fermentation (pour éliminer les sucres). Cet adjuvant est commercialisé sous la forme d'un liquide de couleur brun foncé de pH environ 7.5.

- 2ème catégorie : condensé de mélamine sulfonate et de formaldéhyde (MSF) Ce superplastifiant résulte de la réaction entre une résine de mélamine et du formaldéhyde, suivie d'une sulfonation avec une solution bisulfite de sodium. On obtient par polymérisation un « polycondensé » d'un poids moléculaire voisin de 30000. Ce produit est disponible soit à l'état de poudre, soit en solution aqueuse à 20 % d'extrait sec.

Le plus souvent, c'est sous forme liquide qu'il est utilisé : liquide clair, légèrement laiteux, ne contenant ni sucre, ni chlorure, de pH est compris entre 8 et 9.

-3ème catégorie : condensé de naphthalène sulfoné et de formaldéhyde (NSF)

Il résulte de la réaction entre le naphthalène et le formaldéhyde, suivi d'une sulfonation et d'une neutralisation par la soude caustique. Les produits commerciaux se présentent sous la forme d'une solution aqueuse de 20 à 40% d'extrait sec, de couleur brune (pH d'environ 9).

- 4ème catégorie : nouvelles molécules à base de polymères carboxyliques

Ce sont des adjuvants non chlorés d'une nouvelle génération chimique à base de polymères acryliques, carboxyliques. Le groupe actif anionique est COO- .

Ces polymères ne contiennent pas de groupes sulfoniques, avec leurs molécules de longues chaînes latérales et un poids moléculaire élevé ( $\approx 40000$ ) arrivent à réduire l'eau d'environ 30 à 40 %, leur particularité est le maintien de l'ouvrabilité durant de longues heures sans provoquer d'effet retardateur .

La figure (8-2) permet de privilégier soit l'action « réduction d'eau » ou « l'effet fluidification » ou bien les deux, ensemble.

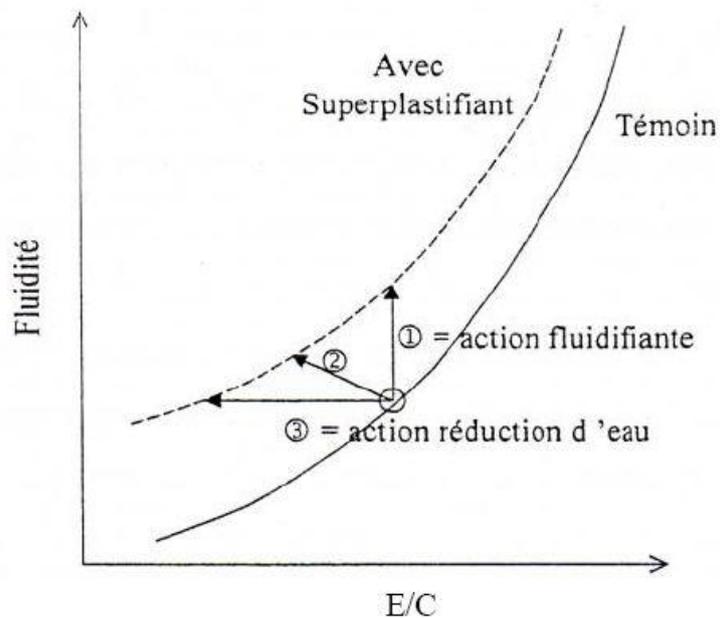


Figure 8-2: l'action « réduction d'eau » ou « l'effet fluidification » ou bien les [15]

### 8-5-3-3 mécanisme de dispersion

Les grains de ciment Portland présentent un grand nombre de charges électriques sur leurs surfaces, si bien que lorsqu'ils rentrent en contact avec un liquide aussi polaire que l'eau, ils ont tendance à flocculer (représentation schématique sur la figure 8-3).

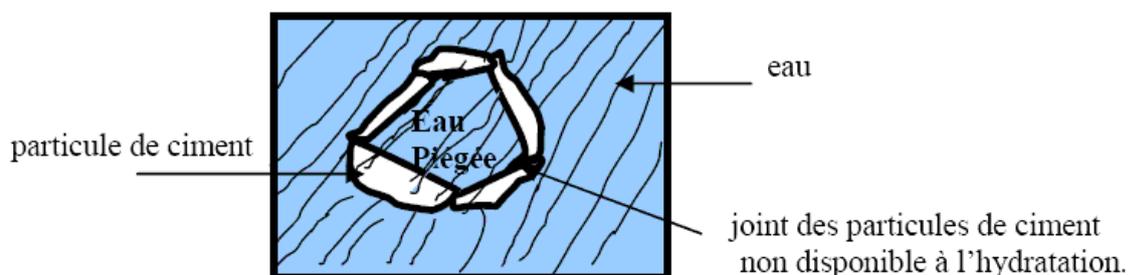


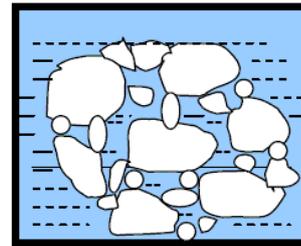
Figure 8-3 : Floculat de ciment en l'absence de superplastifiant [4]

La figure 8-3 montre l'influence d'un superplastifiant sur les amas de ciment. Suite à la défloculation, une dispersion des bulles d'air et en parallèle une lubrification par adsorption sur les parois des grains sont observées.

Les superplastifiants de deuxième génération sont les plus efficaces. Ils améliorent la dispersabilité, permettent une stabilité de dispersion à long terme, une excellente ouvrabilité et une résistance à la ségrégation. Leur action dispersive est essentiellement due à la répulsion électrique.

a) Sans superplastifiant :

Colonies de grains de ciment non défloculés, cohésion capillaire par rétention de bulles d'air.



Bulles d'air éliminées

b) avec superplastifiant :

Les molécules, sont adsorbées par les grains de ciment basique, l'air s'élimine, d'où la défloculation capillaire, facilitée par abaissement de la tension aux interfaces.

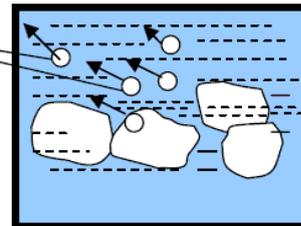


Figure 8-4: Mécanisme de floculation avec et sans superplastifiants [ 4 ].

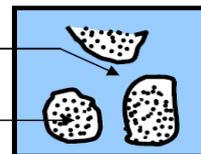
### 8-5-3-4 mécanisme de réduction d'eau

La figure (8-6) montre le mécanisme de réduction d'eau avec et sans superplastifiant

a) Sans superplastifiant :  
L'eau joue le rôle d'un lubrifiant simplement visqueux.

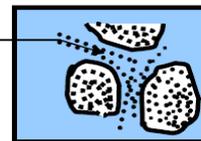
Eau nécessaire à la  
lubrification visqueuse.

Grain de ciment



b) Sans superplastifiant :  
On a adsorption, à la paroi des grains, des molécules longues du composé polaire - apolaire jouant le rôle de lubrifiant onctueux.

Eau pléthorique



c) Avec superplastifiant et diminution de l'eau excédentaire :  
Lubrification onctueuse maintenue.

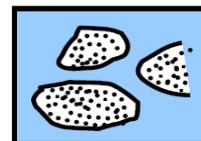


Figure 8-5: Mécanisme de réduction d'eau avec et sans [4]

### 8-5-3-5 Effets des superplastifiants à long terme

La résistance des bétons a longterm a été limitée car on ne peut pas augmenter indéfiniment les dosages de ciment sans prendre d'autres risques. Avec l'aide des superplastifiants, on va pouvoir baisser considérablement la teneur en eau des bétons tout en hydratant mieux le ciment disponible ; le résultat est une augmentation des résistances finales.

Le béton d'enrobage qui est la surface de contact avec le milieu extérieur doit faire l'objet d'une grande attention, car cette surface est susceptible de se dégrader sous l'influence de certains facteurs tels que : le manque de compacité, la perméabilité, les facteurs climatiques ou les agressions chimiques tel que le CO<sub>2</sub>. Les superplastifiants sont là pour limiter grandement ces risques, notamment en augmentant la compacité des bétons et en protégeant les armatures pour un meilleur enrobage.

### 8-5-3-6 conséquences sur l'hydratation du ciment

Uchikawa et al. [16], Jolicoeur et al. [17] ont montré que les superplastifiants à base de naphthalène pouvaient réagir avec les particules de ciment à forte réactivité, en particulier avec le C3A, et réduire la vitesse d'hydratation de la surface. D'après Uchikawa et al. [16], les Figure 8-5: Mécanisme de réduction d'eau avec et sans [4] superplastifiants à base de naphthalène sont plus adsorbés par les phases interstitielles et la chaux que par les silicates de calcium. L'effet retardateur du superplastifiant est proportionnel à son dosage et généralement accentué par une faible concentration en C3A. Ils ont suggéré que des temps de prise prolongés et des faibles résistances initiales apparaissent pour de faibles concentrations en C3A, puisque de faibles quantités de superplastifiant peuvent réagir avec le C3A laissant ainsi une grande quantité de cet adjuvant être absorbée par d'autres phases minérales (C3S) et réduisant ainsi leurs vitesses de réaction de surface. Pour les ciments contenant une concentration normale en C3A, un effet retardateur peut apparaître si de grandes quantités de superplastifiants sont utilisées. On constate alors que pour un dosage de superplastifiant donné, les concentrations élevées en C3A réduisent le temps de prise, et sont préjudiciables pour la résistance des BHP face aux sulfates [4].

## 8-5- 4 LES AJOUTS CIMENTAIRES

On peut fabriquer des BHP en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant, la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts cimentaires lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du

point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et parfois du point de vue résistance

#### **8-5-4-1 ACTION DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LES MATÉRIAUX CIMENTAIRES**

La norme européenne EN 206-1 (NF P 18-325) de Février 2002 définit les additions comme des « matériaux minéraux finement divisés utilisés dans le béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières ». L'action des additions concerne aussi bien l'état frais que l'état durci du béton. En premier lieu, à l'état frais, la présence des additions modifie la structure du squelette granulaire du matériau et les frictions entre les composants de la suspension solide dans la phase liquide. En second lieu, au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment et peuvent modifier la structuration des produits hydratés. En troisième lieu, certaines additions ont la capacité de réagir chimiquement en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant additionnel à celui résultant de l'hydratation du ciment et que les anglo-saxons précisent sous le terme de « supplementary cementitious materials ». De plus, ces différents aspects de l'action des additions peuvent intervenir de manière simultanée, rendant particulièrement difficile l'évaluation de la contribution des additions minérales aux performances des matériaux cimentaires. Toutefois, pour une première analyse de l'action des additions minérales, nous pourrions distinguer trois principaux effets :

- un effet granulaire engendré par la capacité d'empilement des particules de l'addition et par l'intensité des frictions entre les particules de l'addition avec les autres grains solides du mélange. Cet effet agit essentiellement sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais et peut influencer sur le développement et l'intensité des deux autres effets des additions.
- un effet physico-chimique et microstructural engendré par les interactions entre les particules de l'addition et l'évolution du processus d'hydratation du ciment ainsi que par les modifications de la structuration de la matrice cimentaire. Il agit sur l'évolution du processus d'hydratation du ciment et sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires.
- un effet chimique engendré par la capacité de certaines additions caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques à réagir en milieu cimentaire. Il agit sur le volume et la nature des produits hydratés formés. Cet effet est complémentaire à l'effet physico-chimique et microstructural. Ils peuvent donc être associés dans une notion unique

plus large qui est celle de la contribution des additions à l'activité liante du ciment. Par ailleurs, la normalisation actuelle distingue les additions en deux types : celles quasiment inertes (de type I) et celles à caractères pouzzolaniques ou à caractères hydrauliques latents (de type II). Elle permet la prise en compte dans la formulation de certaines additions en présence de ciments de type CEM I par le biais d'un coefficient forfaitaire  $k$ . Cependant, elle ne propose pas de méthodologie expérimentale permettant d'élargir le concept de coefficient  $k$  à de nouveaux couples ciment addition. A l'issue de notre analyse critique des textes normatifs et des études actuelles sur la prise en compte des additions minérales dans la formulation, il est montré que l'évaluation quantitative précise de la contribution liante des additions rend nécessaire la maîtrise de l'effet granulaire et le maintien de la compacité du squelette solide des mélanges lorsque des additions sont introduites.

#### **8-5-4-2 LES FILLERS CALCAIRES**

Les fillers calcaires sont des ajouts cimentaires non hydrauliques (inertes), mais qui peuvent se révéler d'une grande efficacité dans l'utilisation pour les bétons de masse. Par effet filler, ils peuvent en effet améliorer la compacité du squelette granulaire dans les bétons, et par leur relative inertie chimique ils peuvent contribuer à diminuer sensiblement la température dans les bétons de masse.

La norme AFNOR (NF P 15-301) permet de substituer jusqu'à 35 % de filler calcaire au ciment portland. (Aitcin et al, 1998) [18] estiment qu'en plus de son rôle principal, qui est de densifier la matrice de mortier, le filler calcaire aurait une certaine réactivité chimique qui contribuerait à augmenter les résistances en compression par la formation de carboaluminates (De larrard F. 1988) [19] ont observé que l'ajout de  $(CaCO_3)$  au  $(C_3S)$  accélère l'hydratation du ciment. (De larrard et al.1990) [20], estiment aussi que les fillers fins comme le calcaire, accélèrent les premières réactions d'hydratation. Ces dernières études confirment l'effet non négligeable des fillers calcaires sur l'hydratation du ciment au jeune âge.

Le calcaire se compose principalement de carbonates de calcium  $(CaCO_3)$ , dans des proportions suivantes de 56.03 % de  $(CaO)$  et de 43.97 % de  $(CO_2)$ . Le carbonate de calcium engendre les minéraux de calcite. La calcite sous forme cristalline la plus stable et la plus courante de  $(CaCO_3)$ .

### 8-5-4-3 LE SABLE DE DUNE FINEMENT BROYÉE :

Les caractéristiques des bétons sont régies par l'hydratation du ciment, cette dernière peut être modifiée par l'incorporation d'ajout du sable de dune finement broyé qui conduisent à la formation d'hydrosilicates supplémentaires issues de la fixation de la portlandite par les ultrafines particules de silice, ce dernier va remplir les pores, en effet ce processus a une influence directe sur le squelette de la pâte du ciment et du béton et permet au béton de diminuer les possibilités de pénétration des agents agressifs externes, on obtient ainsi des bétons plus durables (figure 1-7).

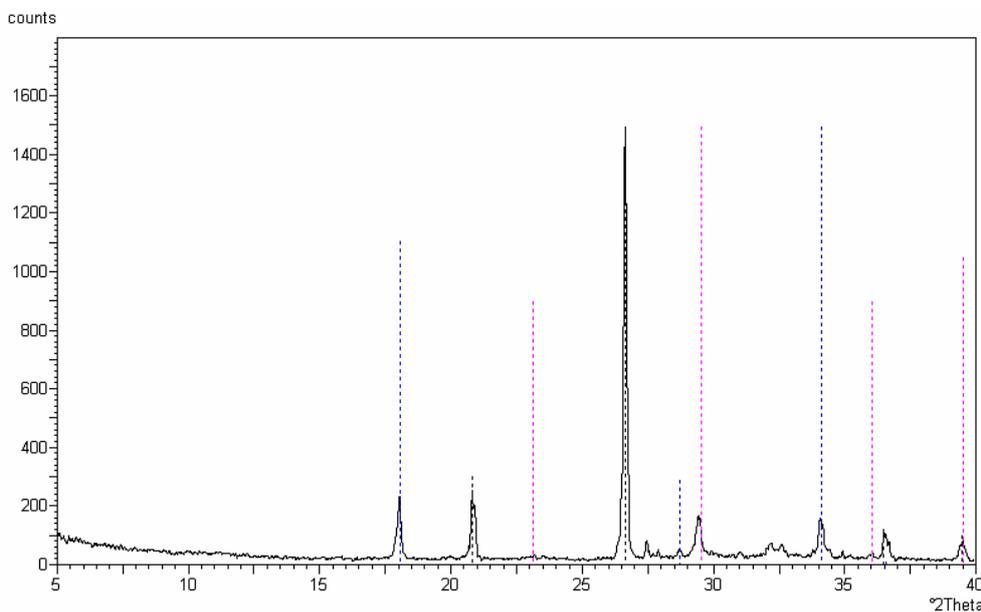


Figure 8-6:L'analyse par ( DRX)n du sable de dune, d'après [22]

### 8-5-4-4 LA POUZZOLANE

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers : Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction des réactions alcalins-agrégats et du retrait au séchage. Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment. Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland.



A l'état frais, les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration. A l'état durci, les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables :

- accroissement de la résistance finale.
- réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces. En effet, les eaux naturelles contiennent souvent du gaz carbonique libre. Celui-ci s'attaque à l'hydroxyde de calcium contenu dans la pâte de ciment en le solubilisant, Il en résulte une augmentation de la porosité et donc une diminution générale de la résistance.

Les pouzzolanes et les laitiers ont une particularité commune. Ils renferment à des teneurs différentes - les trois constituants fondamentaux du clinker sont la chaux (CaO), la silice (SiO<sub>2</sub>) et l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Il en résulte la possibilité de caractériser leur composition en fonction de ces trois oxydes par un point ou par une zone limitée dans la représentation triangulaire de RANKIN figure (8-7).

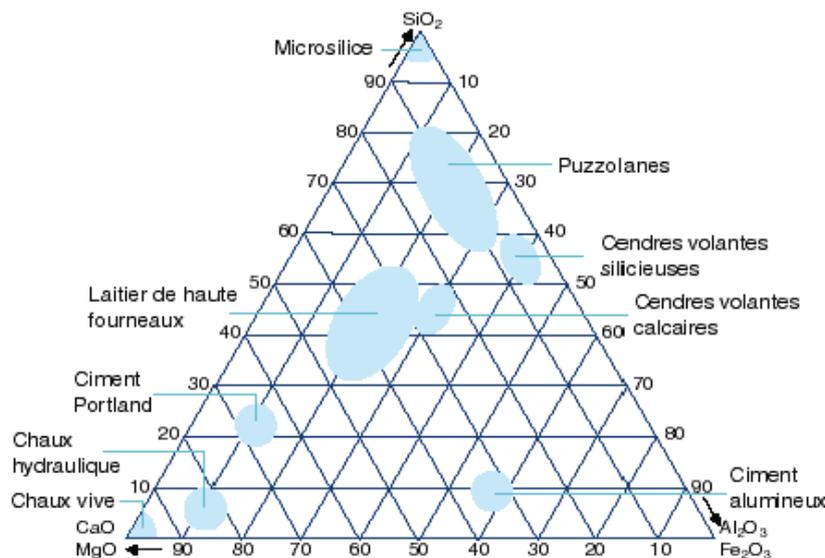


Figure 8-7 : Diagramme ternaire (de RANKIN) CSA [23]

### 8-5-4-5 LE LAITIER

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte dans le haut fourneau à partir de minerai de fer (les oxydes  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  en proportions variables), de coke et éventuellement d'un fondant. On le recueille liquide vers  $1550^\circ\text{C}$  au-dessus de la fonte (gravitation de la fonte en fusion). Le laitier et les cendres volantes entraînent un accroissement de la porosité et de la taille aux premiers âges à cause d'un ralentissement des réactions d'hydratations figure (8-8). A plus long terme, sous l'effet de la réactivité hydraulique du laitier ou de l'activité pouzzolanique des cendres, les effets de l'hydratation du clinker sont renforcés ce qui conduit à une porosité bdu même ordre mais à une diminution de la taille des plus gros pores. Ces résultats positifs ne sont obtenus que si l'humidité de conservation est suffisamment élevée pour permettre la réaction des additions minérales

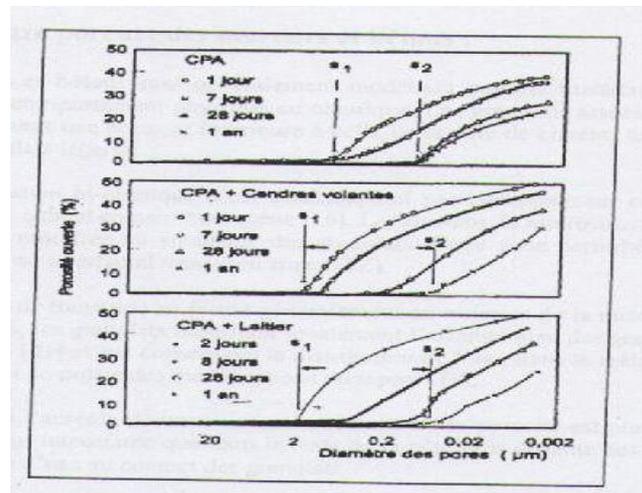


Figure 8-8 : Influence minérale sur l'évolution de la structure poreuse des pâtes de ciment au cours du temps [26].

### 8-5-4-6 LA FUMÉE DE SILICE

Également appelées « fumées de silice » ou « poussières de silice » ou encore « microsiline », les fumées de silice sont un sous-produit de l'électrométallurgie du silicium et de ses alliages. On charge un four avec du quartz, de la houille et parfois des copeaux de métal. L'ensemble est porté à une très haute température ( $1500\text{-}2000^\circ\text{C}$ ) par des arcs électriques. On obtient d'une part le silicium liquide et d'autre part des gaz chargés de poussières dont certains s'oxydent à l'air libre pour donner des fumées de silice.

En tant que sous-produits industriels, leur nature ne fait l'objet d'aucun contrôle lors de sa fabrication. Leurs caractéristiques physico-chimiques peuvent être assez dispersées, non seulement d'une usine à l'autre mais encore à l'intérieur même d'une unité de fabrication : la fumée de silice est un matériau très variable [32].

## 8-6- Formulation des BHP

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. En effet, les dimensions et les volumes des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité. L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire.

❖ **La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes :**

### **1. Détermination d'une formule théorique prévisionnelle :**

- sélection des constituants en fonction de l'expérience locale ;
- détermination des proportions des constituants ;
- optimisation du squelette granulaire.

### **2. Optimisation du mélange en laboratoire:**

- validation de la compatibilité ciment /adjuvant ;
- ajustement de la quantité de la pâte et de l'adjuvant;
- vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants ;
- analyse de la sensibilité de la formule aux conditions climatiques possibles lors de la mise en œuvre (température).

### **3. Validation de la formule sur chantier :**

- vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- vérification des éventuelles spécifications complémentaires telle que la pompabilité ;
- vérification des caractéristiques du béton Propriétés physico-chimiques et mécaniques des BHP

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

**Résistances mécaniques :** Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, compte tenu de la rapidité de la cinétique de montée en résistance, et très élevées à long terme (avec une montée en résistance se poursuivant au-delà de 28 jours). Un BHP de 60 MPa à 28 jours peut offrir des résistances mécaniques de 15 MPa à 24 heures, voire davantage, et 40 MPa à 7 jours. Le gain est aussi important en termes de résistance en traction ou au cisaillement. **Module d'élasticité :** Le module d'élasticité des BHP est supérieur à celui des bétons traditionnels.

Retrait : Le retrait total du BHP est globalement identique à celui d'un béton traditionnel mais avec une cinétique différente (il se produit plus tôt et se développe principalement pendant les premiers jours après le coulage). Le retrait de dessiccation à l'état durci est plus faible compte tenu du faible dosage en eau. Le retrait endogène (ou d'autodessiccation), compte tenu de la finesse de la microstructure et de la forte réduction du rapport E/C, est d'un coefficient plus élevé (150 à 250 x 10<sup>-6</sup>) pour un BHP que pour un béton traditionnel (60 x 10<sup>-6</sup>). Le retrait d'autodessiccation est d'autant plus précoce et élevé que le rapport E/C est faible.

### 8-7- Autres propriétés des BHP

**Fluage** : Les BHP présentent un fluage (déformation différée sous chargement permanent) plus faible que les bétons traditionnels.

**Imperméabilité** : Leur faible porosité capillaire confère aux BHP une très faible perméabilité

**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 en phase gazeuse ou liquide (eaux de mer, eaux sulfatées, solutions acides, dioxyde de carbone, etc.).

**Migration des ions chlorure** : La résistance des BHP à la migration des ions chlorures est supérieure à celle des bétons courants, grâce à sa microstructure plus dense.

**Tenue aux attaques gel/dégel** : Les BHP, correctement formulés, résistent aux cycles gel/dégel grâce à leur forte compacité et à leur résistance mécanique élevée.

**Carbonatation** : De nombreuses études ont démontré que la durabilité des BHP vis-à-vis de la carbonatation est très nettement supérieure à celle d'un béton traditionnel

### 8-8- Principaux domaines d'applications

Le BHP présente des avantages 'technologiques' intéressants par rapport au béton traditionnel:

- Durabilité améliorée face aux agressions physico-chimiques (perméabilité réduite, meilleure protection de l'armature contre la corrosion, réduction de la pénétration des ions chlore, diminution du risque de réaction alcali-silice, meilleure résistance au gel,...). Cette durabilité améliorée présente de grands avantages en termes d'entretien à long terme.

- En règle générale, une fluidité très élevée à l'état frais. Cette caractéristique facilite la mise en oeuvre du béton, même dans les zones à densité d'armature élevée.

- Résistance accrue au jeune âge. Cette propriété permet de réduire le temps de coffrage et d'accélérer la mise en précontrainte. Des délais d'exécution raccourcis sont donc envisageables.

- Une résistance finale accrue après durcissement, ce qui permet de réduire les sections du béton et, dès lors, la diminution du poids de la construction (*voir également l'encadré 'Economie d'espace et d'argent' en dernière page*).
- Un module d'élasticité supérieur, susceptible d'améliorer la stabilité aérodynamique de ponts élancés.
- Un retrait réduit, qui s'avère avantageux pour la maîtrise des déformations d'une construction, ainsi qu'en ce qui concerne les pertes de précontrainte.

Sur le plan architectural également, le BHP est assorti d'un certain nombre de nouvelles possibilités. C'est ainsi que le BHP permet la réalisation de constructions plus élancées. Cet atout est d'ores et déjà matérialisé dans la réalisation d'ouvrages d'art (ponts), même si ce béton pourrait tout aussi bien être utilisé pour la construction de bâtiments. A l'heure actuelle, les avantages du BHP se concrétisent principalement dans l'obtention d'un espace intérieur le plus utile possible. Nous pourrions cependant aussi songer à une nouvel aspect de l'enveloppe de la construction, avec un regain d'attention porté aux éléments architecturaux tels que les arêtes, les arcs, les voûtes,...

La façade d'un bâtiment pourrait en outre être redéfinie par l'utilisation potentielle de modules de dimensions supérieures. Alors que ces dimensions sont à l'heure actuelle généralement de 6 mètres, elles pourraient être portées à 7 ou à 8 mètres, grâce au BHP. Cette augmentation pourrait faciliter l'avènement d'une autre conception de façade et donc d'un aménagement intérieur modifié, davantage en phase avec les normes internationales actuelles. La liberté accrue obtenue pour l'aménagement intérieur d'un bâtiment vaut également pour l'aménagement de la surface horizontale utile. Grâce à la modification des dimensions du module, les espaces libres pourront être plus grands, ce qui donnera à l'architecte davantage de possibilités pour la conception et l'aménagement des espaces de vie et de bureau.

Dans l'industrie du préfabriqué, l'utilisation du BHP offre aussi de nouvelles possibilités (voir également infra). Citons notamment la possibilité de produire des cellules préfabriquées complètes, grâce notamment à l'économie de poids réalisée. Il ne paraît dès lors pas exclu qu'un bâtiment puisse évoluer dans le temps, par le biais de l'échange de cellules préfabriquées compatibles. Une chambre à coucher pourra par exemple devenir un salon, une salle de bain, une cuisine,...

Un autre avantage du BHP par rapport au béton conventionnel est l'aspect visuel des surfaces de béton, tant coulées sur place que préfabriquées. L'apparition de petites bulles d'air à la surface est souvent très limitée. La surface présente généralement une bonne texture, notamment grâce à la haute teneur en fines du béton.

En outre, le BHP n'est guère soumis à la ségrégation, de sorte que la formation de nids de gravier est la plupart du temps évitée. La présence de fumées de silice permet d'obtenir parfois des teintes plus sombres. Tout dépend cependant des dimensions des fines particules, plus encore que de leur teneur. De beaux résultats peuvent également être obtenus grâce à l'utilisation de types de coffrage spécifiques (du bois non traité par exemple).

Historiquement, le BHP a avant tout été conçu pour des applications très particulières, comme les buildings. Il a été à maintes reprises mis en oeuvre aux Etats-Unis pour la réalisation de gratteciel, avec des bétons présentant des résistances de 120 à 130 MPa.

Cependant, comme indiqué ci-dessus, le BHP peut également être une solution alternative pour les constructions réalisées habituellement en béton conventionnel. Le recours judicieux au BHP exige de toute évidence une collaboration très étroite entre le propriétaire, l'architecte, l'ingénieur, l'entrepreneur, la centrale à béton et le laboratoire de recherche

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE 8**

- [1] Chaid R., Jauberthie R. et Boukhaled A. «Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons » Lebanese Science Journal, Vol. 11, No. 1, 2010.
- [2] Baroghel-B.V « Les spécificités des bétons à hautes performances –Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles » LCPC ,2004 .
- [3] Aïtcin P.C. « Les béton à haute performance » Journée d'information : ciments, bétons, adjuvants,Algers 2004.
- [4] Aïtcin P.C. «Bétons haute performance» Edition, Eyrolles, Paris, 2001.
- [5] Schutter G. « Le béton à hautes performances » Bulletin FEBELCEM, Fédération de l'industrie cimenterie, P15, Belge 2007.
- [6] Adam M et Neville « Propriétés des bétons ». Edition Eyrolles, Paris, 2000.
- [7] Grandet.J.P « Durabilité du béton à haute performance, vis-à-vis des attaques chimiques externes » Les bétons à haute performance du matériau à l'ouvrage. pp.223-229, Presse de l'ENPC. Paris 1990.
- [8] Chaid R. « Formulation, Caractérisation et Durabilité des BHP au ajouts cimentaires locaux » Thèse doctorat ENP, PP 154, Alger 2006.
- [9] Chaid R., Jauberthie R., Bali A. et Abadlia M.T., «Formulation des bétons de hautes performances avec des ajouts cimentaires locaux», Revue : Algérie Equipement, École Nationale des Travaux Publics, N°38, ISSN 111-5211, pp. 3-7, janvier 2004.
- [10] Alaejos Gutierrez P. et Fernandez Canovas M., « The modulus of elasticity of high performance concrete », Materials and structures, vol. 28, N° 184, p. 559-568, 1995.
- [11] Dutruel F., « Les BHP et les BTHP, de quoi s'agit-il ?», Journée nationale d'échange d'informations sur les bétons à très hautes performances, organisée par le CERIB, ,pp.8, 21 juin 1995.
- [12] Metha P.K. and Aïtcin P-C., « Microstructure basic of selection of materials and mix proportions for high strength concrete », In : Second International Symposium on high strength concrete, , p.278-308, Detroit : ACI 1990.
- [13] Addis B-J. and Alexandre M-G., « A method of proportioning trial mixes for high strength concrete », In : Second International Symposium on high strength concrete, , p.310-321, Detroit : ACI 1990 .

- [14] Alaejos Gutierrez P. and Fernandez Canovas M., « High performance concrete : requirement for constitutive materials and mix proportioning », ACI Material journal, title n°93-M26, p. 233-241, May-June 1996.
- [15] Dakhmouche Fatima-Zohra « Carbonatation de bétons adjuvantes a base de ressources locales Algériennes »Thèse Doctorat, Université d'Orléans et de l'Université Mentouri de Constantine, P240, 2009.
- [16] Uchikawa H., « Function of organic admixture supporting high performance concrete », In : International Symposium on the role of admixture in high performance concrete, Edited by J-G. Cabrera and R. Rivera-Villareal, Rilem : Monterrey, Mexico, p. 69-96. March 21-26 1999.
- [17] Jolicoeur C., Nkinamubanzi P-C., Simard M-A et al. « Pozzolans and pozzolanic cements », In : The chemistry of cement and concrete, par F-M. Lea, Great Britain : p.414-453, Edward Arnold, 1970.
- [18] Aitcin P.C. « High-performance concret » Edition et FN Spon, London, 591p, 1998.
- [19] De larrard F. «Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances». Thèse de doctorat de l'ENPC, Rapport de recherche des LPC N°149, France, Mai 1988.
- [20] De Larrard F.: « Prévision des résistances en compression des bétons à hautes performances aux fumées de silice ou une nouvelle jeunesse pour la loi de Feret ». I.T.B.T.P. No. 483,1990.
- [21] Guettala S., Mezghiche B. et Chebili R., «Interest and effectiveness of the addition of the sand of dune finely crushed to cement, on the properties of the concrete». Sun Light Publishing Canada, World Journal of Engineering 4 (1) 45-53, 2007.
- [22] Damene Z et Azzouz L et Goual MS « Durabilité de mortiers a base de ciments algériens vis-à-vis du sulfate de magnésium (MgSo<sub>4</sub>) et effet de sable de dune sur le taux de chute de résistance » Colloque CMEDIMAT 2005, 06 et 07 Décembre 2005. Oran.
- [23] M.Cheikh-Zouaoui, S. Aggoun, N. Chikh, R. DuvaP « Effects of Calcium Nitrate and Triisopropanolamine on the Setting and Strength Evolution of Portland Cément Pastes » RILEM2006, Materials and Structures(2008) 41: 31-36 / Accepted 28 Nov.2006/ Published online 23Jan,2007
- [24] Benkaddour, M.; Kazi Aoual, F. et Semcha, A. « Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et artificielle » Revue Nature et Technologie, n°1 pp 63-73, Juin 2009.
- [25] Turanli, L.; Uzal, B. and Bektas, F. « Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans » Cement and Concrete Research, (2004), Vol. 34, no12, pp. 2277-2282. 2004.

- [26] Feldman R F, Huang G « Proprieties of pertland cement silica fume pastes :porosity and surface propriets » Cement and Concrete Research N°15,pp765-774,1985.
- [27] Regourd M., « La microstructure, dans les bétons à très hautes performances – caractérisation, durabilité, applications », édité par Y. Malier, Presses de l'école nationale des ponts chaussées, 2-85978-187-0, p. 25-44, 1992.
- [28] Pedeches J-M., « Béton à hautes et très hautes performances : propriétés mécaniques et retrait. Aide à la formulation », Annales I.T.B.T.P, n° 525, série bétons 311, p. 1-41, 1994.
- [29] Sarkar S-L. and XU A., « Why use mineral admixture in high performance concrete », In: L'Industria Italiana del cemento, October 1996, p. 715-726.
- [30] Pera J., Rols S., Chabannet and Ambroise J., « Influence of cement the type on the resistance on concrete to an agricultural environment » In : Sidney Diamond Symposium on Materials science concrete, Edited by Menashi Cohen, Sidney Mindess and Jan Skalny, 1998, p. 419-431.
- [31] Dron R. et Voinovitch I-A., « Activation hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendres volantes », Le béton hydraulique, l'ENPC, Paris, 1982, p. 237-246.