

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Mémoire
Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

Spécialité : Génie des matériaux.
Option : sciences des matériaux pour la construction durable.

THEME

Etude des bétons fibrés ultra performants (BFUP) à base de déchets de verres.

Réalisé Par :
HAROUS MASSINISSA

Sujet Proposé et suivi par :
Pr : R. CHAID.

Encadreur : M. BELKADI

BOUMERDES 2016



REMERCIEMENT



Au terme de ce travail je tiens à remercier en premier lieu mon seigneur dieu qui m'a donné la force d'achever ce travail. Je remercie vivement mon promoteur **M^{er} Chaid. R** pour l'aide précieux qu'il m'a offert dans l'élaboration de ce travail. Je remercie beaucoup mon encadreur **M^{er} belkadi morad** pour ces conseils et son soutien.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble de professeurs de génie des Matériaux qui ont contribué à ma formation. Je remercie tous les personnels de laboratoire de l'ENGOA.

Aussi mon vif remerciement à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin avec leurs conseils pour l'élaboration de ce projet de fin d'étude.

En fin, Je remercie les membres de jury qui nous font l'honneur d'examiner mon travail.



« Dédicaces »

Je dédie ce modeste travail à :

*A tous ceux qui ont participé à mon éducation de près ou de loin
A mon frère Y. AREZKI
A TOUS CEUX QUE J'AIME ET CEUX QUI M'AIMENT.*

MASSINISSA.H



Sommaire

Introduction générale	01
-----------------------------	----

(A) Partie théorique

Chapitre I : généralité sur les bétons fibrés ultra performance (BFUP)

I.1. Introduction.....	03
I.2. Définition.....	03
I.3.Principe.....	04
I.4. Formulation des BFUP	04
I.4.1. Constituants.....	04
I.4.1.1. Ciment.....	05
I.4.1.2. Eau de gâchage	05
I.4.1.3. Sable fin	05
I.4.1.4. Fumée de silice	06
I.4.1.5. Fibres	07
a.Choix du type de fibres	07
b. Caractéristiques géométriques	08
c. Influence des fibres sur la mise en œuvre des BFUP	09
I.4.1.6. Adjuvants	11
a. Adjuvants modificateurs de la rhéologie du béton.....	11
b. Adjuvants modificateurs de prise et de durcissement du béton.....	11
c. Autres catégories normalisées d'adjuvants.....	12
I.4.2. Principe de formulation	12
I.4.2.1. Introduction.....	12
I.4.2.2. Méthode proposée par BONNEAU.....	12
I.4.2.3. Méthodes empiriques de formulation	15
I.4.2.4. Exemples de formulations.....	16
I.5. Propriétés des BFUP.....	21
I.5.1. Propriétés rhéologiques.....	21
I.5.2. Propriétés mécaniques et physiques.....	22
I.5.3. Classes de BFUP.....	22
I.5.4. Résistance en compression et module d'élasticité.....	22
I.5.5. Résistance en flexion.....	24

I.5.6. Résistance à la traction.....	25
a.Retrait	25
b-Fluage en compression.....	26
c-durabilité.....	26
d-Absorption d'eau.....	27
I.6. CONCLUSIONS.....	27

Chapitre II : Influence des fibres et de la poudre de verre sur les caractéristiques des bétons fibrés ultra performant.

II. 1.Influence des fibres sur la ductilité des bétons fibrés.....	28
II. 1.1.Introduction.....	28
II.1.2.Les différents types et propriétés des fibres.....	29
II.1.3.le rôle des fibres.....	29
II.2. Influence de la poudre de verre sur les caractéristiques des matériaux cimentaires.....	30
II.2.1. Généralités.....	30
II.2.2. Définition.....	30
II.2.3. Origine et classification.....	31
II.2.3.1. Les ajouts inertes.....	31
II.2.3.2. Les ajouts minéraux actifs.....	31
II.2.3.2.1. Ajouts minéraux actifs naturels.....	31
II.2.3.2.2. Ajouts minéraux actifs artificiels.....	31
II.2.4. Rôle des ajouts minéraux actifs.....	32
II.2.4.1. Cendres volantes.....	35
II.2.4.2. Fumée de silice.....	36
II.2.4.3. Pouzzolanes naturelles.....	37
II.2.4.4. Laitier de haut fourneau.....	38
II.2.4.4.1. Historique.....	38
II.2.4.4.2. Définition.....	38
II.2.4.4.3. Classification de laitier de haut fourneau.....	38
II.2.4.4.4. Principale forme de laitier.....	38
II.2.4.4.5. Composition chimique moyenne.....	38
II.2.4.4.6.Réactivités du laitier de haut fourneau.....	39

II.2.5. Utilisation de la poudre de verre comme ajout cimentaire.....	40
II.2.5.1. Introduction.....	40
II.2.5.2. Généralités sur les verres.....	41
II.2.5.3. Définition du verre.....	41
II.2.5.4. Comportement du verre dans un milieu cimentaire.....	41
II.2.5.5. Réaction pouzzolanique du verre.....	42
II.2.6. Conclusion.....	42

(B) Partie pratique

CHAPITRE III : matériaux et procédures expérimentales.

III.1. Introduction.....	43
III.2. Le Ciment.....	43
III.3. La poudre de verre.....	44
III.4. Le sable.....	47
III.5. L'eau de gâchage.....	49
III.6. Adjuvant.....	49
III.6.1. Avantages.....	50
III.6.2. Caractéristiques Techniques.....	50
III.6.3. Compatibilité avec le ciment.....	50
III.6.4. Mise en œuvre.....	50
III.7. Fibres polypropylène.....	51
III.7.1. Domaines d'application.....	51
III.7.2. Propriétés.....	51
III.7.3. Caractéristiques générales.....	51
III.7.4. Moded'emploi.....	51
III.8. Conclusion.....	52

Chapitre IV : Caractérisation des Bétons.

IV.1. Calcul de la composition des BFUP selon la méthode empirique.....	53
VI.2. Séquence de malaxage.....	53
VI.3. Résultats.....	54
VI.3.1. Caractéristiques à l'état frais.....	54
VI.4. Caractérisation à l'état durci.....	56
Conclusion général.....	61
Perspectives.....	63

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Exemple de fibre polypropylène	07
Figure 2 : Exemple de fibre métallique.....	07
Figure 3 : Contrainte de compression en fonction de la déformation.....	20
Figure 4 : Contrainte de flexion en fonction du déplacement.....	20
Figure 5 : Représentation du comportement rhéologique des BUFP.....	21
Figure 6 : Courbe contrainte-déformation du BPR200 en compression.....	23
Figure 7 : Courbe contrainte-déformation du BPR800 en compression.....	23
Figure 8 : Loi de comportement du BPR200.....	24
Figure 9 : Résistance à la compression des BUHP en fonction du temps et du type de traitement.....	24
Figure 10 : Courbe contrainte de traction - ouverture de fissure de béton, à 7 % en volume de fibres métalliques.....	25
Figure 11 : Déformations dues au fluage en compression de trois BUHP traités à 90 °C et chargés à 7 jours.....	26
Figure 12 :Plusieurs types de fibres et de produits en PRF.....	29
Figure 13 : Origine et classification des ajouts cimentaires.....	33
Figure 14 : Ajouts cimentaires. De gauche à droite : cendres volantes (classe C), métakaolin (argile calcinée), fumée de silice, cendres volantes (classe F), laitier et schiste calciné.....	34
Figure15 :Micrographie de cendres volantes au microscope électronique à balayage. Grossissement 1000X.....	35
Figure 16 : Cendres volantes : une poudre ressemblant au ciment utilisé dans le béton depuis les années 1930.....	36
Figure 17 : Poudre de fumée de silice.....	36
Figure 18 :Micrographie de particules de fumées de silice au microscope électronique à balayage. Grossissement 5000X.....	36
Figure 19 :Micrographie du schiste calciné au microscope électronique à balayage.....	37

Figure 20 : Micrographie de particules d'argile calcinée au microscope électronique à balayage.Grossissement 2000X.....	37
Figure 21 : Laitier de haut fourneau granulé broyé.....	38
Figure 23 : Micrographie de laitier au microscope électronique à balayage. Grossissement2100X.....	38
Figure 24 : Schéma technologique de préparation de la poudre de verre.....	45
Figure 25: Déchets de verre concassé et/ou finement broyé.....	46
Figure 26: Essai de l'équivalent sable.....	47
Figure 27: Courbe granulométrique du sable d'oued Souf.....	49
Figure 28: Essai d'étalement au mini cône d'Abrams.....	55
Figure 29: Masse volumique à l'état durcis.....	56
Figure 30: Essai de compression sur les bfup en substitution de poudre de verre.....	57
Figure 31: Résistance à la compression des BFUP élaborés.....	58
Figure 32: Résistance à la flexion des BFUP élaborés.....	59
Figure 33: Essai de flexion simple.....	59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques générales de la fumée de silice.....	6
Tableau 2 : Caractéristiques des fibres utilisées dans les BFUP.....	8
Tableau 3 : Formules types de BFUP.....	16
Tableau 4 : Formulation et séquence de malaxage.....	17
Tableau 5 : Maniabilités obtenues pour une formule de BFUP utilisant différents types et dosages de superplastifiant.....	17
Tableau 6 : Caractéristiques mécaniques en compression uniaxiale de trois BFUP.....	18
Tableau 7 : BFUP utilisés pour la construction d'une passerelle à Sherbrooke au Canada.....	19
Tableau 8 : Formulation de DUCTAL®.....	19
Tableau 9 : Malaxage de BFUP fabriqué en laboratoire.....	22
Tableau 10 : Caractéristiques mécaniques des BPR.....	22
Tableau 11 : la composition chimique moyen de laitier.....	39
Tableau 12 : Composition minéralogique du ciment.....	43
Tableau 13 : Composition chimique du ciment.....	43
Tableau 14 : Caractéristiques physico-mécaniques du ciment.....	44
Tableau 15 : Compositions chimiques des poudres de verre.....	46
Tableau 16 : Masses absolues des poudres de verre.....	46
Tableau 17 : Surface spécifique Blaine des poudres de verre.....	47
Tableau 18 : Composition chimique du sable d'oued Souf.....	48
Tableau 19 : Caractéristiques physiques du sable d'oued Souf.....	48
Tableau 20 : Analyse granulométrique du sable d'oued Souf.....	48
Tableau 21 : Composition des BFUP réalisés (kg/m ³).....	54
Tableau 22 : Masse volumique des mortiers à l'état frais (kg/m ³).....	54
Tableau 23 : Etalement des mortiers fibrés avec 10% de poudre de verre.....	54
Tableau 24 : Masse volumique des mortiers à l'état durci (kg/m ³).....	57
Tableau 25 : résistance en compression (en MPa) avec 10% de poudre de verre.....	57
Tableau 26 : Resistances en flexion des différents BFUP étudiés (en MPa).....	59

Résumé

L'évolution des BFUP par rapport aux Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérise par :

- leurs très grandes résistances en compression mais aussi en traction ;
- leur fort dosage en ciment (700 à 1000 kg/m³) et en adjuvants ;
- leur squelette granulaire spécifique (4 à 5 échelles de grains) et l'optimisation de leur empilement granulaire;
- l'utilisation de granulats de faibles dimensions ;
- une teneur en eau beaucoup plus faible ;
- la présence de fibres (à un taux élevé de l'ordre de 2 à 3 % en volume).

Le verre mis en décharge accentue les problèmes environnementaux par la pollution et le gaspillage d'espace pouvant servir à des fins plus utiles.

L'objectif premier de ce travail est de valoriser ce verre en explorant son emploi comme matériau cimentaire alternatif.

Différents taux de substitution de poudre du verre broyé et de poussière générée par le concassage du verre ayant des finesses supérieures à celle du ciment sont incorporées dans les bétons.

Les résultats de notre travail ont permis de retenir que :

La poudre de verre, de finesse supérieure à celle de ciment, améliore une bonne ouvrabilité et son maintien dans le temps pour les systèmes cimentaires binaires élaborés.

La poudre de verre broyé recèle un potentiel pouzzolanique intéressant.

La poudre de verre améliore la durabilité par réduction de leur pénétrabilité.

La poudre peut remplacer plus de 10% de ciment dans le béton.

ABSTRAT

The evolution of UHPC compared to Concrete High Performance (BHP) is characterized by:

- Their very high compressive strength but also in tension;
- Their high cement content (700 to 1000 kg / m³) and adjuvants;
- Their specific granular skeleton (4-5 grains scales) and optimizing their granular packing;
- The use of aggregates of small dimensions;
- A much lower water content;
- The presence of fibers (a high rate of the order of 2 to 3% by volume).

Glass landfill exacerbates environmental problems of pollution and the waste of space that could be used for more useful purposes.

The primary objective of this work is to develop this glass exploring its use as alternative cementitious material.

Different powder substitution rate of the crushed glass and dust generated by crushing glass having superior to that of the cement fineness are incorporated in the concrete.

The results of our work helps to remember that :

Glass powder, fineness higher than that of cement, improves good workability and are maintained over time for the developed binary cementitious systems.

The crushed glass powder contains an interesting pozzolan potential.

The glass powder improves durability by reducing their penetration.

The powder can replace over 10% of cement in concrete.

INTRODUCTION GENERALE :

Bien que de nombreux travaux, en particulier ceux de Caquot [Caquot 1937], ont amélioré nos connaissances sur les milieux granulaires, chercheurs et ingénieurs ne surent pendant longtemps comment maîtriser la porosité des matériaux à base de ciment Portland. [1]

On prit également conscience de l'importance du choix du granulats dans la quête des hautesrésistances. L'expérience montrait en effet que le passage d'un calcaire métamorphique grossier à un calcaire dolomitique à grain fin contenant un peu de silice permettait un gain d'une vingtaine de MPa.[1]

L'introduction de la fumée de silice au début des années 80 allait permettre une nouvelle «envolée" des résistances et la création d'une autre classe de bétons, ceux à très haute performance (B.T.H.P.). Constituée de particules vitreuses quasi-sphériques ayant un diamètre moyen de 0,1 μm . [1]

La fumée de silice complète une partie du squelette granulaire, augmentant ainsi la compacité de la pâte. De plus, elle réagit avec la portlandite produite lors de l'hydratation du ciment pour former des C-S-H additionnels par effet pouzzolanique.

De son côté, Bache profita de l'action combinée de la fumée de silice et des superplastifiants pour élaborer un matériau ultra résistant, le "Densified System containing homogeneously arranged ultra-fine Particles" (D.S.P.). Il utilisa des granulats de grande dureté, du granite ou de la bauxite calcinée, ce qui lui permit d'obtenir des résistances à la compression de 270 MPa [Bache 1981]. une vingtaine de MPa [Aïtcin 1998]. [1]

Le Béton de Poudres Réactives (B.P.R. ou R.P.C. en anglais), développé par Pierre Richard, et le Ductal® sont parmi les derniers-nés de la famille des M.U.H.P. [Richard et Cheyrezy 1994]. Avec des résistances en compression variant de 200 à 800 MPa selon le mode de fabrication et de mûrissement, ces nouveaux composites possèdent des caractéristiques particulières. [1]

L'innovation dans les sciences de la construction passe en partie par le développement de nouveaux matériaux et la maîtrise de leurs propriétés, le béton renforcé de fibres est l'un de ces matériaux.

Les caractéristiques de ce type de matériaux repose sur la présence de fibre qui peuvent être de différentes natures : métallique, synthétique, naturelle, fibre de verre ou de carbone.

Les bétons fibrés ultra performances (BFUP), sont par des résistances à la compression et de rigidité très importantes. En pratique, la formulation de ces bétons nécessite des constituants adéquats et des paramètres de composition soient bien contrôlés.

Des études ont été menées sur l'utilisation des ajouts cimentaires dans les BFUP, en vue de l'obtention des bétons de hautes performances mécaniques.

Retenus essentiellement pour leur pouvoir pouzzolanique dû à leur teneur en agents réactif tel que la silice ou l'alumine, les ajout cimentaires ont la faculté de donner un plus pour la résistance du béton via la consommation de portlandite $[Ca(OH)_2]$ créant ainsi de nouveau C-S-H, produit essentiellement de l'hydratation du ciment et élément responsable de la résistance du béton à jeune âge et long terme.[2]

Comme il est obtenu essentiellement de la fusion du sable à 99% de silice, le verre se place comme un matériau digne de terme « pouzzolanique ».

Pour cela, ce travail a pour but d'étudier l'influence de la poudre de verre (finement broyé et comme granulats fins) sur les propriétés physico-mécanique des bétons fibrés (fibre polypropylène) à l'état frais et durci et de vérifier l'utilité de cette poudre de verre d'améliorer les performances de béton fibré ultra performant.

Ce mémoire s'articule sur quatre chapitres :

En théorie ;

- Le premier chapitre renferme des généralités sur les BFUP ainsi que les méthodes adoptées pour leurs formulations.
- Le deuxième chapitre étudie l'influence des fibres et la poudre de verre sur la ductilité des BFUP et les caractéristiques des matériaux cimentaires.

En pratique ;

- Pour le troisième chapitre illustre les Caractéristiques des matériaux utilisés et les compositions des BFUP formulés avec la substitution de la poudre de verre.
- Et enfin, le quatrième chapitre résume les Résultats obtenues et leurs interprétations.

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

I-1-INTRODUCTION :

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés : d'une part à l'état frais, alors qu'il est plastique et qu'on peut le travailler ; d'autre part, à l'état durci, alors que sa forme ne peut plus être modifiée mais que ses caractéristiques continuent à évoluer durant de nombreux mois, voire des années.

Le progrès dans le domaine des adjuvants, des méthodes de formulations et l'utilisation des progrès ultrafines ont conduit à une évolution spectaculaire des bétons. Des bétons courants de résistance en compression de 30 MPa, la gamme s'est élargie aux bétons à haute performances.

Une rupture technologique est intervenue au début des années 90 avec la mise au point de béton dont la résistance est de l'ordre de 200 MPa en compression et de 40 MPa en flexion.

Grace à cette dernière caractéristique on peut désormais envisager de passer des armatures passives dans les éléments structuraux. [3]

L'innovation dans les sciences de la construction passe en partie par le développement de nouveaux matériaux et la maîtrise de leurs propriétés. Le béton renforcé de fibres est l'un de ces matériaux. Les fibres augmentent la résistance mécanique du béton, réduisent son retrait plastique, augmentent sa résistance aux impacts et améliore sa résistance au feu.

Avec ce matériau, les ingénieurs sont capables de projeter de nouvelles structures originales par leur design et leur conception, mais aussi par leurs capacités à résister aux diverses sollicitations extérieures (Pimienta *et al.* 2004) (Behloul *et al.* 2004).

Les BFUP se distinguent des bétons à hautes et très hautes performances :

- par leur résistance en compression, systématiquement supérieure à 150 MPa,
- par l'emploi systématique de fibres, qui assurent la non-fragilité du matériau et modifient le recours classique aux armatures actives ou passives,
- par leur fort dosage en liant et la sélection particulière dont les granulats font l'objet.

En particulier le diamètre maximal de grand granulats et le rapport eau/ciment. [4]

Ce chapitre s'intéresse en premier partie à une caractérisation générale des propriétés principales de béton fibré ultra performant à l'état frais et durci, et ensuite à décrire quelques méthodes de formulation utilisées pour le développement des BFUP.

I-2Définition :

Les BFUP sont des matériaux à matrice cimentaire, de résistance à la compression supérieure à 150 MPa. Ces matériaux sont additionnés de fibres métalliques (BFUP) en vue d'obtenir un comportement ductile en traction. Ils se caractérisent aussi par leur fort dosage en liant et la sélection particulière dont les granulats font l'objet.

Du point de vue de leur formulation, ils se caractérisent par :

- un rapport E/C très faible, arrive dans quelques cas à $< 0,2$.

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

- l'emploi de sable fin afin d'améliorer l'homogénéité.
- une augmentation de la compacité, par optimisation du squelette granulaire et par Pressage du matériau à l'état frais et pendant la prise.
- l'amélioration possible de la microstructure par traitement thermique après la prise.
- l'emploi de fibres métalliques pour augmenter la ductilité.

I-3-Principe :

On trouve dans la famille des BFUP des bétons réalisés suivants deux concepts différents :

1. concept d'optimisation multi-échelle de composants et de fibres, qui permet d'obtenir un béton ductile.
2. concept d'utilisation de granulats a haute résistance mécanique.

L'obtention de résistances élevés et de faible perméabilité aux agents agressifs passe par une réduction très importante de la porosité et plus précisément du réseau des pores connectés, en jouant sur deux paramètres.

- Une teneur en eau très faible (rapport eau/ciment < 0.25) grâce a l'utilisation optimisée de superplastifiant qui défloclent les particules fines et permettent un meilleur empilement granulaire.
- Une compacité maximale, obtenue en utilisant des composants correspondant à plusieurs classes granulométriques.

Les ultrafines utilisés dans les BFUP sont des fumé de silice de haute pureté, sous forme de billes submicrométriques qui remplisse les espaces intergranulaires, et qui réagissent avec la chaux issu de l'hydratation de ciment. Ce faisant, elles participent activement à la résistance de l'ensemble et ferment le réseau des pores à la diffusion des ions et des gaz.

Dans le cas des BFUP, la taille et la quantité du plus grand grain est considérablement réduite. Le squelette granulaire y gagne en souplesse, se qui réduit considérablement les effets de microfissuration lié au retrait.

I-4-Formulation des BFUP :

I-4-1- Constituants :

Les différents constituants (composants granulaires et adjuvants) qui forment généralement les BUHP sont [5]:

- le ciment,
- le sable fin ($0,063 \text{ mm} < \text{diamètre max} < 2 \text{ mm}$),
- la fumée de silice,
- les fibres métalliques et non métalliques (synthétiques, carbonés, etc. ...),
- le superplastifiant haut réducteur d'eau,

- l'eau.

I-4-1-1- Ciment :

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton BFUP est conforme à la norme NF EN 197-1 [AFNOR NF EN 197-1, 2001]. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine. Pour bénéficier pleinement de l'activité pouzzolanique des fines d'addition, on privilégie souvent les ciments sans ajouts (CEM I) par rapport aux ciments avec ajouts (CEM II à CEM V). [6]

La rhéologie des BFUP étant fortement liée à la réactivité du ciment utilisé, il apparaît que l'emploi de ciment à faible teneur en C3A et à faible surface spécifique permet d'augmenter l'ouvrabilité des BFUP. Selon Bonneau, un ciment CEM I 52,5 PMES conduit à de très bonnes performances rhéologiques et mécaniques. En effet, ce ciment se caractérise par une faible teneur en C3A et un pourcentage en C3S qui favorise le développement de haute résistance mécanique. Cependant, certains ciments CEM I 42,5 peuvent également conduire à des résistances élevées [5].

I-4-1-2- Eau de gâchage :

Pratiquement, toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton. Cependant, certaines eaux non potables peuvent convenir.

Une eau de qualité douteuse peut être utilisée à condition que des cubes de mortier préparés avec cette eau donnent des résistances à 28 jours au moins égales à 90 % de celles obtenues sur des échantillons témoins préparés avec de l'eau que l'on sait potable. De plus, il est recommandé d'exécuter les essais de la norme afin de s'assurer que le temps de prise du ciment n'est pas affecté par les impuretés contenues dans l'eau de gâchage. Un excès d'impuretés peut influencer non seulement le temps de prise, la résistance et la stabilité volumétrique du béton, mais peut aussi faire apparaître des efflorescences, des tâches, attaquer les armatures et réduire la durabilité.

Certaines limites peuvent donc être établies pour les chlorures, sulfates, alcalis et solides présents dans l'eau de gâchage ou l'on peut effectuer des essais appropriés pour déterminer l'effet de l'impureté sur diverses propriétés. [7]

I-4-1-3- Sable fin :

Conformément aux normes NF EN 12620 [AFNOR NF EN 12620, 2003] et NF XP P18-545 [AFNOR XP P18-545, 2004], le sable est défini comme étant un granulat naturel 0/D avec D (diamètre du plus gros granulat) limité à 4 mm. Il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire (ou de ballastière), soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique. [6]

Dans la formulation des BFUP, le sable est choisi pour sa composition minérale (teneur en SiO₂ > 98 %), la taille moyenne de ses grains (généralement entre 400 et 600 µm) et leur

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

forme (forme arrondie). Ce doit être un matériau de grande dureté qui permet d'obtenir d'excellentes interfaces pâtes/granulats. La forme des grains arrondie présente une absorption d'eau faible et favorise la rhéologie du béton. Dans la pratique actuelle, il est plus prudent de se borner à l'utilisation de sable dont 12 % de fines sont inférieurs à 0,08 mm tels qu'on peut les employer pour des formules de béton classique [AFNOR NF EN 12620, 2003].

Ainsi, le sable de plage (lavé pour éviter les ions chlore) et le sable de dune, de nature siliceuse et dont la taille des grains est comprise entre 0,063 et 2 mm, semblent parfaitement adaptés à la fabrication des BFUP.

I-4-1-4- Fumée de silice :

Toutes les additions, de finesse supérieure à celle des ciments, peuvent être utilisées en substitution des ciments. Néanmoins, les additions généralement considérées comme étant les plus efficaces vis-à-vis des résistances mécaniques, comme la fumée de silice.

La fumée de silice est conforme à la norme NF EN 13263-1 [AFNOR NF EN 13263-1, 2005]. C'est une ultra fine, composée de particules sphériques de dioxyde de silicium amorphe, de diamètre moyen de l'ordre de 0,1 μm et de très grande surface spécifique, et hautement pouzzolanique. Il s'agit d'un co-produit, recueilli sur des filtres, du processus de fusion permettant de produire du silicium métal et des alliages de ferrosilicium. Ses caractéristiques générales sont présentées dans le Tableau 5.

Tableau 1. Caractéristiques générales de la fumée de silice.

Masse volumique (kg/m^3)	2200
Surface spécifique (m^2/kg)	Entre 12000 et 20000
SiO ₂ (%)	> 85
Dimension des grains (μm)	Entre 0.03 et 0.3

La teneur en carbone de la fumée de silice est préjudiciable puisqu'elle engendre une augmentation de la demande en eau et entraîne une diminution de la fluidité du matériau à l'état frais (il existe sur le marché des fumées de silice blanche exemptes de carbone mais qui sont très chères). Elle influe aussi sur la teinte de la fumée de silice qui a un impact important sur la couleur du béton en raison de son extrême finesse.

La fumée de silice est un co-produit industriel assez cher et peu disponible. Elle peut être remplacée par d'autres particules fines et ultrafines telles que les roches micronisées (quartz, calcite, diatomite, etc.), la fumée de titane, les cendres volantes, les laitiers de haut fourneau et les métakaolins. Toutefois, l'utilisation actuelle de ces particules dans la formulation des BFUP demeure marginale. [6]

I-4-1-5- Fibres :

Rossi et al ont montré le rôle des fibres dans les BFUP : les fibres sont un obstacle à la formation et la propagation des fissures qui causent l'endommagement de la structure. Les fibres s'ajoutent donc aux bétons en vue d'obtenir un comportement ductile en traction et de s'affranchir si possible de l'emploi d'armatures passives.

Lors d'un traitement thermique à haute température, les BFUP renfermant un certain pourcentage de fibres atteignent des contraintes de compression maximales car les fibres agissent sur la microfissuration induite par les forts gradients thermiques et les changements minéralogiques.

Le pourcentage incorporable des fibres dans les BUHP est limité par des critères de maniabilité. [6]



Figure 1- Exemple de fibres polypropylène



Figure 2- Exemple de fibres métalliques

a) *Choix du type de fibres :*

De nombreuses campagnes expérimentales sur les bétons fibrés ont démontré que l'efficacité et le choix des fibres dans la matrice peuvent être expliqués par leur nature, leur longueur, leur diamètre, leur forme et leur dosage.

Le choix des fibres est aussi conditionné par un module d'élasticité très élevé, afin que les fibres soient arrachées et non cassées.

Le tableau 6 présente les caractéristiques de certaines fibres appropriées aux BFUP et disponibles sur le marché. [5]

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

Tableau 2. Caractéristiques des fibres utilisées dans les BFUP.

Type de fibre	Densité	Diamètre (µm)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (MPa)	Déformation à la rupture (%)
<i>Métallique</i>	7,85	100 – 300	500 – 2600	210 000	0,5 - 3,5
<i>Verre</i>					
E	2,54	8 - 15	2000 - 4000	72 000	3,0 - 4,8
RA	2,70	12 -20	1500 - 3700	80 000	2,5 - 3,6
<i>Synthétique</i>					
Acrylique	1,18	5 - 17	200 - 1000	17 000 - 19 000 62 000 - 120 000	28 - 50
Aramide	1,44	10 - 12	2000 - 3100	000	2 - 3,5
Carbone	1,90	8 - 0	1800 - 2600	230 000 - 38 000	0,5 - 1,5
Nylon	1,14	23	1000	5200	20
Polyester	1,38	10 - 80	290 - 1200	10 000 - 18 000	10 - 50
Polyéthylène	0,96	25 - 300	80 - 600	5000	12 - 100
Polypropylène	0,90	20 – 200	450 - 700	3 500 - 5 200	6 – 15

La répartition des grains à l'intérieur de cette étendue granulaire est telle que le mélange présente

b) Caractéristiques géométriques :

Les fibres les plus répandues ont une forme cylindrique et droite, et sont alors caractérisées par leur longueur L et leur diamètre d.

Dans les BFUP, on utilise généralement des fibres de longueur entre 3 et 15 mm avec un diamètre qui varie entre 30 et 250 µm. Pour un volume donné, le nombre de fibres dépend du volume unitaire des fibres.

Les caractéristiques et le volume des fibres utilisées influent sur les propriétés mécaniques des BFUP lors d'un chargement en traction ou en flexion. Les fibres longues diminuent fortement la maniabilité des BFUP et sont à l'origine d'une finition de mauvaise qualité due à la propension des fibres à s'aligner sur les arêtes. A contrario, l'utilisation de fibres très courtes permet d'obtenir une bonne ouvrabilité et facilite le malaxage ainsi que la finition des matériaux fortement dosés en particules fines et ultrafines.

c) Influence des fibres sur la mise en œuvre des BFUP :

Lors que l'on met en œuvre un BFUP dont la formulation a été optimisée, il est important de tenir compte de certaines spécificités liées à la technologie de mise en œuvre et au type de structure.

Ces spécificités peuvent se décliner de la manière suivante :

- l'orientation préférentielle des fibres.
- les effets de voûte ou d'écran.
- les effets de cheminée.
- la ségrégation des fibres.
- l'appauvrissement en fibres.
- la relation entre la forme de la fibre et la maniabilité du BFUP.

➤ *Orientation préférentielle des fibres*

Cette orientation a plusieurs origines qui sont principalement la technique de mise en œuvre et les effets liés à l'écoulement du BFUP.

• **Effets liés à la technique de mise en œuvre :**

Les BFUP sont mise en œuvre par coulage ou par projection. Dans le cas du béton coulé, quatre situations sont à considérer :

- le BFUP doit s'écouler pour remplir le coffrage : l'écoulement dans le coffrage produit une orientation préférentielle des fibres.
- le BFUP ne doit pas s'écouler, ou très peu : l'orientation des fibres dépend de la technique de coulage adoptée.
- si le BFUP est mis en place à l'aide d'une pompe ou d'une benne à manchon, les fibres se trouvent orientées dans le tuyau de la pompe et dans le manchon, parallèlement aux parois.
- si le BFUP est mis en place à l'aide d'une benne sans manchon, les fibres subissent peu d'orientation préférentielle, et l'on observe une orientation relativement isotrope des fibres au sein de la structure, à l'exception du voisinage des parois du moule.

Pour le béton projeté, les fibres sont préférentiellement orientées parallèlement aux parois de la lance de projection à la sortie de celle-ci. Par contre, au contact de la paroi que le BFUP doit renforcer, les fibres s'orientent plutôt parallèlement à la surface de cette paroi. L'importance de cette orientation préférentielle dépend du rapport longueur de la fibre sur épaisseur de la couche de BFUP projeté. Ainsi, plus ce rapport est faible, plus l'orientation préférentielle est importante.

Il faut accorder une attention toute particulière à la représentativité des BFUP mise en œuvre en laboratoire pour confectionner des éprouvettes de petites dimensions. Du fait de la manière dont le BFUP est prélevé par l'outil servant à remplir le moule, de la forme de celui-ci, de la manière dont l'outil introduit le BFUP dans le moule, de la petitesse de ce dernier qui exclut un écoulement important du BFUP, les fibres sont orientées préférentiellement perpendiculairement à la surface du moule par où le BFUP est introduit. Cette orientation

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

préférentielle constitue souvent un élément essentiel du manque de représentativité du comportement mécanique d'un BFUP de laboratoire par rapport à celui utilisé pour une application industrielle donnée.

• Effets liés à l'écoulement du BFUP :

Dans le cas où le BFUP peut s'écouler à l'intérieur du coffrage soit par gravité, soit sous l'effet d'une vibration, les fibres ont tendance à s'orienter parallèlement aux lignes de courant de l'écoulement du fluide visqueux que constitue le béton. Cette tendance augmente lorsque le rapport distance d'écoulement / longueur de la fibre augmente.

Les effets de paroi sont une conséquence de cette orientation des fibres. En effet, lorsqu'un BFUP s'écoule le long d'une paroi, les lignes de courant sont parallèles à la surface de la paroi, donc les fibres s'orientent également parallèlement à cette surface.

➤ *Effets de voûte ou d'écran*

Ces effets de voûte apparaissent lorsqu'un obstacle s'oppose au déplacement des fibres : des fibres peuvent s'accumuler et former un paquet qui, en empêchant le déplacement des autres fibres mais également des gros granulats du BFUP, induisent de la ségrégation.

On rencontre ce problème lorsqu'un BFUP est coulé dans une structure comportant des armatures traditionnelles avec des espacements entre armatures plus petits ou très peu supérieurs à la longueur des fibres. Il peut également intervenir lorsqu'un BFUP est coulé entre deux parois d'un moule ou d'un coffrage distantes d'une longueur voisine ou inférieure à celle des fibres.

➤ *Effets de cheminée*

Ce phénomène apparaît lorsqu'un BFUP assez visqueux, et contenant un pourcentage de fibres important (supérieur à 50 kg/m³), est vibré à l'aide d'une aiguille vibrante.

La pénétration de l'aiguille dans le BFUP provoque un écoulement local de celui-ci le long de l'aiguille, et une orientation des fibres parallèlement à l'axe longitudinal de celle-ci. Dans le cas d'un pourcentage élevé de fibres, leur enchevêtrement crée autour de l'aiguille une « enveloppe » rigide qui empêche la matrice visqueuse de combler de manière satisfaisante la cheminée laissée par l'aiguille.

Il est par conséquent d'autant plus important d'éviter de vibrer à l'aiguille vibrante un BFUP, que celui est visqueux et contient un pourcentage élevé de fibres.

➤ *Ségrégation des fibres*

Ce phénomène de ségrégation apparaît lorsqu'on utilise un BFUP très fluide pour élément structurel de hauteur importante (colonne ou poutre de grande hauteur). Il a la même origine que celle relative à la ségrégation des gros granulats d'un béton, c'est-à-dire la pesanteur.

Il est d'autant plus important que le poids unitaire de la fibre augmente et que sa surface spécifique diminue. En effet, plus la surface spécifique de la fibre augmente, plus les frottements exercés sur elle par la matrice sont importants et en ralentissent la chute.

➤ *Appauvrissement en fibres*

Ce problème intervient principalement dans le cas des bétons projetés. En effet, lorsque la fibre est projetée à l'aide d'une lance de projection, elle acquiert une certaine énergie cinétique en arrivant sur la paroi que l'on désire renforcer. Cette paroi étant habituellement peu déformable, les fibres vont avoir tendance à rebondir sur cette paroi (ce rebond est plus important dans le cas de la technique de projection par voie sèche que dans celle par voie mouillée).

En voie sèche, l'importance du rebond dépend de nombreux paramètres (poids unitaire de la fibre, vitesse de projection, distance et angle de la lance de projection par rapport à la paroi, rapport longueur de la fibre / taille du plus gros granulat...).

L'appauvrissement en fibres des BFUP projetés constitue donc un aspect très important vis-à-vis de l'utilisation de ces matériaux [5].

I-4-1-6- Adjuvants :

Il existe plusieurs familles d'adjuvants. Après un bref descriptif des différents adjuvants disponibles, nous nous intéresserons plus particulièrement aux superplastifiants utilisés dans les BFUP, à leurs propriétés et à leur mode d'action dans la matrice cimentaire. [6]

Définition :

L'adjuvant est un produit incorporé au moment du malaxage du béton à un dosage inférieur ou égal à 5 % de la masse de ciment du béton, pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et / ou à l'état durci [AFNOR NF EN 934-2/A2, 2006]. Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et une seule, mais peut présenter une ou plusieurs fonctions secondaires. Plusieurs catégories sont définies par la norme.

a-Adjuvants modificateurs de la rhéologie du béton :

• Plastifiants - Réducteurs d'eau

Ce sont des produits qui, sans modifier la consistance, permettent de réduire la teneur en eau du béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmentent l'affaissement (ou l'étalement), ou qui produisent les deux effets à la fois.

• Superplastifiant - Haut réducteurs d'eau

Ce sont des produits qui, sans modifier la consistance, permettent de réduire fortement la teneur en eau du béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmentent considérablement l'affaissement (ou l'étalement), ou qui produisent les deux effets à la fois.

b- Adjuvants modificateurs de prise et de durcissement du béton :

• Accélérateurs de prise

Ces adjuvants diminuent le temps de début de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état rigide. Ils sont utilisés souvent en préfabrication.

• Accélérateurs de durcissement

Ces adjuvants augmentent la vitesse de développement des résistances initiales du béton, avec ou sans modification du temps de prise. Ils sont préférentiellement utilisés par temps froid.

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

- **Retardateurs de prise**

Ces adjuvants augmentent le temps de début de transition du mélange, pour passer de l'état plastique à l'état rigide. Ils sont généralement utilisés par temps chaud.

c. Autres catégories normalisées d'adjuvants :

- **Hydrofuges de masse**

Ces adjuvants permettent de limiter la pénétration de l'eau dans les pores et les capillaires du béton, sans altérer ses qualités plastiques et esthétiques.

- **Entraîneurs d'air**

Ces adjuvants permettent d'incorporer pendant le malaxage une quantité contrôlée de fines bulles d'air entraîné uniformément réparties et qui subsistent après durcissement. Ils sont utilisés pour protéger les bétons du gel.

- **Rétenteurs d'eau**

Ces adjuvants réduisent le départ d'eau par ressuage et augmentent l'homogénéité et la stabilité du mélange. Ils sont utilisés dans les bétons coulés sous l'eau ou certains bétons autoplaçants [5].

I-4-2- Principe de formulation :

I-4-2-1- Introduction :

Formuler un béton consiste à déterminer les proportions des différents constituants permettant de satisfaire des propriétés rhéologiques et mécaniques exigées par l'utilisation du matériau. Dans le cas d'un BUHP, l'optimisation du squelette granulaire constitue la phase primordiale de la formulation. Elle a pour objectif de combler la porosité de cet empilement avec la pâte afin d'obtenir l'ouvrabilité désirée, cette pâte étant elle-même déterminée par le rapport eau/ciment pour viser une résistance et une durabilité données [5].

I-4-2-2- Méthode proposée par BONNEAU :

Le problème de la formulation d'un béton se pose en termes d'optimisation de la compacité du squelette granulaire. Cette compacité est définie comme le rapport du volume solide sur le volume total et correspond au complément à l'unité de la porosité.

[Bonneau, 1997] a pu établir, à partir de résultats expérimentaux, une relation mathématique entre le volume des vides (V) d'un mélange granulaire et son étendue granulaire (d/D) :

$$V = v_0 (d/D)^{0.2}$$

Où v_0 : constante empirique

d : dimension du tamis retenant 90% du granulat.

D : dimension du tamis retenant 10% du granulat.

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

La répartition des grains à l'intérieur de cette étendue granulaire est telle que le mélange présente une porosité minimale. Selon Caquot, la constante expérimentale V_0 prend une valeur de l'ordre de 0,5.

Le dosage en fines (ciment et additions) d'un béton de sable est estimé par Caquot par la formule :

$$[fines] = [V]$$

Où $[V]$: volume de vide associé à l'empilement des fines du sable.
 $[fines]$: volume de l'ensemble de particules inférieures à 80 μm .

La porosité PS , définie par la formule de Caquot, est donnée par la formule suivante :

$$PS = 0,75(0,08/D)^{0,2} \quad (\% \text{ volumique})$$

Ainsi, le dosage volumique optimal en fines s'écrit en combinant des équations (2.2) et (2.3) :

$$[fines] = 0,38(0,08/D)^{0,2} \quad (\% \text{ volumique})$$

On estime qu'une précision de l'ordre de $\pm 10\%$ est raisonnable.

Cette formule montre que le dosage en fines dépend de la dimension du plus gros granulat D . En admettant que la porosité du squelette granulaire se décompose en la somme d'un volume d'eau (e) et d'un volume de vide piégé (V), la porosité minimale théorique du béton est :

$$(e+v)_{\min} = 0,8[d/D]^{0,2}$$

Où d/D : étendue granulaire en tenant compte de celle des fines.

Le volume de vides est déterminé à partir du volume d'eau selon la formule :

$$[vides] = K \times [eau] \text{ (l/m}^3\text{)}$$

L'estimation du dosage en sable est donnée par la relation :

$$[Sable] = 1000 - [fines] - [eau] - [vide] \text{ (l/m}^3\text{)}$$

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

Le dosage de sable estimé par cette formule prend en considération toutes les particules de taille supérieure à 80 µm. Le sable est considéré dans un état saturé, superficiellement sec.

Dans le cas des bétons formulés avec une fine potentiellement réactive, la formule de FERET permet de prédire la valeur de la résistance en compression à 28 jours R_b :

$$R_b = \frac{K_f \times R_c}{1 + \frac{3.1 \times (e + v)}{c \times (1 + \frac{K_1}{K_1 + K_2})}}$$

- Où
- R_b : Résistance du béton à 28 jours (MPa)
 - K_f : Coefficient granulaire (ordre de grandeur 4,5 à 5)
 - R_c : Classe vraie du ciment (MPa)
 - e : Dosage en eau totale (l/m³)
 - v : Air piégé (l/m³)
 - c : Dosage en ciment (kg/m³)
 - K_1 : Coefficient pouzzolanique
 - K_2 : Coefficient d'activité du filler calcaire

Le coefficient pouzzolanique K_1 est donné par l'équation suivante :

$$K_1 = K_{cv} \times C_v / c + K_{fs} \times F_s / c$$

- Avec :
- $0,2 < K_{cv} < 0,4$
 - $2 < K_{fs} < 3,3$
 - $K_1 \leq 0,5$

K_{cv} et K_{fs} sont les coefficients d'équivalence en ciment des cendres volantes et de la fumée de silice.

C_v et F_s sont les dosages en cendres volantes et fumée de silice (kg/m³).

Le coefficient d'activité du filler calcaire K_2 est donné par l'équation suivante :

$$K_2 = K_{fil} \times \frac{fil}{c}$$

- Avec
- $0 < K_{fil} < 0,4$
 - $K_2 < 0,2$.

K_{fil} et fil sont respectivement le coefficient d'équivalence en ciment et le dosage (kg/m³) du filler calcaire.

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

Cette formule permet de prendre en compte l'activité pouzzolanique des additions telles que les cendres volantes ou les fumées de silice et l'activité des fillers calcaires au niveau des résistances en compression. Il est sous-entendu dans la formulation de Feret que la formulation du béton est basée sur l'utilisation d'un ciment au clinker pur, type CEM I. L'utilisation d'un ciment composé type CEM II ou CEM III peut introduire un conflit dans la gestion des additions par cette formule [5].

I-4-2-3-Méthodes empiriques de formulation :

L'expérimentation peut permettre de formuler un béton sans expliquer ou formaliser les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation des bétons.

Les travaux menés par Richard et Larrard ont abouti au début des années 90 à une nouvelle génération de bétons, dit Bétons à Ultra Hautes Performances, dépassant les 150 MPa en compression. Les principes généraux de formulation peuvent être présentés comme suit :

- amélioration de l'homogénéité macroscopique du béton par réduction du diamètre du plus gros granulat .
- amélioration de la compacité par optimisation du squelette granulaire.
- réduction du rapport eau/liant.
- amélioration de la microstructure par traitement thermique après la prise .
- choix de constituants de très grandes qualités (dureté du sable, indice d'activité de la fumée de silice, classe vraie du ciment, pouvoir défloculant du superplastifiant).

Une compacité élevée du squelette granulaire est obtenue en augmentant l'étendue granulaire du squelette par adjonction d'ultrafines pouzzolaniques dont la dimension des particules est inférieure à celles des ciments.

Selon le volume et la nature des fibres utilisées (acier ou carbone), la masse volumique des BFUP varie entre 2300 et 3000 kg/m³, la teneur en air est inférieure à 4% (généralement 2%). Avec un pressage, la teneur en air peut atteindre un chiffre inférieur à 1%.

Deux formules types de BFUP sont présentées sur le Tableau 7 par la fumé de silice et renforcé de fibres d'acier.

Tableau 3 : Formules types de BFUP. [5]

Matériau	Proportions de la masse du ciment	kg/m ³
Ciment	1	934
Fumée de silice	0,25	234
Sable	1,10	1030
Eau	0,23	215
Superplastifiant (% E.S) (*)	1,40	13
Fibres d'acier (% en volume de béton)	2,4	187

(*) E. S. Extraits Secs

L'optimisation du dosage en superplastifiant des BFUP dépend généralement de la maniabilité souhaitée et de la facilité de mise en place dans les moules (coulabilité). Le dosage en superplastifiant est compris entre 1,8 et 3% en extrait sec par rapport au ciment.

I-4-2-4-Exemples de formulations :

Nous allons présenter quelques exemples de formulations de BFUP afin de mettre en évidence, notamment, les différences pouvant exister lors de l'élaboration de ces bétons en laboratoire et en usine de préfabrication.

✚ A-En laboratoire :

Une étude assez complète sur les BFUP. Les matières premières utilisées pour réaliser les différentes formules de BFUP étaient :

- deux ciments : CPA CEM 1 52,5 PM ES CP2 et CPA CEM 1 52,5 R.
- une fumée de silice (diamètre des sphères élémentaires compris entre 0,1 et 0,5 μm .
- du quartz broyé (diamètre moyen de 9 μm) .
- un sable siliceux (80% des grains compris entre 200 et 500 μm).
- des fibres métalliques (longueur de 1 à 13 mm, diamètre de 50 à 160 μm).
- plusieurs ultrafines: fumées de silice, laitier à haut fourneau, métakaolins, silicates d'alumine, cendres volantes.
- différents adjuvants: polynaphtalènes, polymélamines, polyacrylates, étherpolycarboxylique (le choix était basé sur des critères d'efficacité et de coût).

La plupart des gâchées ont été réalisées avec un malaxeur à mortier de 15 litres. Il est indiqué que l'introduction de superplastifiant en deux temps augmentait son efficacité et permettait ainsi de réduire la quantité à utiliser pour une fluidité donnée. Le premier ajout d'eau et de superplastifiant permet de mouiller la surface des constituants secs (Tableau 8).

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

Tableau 4- Formulation et séquence de malaxage. [5]

Formule utilisée (proportions massiques)	Séquence de malaxage
Ciment : 1 F.S : 0,2 Quartz broyé : 0,4 Sable : 0,7 E/C : 0,2	Mélange des matériaux secs : 2 min Ajout de l'eau et 50% du superplastifiant : 3 à 6 min Reste du superplastifiant : 2 à 8 min

Le Tableau 5 présente quelques résultats de la maniabilité d'une formule de BFUP de Rougeau et al, selon les ciments et adjuvants utilisés. Il apparaît que ces deux paramètres sont essentiels vis-à-vis de l'écoulement et donc de la mise en œuvre.

Tableau 5- Maniabilités obtenues pour une formule de BFUP utilisant différents types et dosages de superplastifiant [5].

Avec CPA-CEM I 52,5 PM ES CP2	% Poids ciment	% Extrait sec	Écoulement
Eucoflow 346	3,05 %	1,10 %	170 sec
(d=1,12 ; E.S.=36%)	5,00 %	1,80 %	100 sec

Avec CPA-CEM I 52,5 R	% Poids ciment	% Extrait sec	Écoulement
Optima 100	1,50 %	0,45 %	Pas d'écoulement
Eucoflow 346	2,08 %	0,75 %	

B-En usine :

BONNEAU et al ont fabriqué le BUHP-A (sans fibre) et BFUP-B (avec fibres) dans une bétonnière. Le mélange BFUP-C avec fibres a été fabriqué dans une usine de préfabrication. Les essais ont été réalisés sur des cylindres 100 mm de diamètre et de 200 mm de hauteur. Les résultats sont présentés dans le Tableau 6.

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

Tableau 6- Caractéristiques mécaniques en compression uniaxiale de trois BFUP [5]

Caractéristiques	BFUP-A	BFUP-B	BFUP-C
Type de cure	Dans l'eau à 90°C, 3 jours	Dans l'eau à 90°C, 3 jours	Chambre humide, T°C < 90°C, 3 j et séchage.
Echéance (jours)	16	16	14
Résistance à la compression (MPa)	163	217	197
Module d'élasticité E (GPa)	46	49	49
Coefficient de Poisson ν	0,19	0,19	0,19

Les résistances à la compression sont supérieures à 150 MPa pour les trois matériaux ce qui justifie leur appellation de BFUP. D'autre part, on constate que les valeurs obtenues en usine de préfabrication

sont légèrement inférieures à celles obtenues en laboratoire, mais il faut signaler que les conditions de traitement (cure) n'étaient pas identiques.

On peut aussi ajouter la formule de BUHP réalisée en usine et utilisée pour la construction de la passerelle de Sherbrooke au Canada, (Tableau 7)

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

Tableau 7- BUHP utilisés pour la construction d'une passerelle à Sherbrooke au Canada [5].

BUHP non fibré		
Ciment	705 kg/m ³	E/C = 0,28
Fumée de silice	230 kg/m ³	E/L = 0,21
Quartz broyé	210 kg/m ³	E/F = 0,17
Sable	1010 kg/m ³	fc28 = 163 MPa
Superplastifiant	45 kg/m ³	
BUHP fibré		
Ciment	695 kg/m ³	E/C = 0,28
Fumée de silice	225 kg/m ³	E/L = 0,21
Quartz broyé	210 kg/m ³	E/F = 0,17
Sable	990 kg/m ³	fc28 = 217 MPa
Superplastifiant	45 kg/m ³	
Fibres d'acier	200 kg/m ³	

Depuis 1994, les trois sociétés internationales, Bouygues pour le BTP, Lafarge pour les matériaux de construction et Rhodia pour les spécialités chimiques, ont travaillé en partenariat au développement d'un BUHP. Le DUCTAL[®] est un Béton à Ultra Hautes Performances à comportement ductile issu de ce partenariat. Il est destiné à un grand nombre d'applications dans la construction, le génie civil, et le bâtiment.

Une de ses formulations est récapitulée dans le Tableau 8.

Tableau 8- Formulation de DUCTAL[®] [5]

Formulation	DUCTAL [®] (kg/m ³)
Ciment CEM I 52,5R	710
Sable fin (100 - 300 µm)	1020 + 210
Fumée de silice	230
Fluidifiant (extrait sec)	13
Eau totale	140
Fibre d'acier	entre 40 et 160
Conditions particulières	aucune ou étuvage

En usage industriel et en utilisant des fibres métalliques, les résistances mécaniques atteignent 180 à 230 MPa en compression et 30 à 50 MPa en flexion (Figure 3, Figure 4).

Résistance à la compression

	Maximum	Caractéristique
Ductal®-FM	300 MPa	150 - 180 MPa
Ductal®-FO	200 MPa	100 - 120 MPa

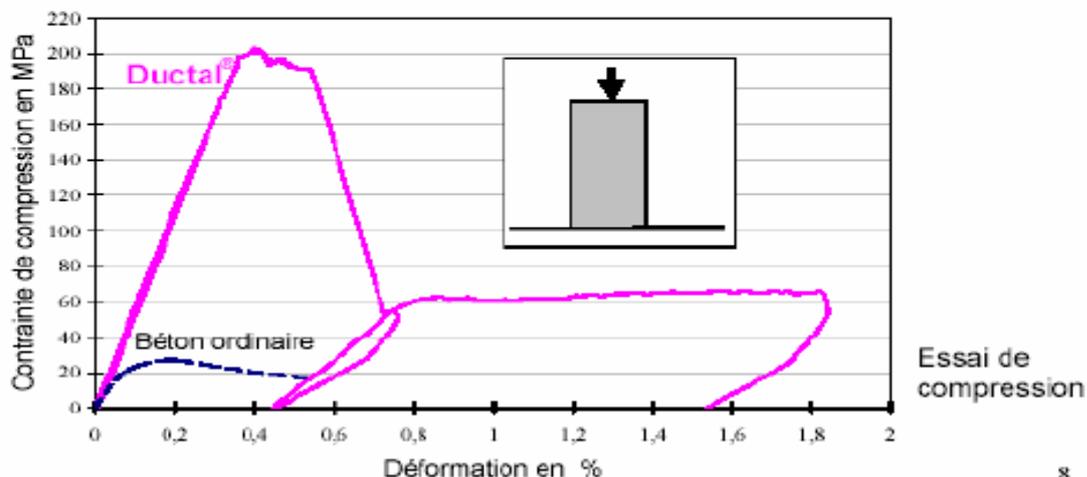


Figure 3- Contrainte de compression en fonction de la déformation [5].

Résistance à la flexion

	Maximum	Caractéristique
Ductal®-FM	80 MPa	32 MPa
Ductal®-FO	40 MPa	24 MPa

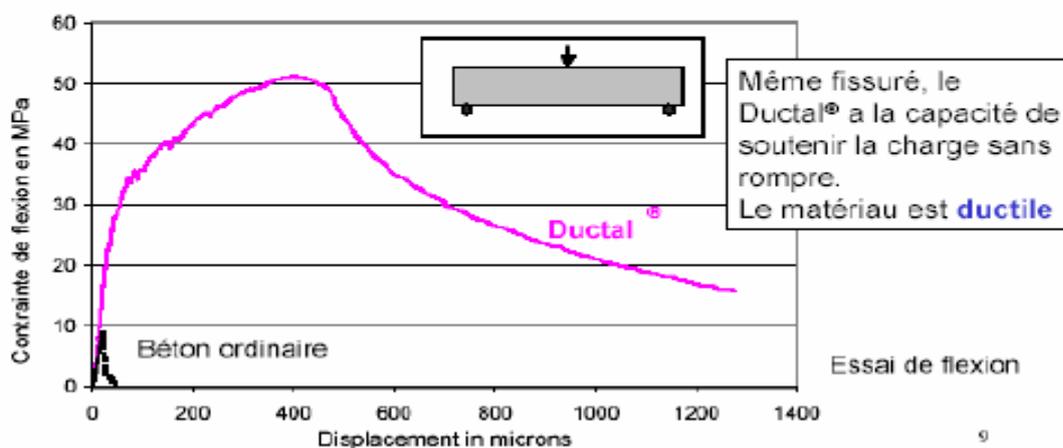


Figure 4- Contrainte de flexion en fonction du déplacement [5].

DUCTAL® développe une résistance supérieure au premier endommagement suivie, aussi bien en traction qu'en flexion, d'un comportement fortement déformable se rapprochant de celui des matériaux élasto-plastiques. Ces performances en déformation résultent d'une

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

amélioration des propriétés microstructurales de la matrice minérale et de la gestion de la liaison entre matrice et fibres organiques ou fibres métalliques à géométrie étudiée.

La mise en œuvre ne nécessite aucun renforcement par des armatures de béton armé, entraînant ainsi un gain de temps de construction considérable et de meilleures conditions de chantier tout en réduisant la section ou l'épaisseur des pièces d'ouvrage

Ses propriétés de durabilité sont équivalentes à celles d'un matériau non perméable, avec absence totale de risque de carbonatation et de pénétration des chlorures et sulfates, et résistance améliorée aux agressions acides. La résistance à l'abrasion est comparable à celle des roches naturelles. Le retrait après traitement thermique est quasi nul et le fluage très faible.

I-5- Propriétés des BFUP :

I-5-1- Propriétés rhéologiques :

On s'intéressera à l'étude de l'écoulement du béton alors qu'il est encore à l'état frais et maniable.

Il est généralement admis que le comportement du béton frais est bien représenté par le modèle Binghamien après qu'un cisaillement ait été imposé pendant un certain temps. Le béton peut donc être caractérisé entièrement par deux paramètres soit la viscosité plastique et le seuil de cisaillement selon Bonneau (Figure 29).

En pratique, on utilise un rhéomètre, appareil qui sert à étudier les propriétés rhéologiques des substances, pour évaluer le comportement rhéologique des BFUP.

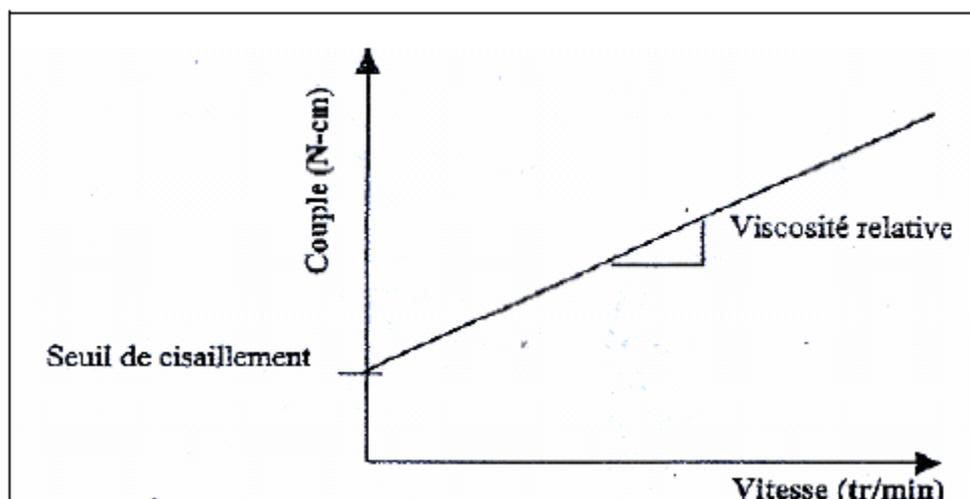


Figure 5- Représentation du comportement rhéologique des BFUP. [5]

Bonneau a montré que les BFUP, qui sont visqueux et très collants, sont des matériaux thixotropes, dont la viscosité apparente est fonction décroissante de la vitesse de déformation, et que les propriétés rhéologiques diminuent dans le temps dès la fin du malaxage.

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

La composition du mélange, le temps de malaxage, le dosage optimal en superplastifiant et la température affectent le comportement rhéologique des BFUP. Bonneau a aussi montré que les constituants utilisés adsorbent une quantité croissante de superplastifiant selon l'ordre suivant : fumée de silice, quartz broyé, ciment. L'adsorption dépend fortement de la surface spécifique.

La séquence de malaxage proposé par Bonneau pour un BFUP mélangé dans un malaxeur classique à faible cisaillement est présentée dans le Tableau 13. Le temps de malaxage peut varier selon le rapport E/C, le dosage en ciment et en ultrafines et l'efficacité du superplastifiant utilisé.

Tableau 9 - Malaxage de BFUP fabriqué en laboratoire. [5]

3 min	Homogénéisation des matériaux secs.
2 min	Ajout de l'eau et de la moitié du superplastifiant
5 min	Ajout de l'autre moitié du superplastifiant Malaxage à grande vitesse

I-5-2-Propriétés mécaniques et physiques :

I-5-3-Classes de BFUP :

Cette famille de matériau a une microstructure très dense, qui leur confère des propriétés d'étanchéité et de durabilité intéressantes. On distingue deux classes de BFUP selon leurs comportements mécaniques à la traction par flexion, à savoir les BUHP fragiles (sans fibres) et les BFUP ductiles (fibrés).

I-5-4- Résistance en compression et module d'élasticité :

DUGAT et al ont pu fabriquer en laboratoire des BPR200 et des BPR800 dont les caractéristiques mécaniques mesurées sur des éprouvettes cylindriques (respectivement 90 × 180 mm et 70 × 140 mm) sont présentées dans le tableau 10.

Tableau 10- Caractéristiques mécaniques des BPR. [5]

Caractéristiques	BPR 200	BPR 800
Traitement thermique	90 °C	Pressage 60 MPa (90°C + 250°C)
Résistance à la compression (MPa)	190-200	420-520
Module d'élasticité E (GPa)	60-66	60-74
Coefficient de Poisson ν	0,22-0,24	0,28
Limite d'élasticité linéaire (% de la résistance ultime)	60%	85%

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

Les Figure 6 et Figure 7 présentent respectivement les comportements mécaniques en compression des BPR200 et BPR800.

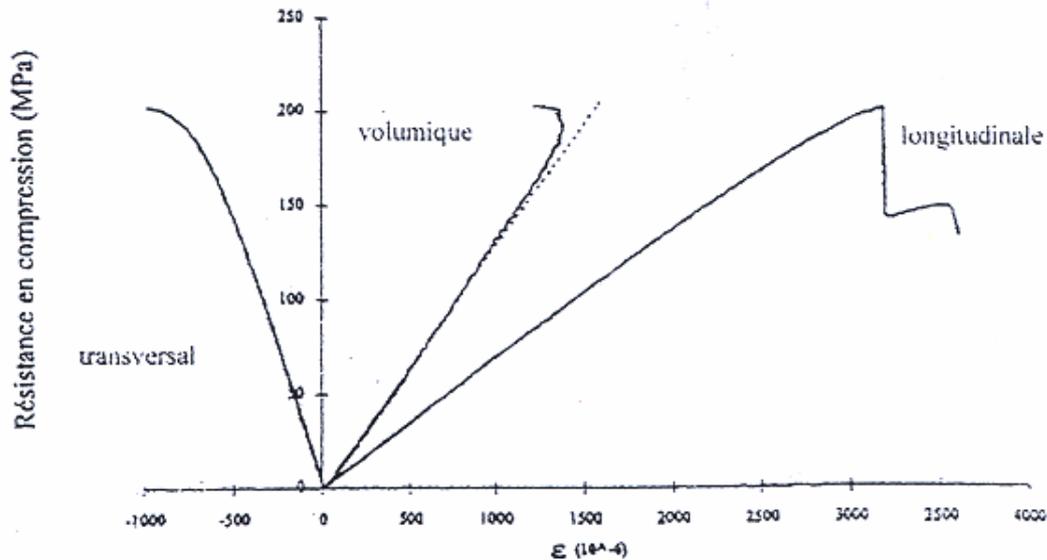


Figure 6- Courbe contrainte-déformation du BPR200 en compression. [6]

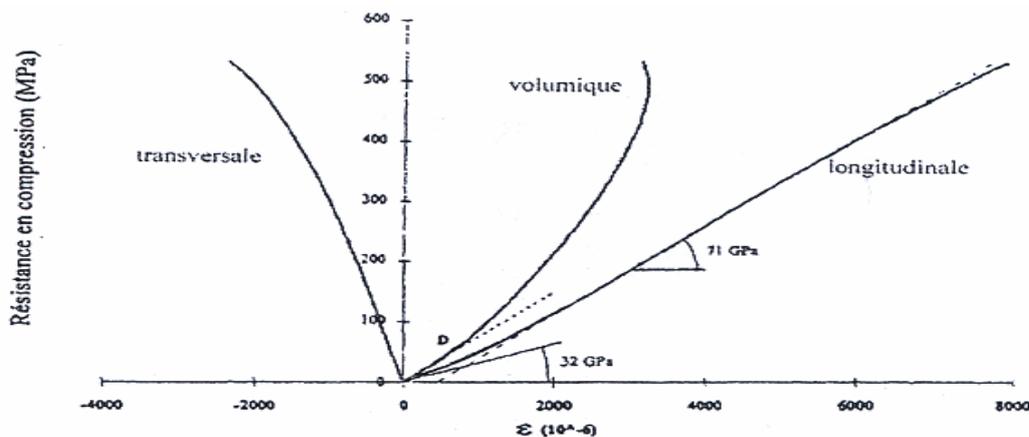


Figure 7- Courbe contrainte-déformation du BPR800 en compression. [5]

Behloul a montré une loi de comportement bilinéaire du BPR200 en compression avec un module d'élasticité de 53 GPa jusqu'à 64 MPa et un module de 42 GPa pour une valeur maximale de contrainte égale à 160 MPa. La Figure 32 illustre cette loi de comportement du BPR200.

D'autres auteurs ont effectué des essais de compression sur des matériaux similaires au BPR200. La Figure 8 montre l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du type de traitement thermique. Les éprouvettes sont des cubes de 40 mm d'arête qui ont été conservés à 20°C. Les essais ont été effectués à différentes échéances (1, 3, 7 et 28 jours).

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

Trois traitements thermiques ont été testés :

- cure à l'autoclave à 160°C pendant 24 heures, 24 heures après la fabrication ;
- cure en chambre humide à 90°C pendant 18 heures, 6 heures après la fabrication ;
- cure à température et humidité ambiante (20°C).

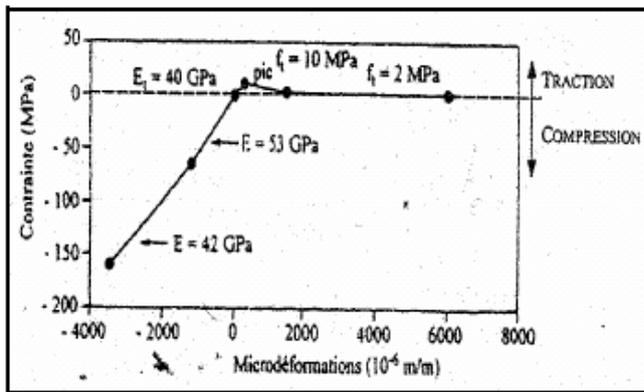


Figure 8- Loi de comportement du BPR200. [5]

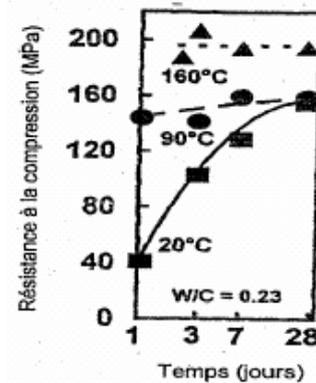


Figure 9- Résistance à la Compression des BUHP en fonction du temps type de traitement. [5]

Parmi les traitements thermiques cités ci-dessus, celui de 160°C a donné des contraintes en compression très importantes, entre 190 MPa et 210 MPa. Le traitement thermique améliore la microstructure de la matrice cimentaire et est responsable de l'augmentation des résistances mécaniques (réaction pouzzolanique et cristallisation des hydrates).

I-5-5-Résistance en flexion :

Dans le cas des BUHP non fibrés, la résistance aux efforts de flexion ne dépasse pas les 20 MPa et présente une rupture fragile. De ce fait, leur comportement mécanique est linéaire élastique jusqu'à la rupture.

L'addition de fibres entraîne une augmentation significative des résistances et une augmentation de la ductilité. Le comportement post-pic de rupture est fortement amélioré, pour les BUHP fibrés sans pressage avec une résistance à la flexion de l'ordre de 60 MPa. Pour une même teneur en fibres et un même type de fibres, Richard et al montre que le BPR200 présente une résistance à la flexion de 30 à 50 MPa tandis que le BPR800 avec pressage atteint des résistances de 45 MPa à 140 MPa. [5]

I-5-6-Résistance à la traction :

Peu de données sur la résistance à la traction directe sont disponibles dans la littérature (on caractérise surtout la résistance à la traction par l'essai de flexion : résistance à la traction par flexion).

Behloul présente des résultats sur la traction directe du BPR200, renforcé avec 2% de fibres métallique de 13 mm de longueur, compris entre 8 et 10 MPa.

Rossi et al ont mené une campagne d'essais sur la traction directe d'un matériau renfermant 7% en volume de fibres métalliques dont 5% de fibres 5 mm et 2% de fibres 25 mm sur des éprouvettes cylindriques (74×150 mm) entaillées sur une profondeur de 15 mm. Les résultats des contraintes de traction-ouverture de fissure sont présentés sur la Figure 10.

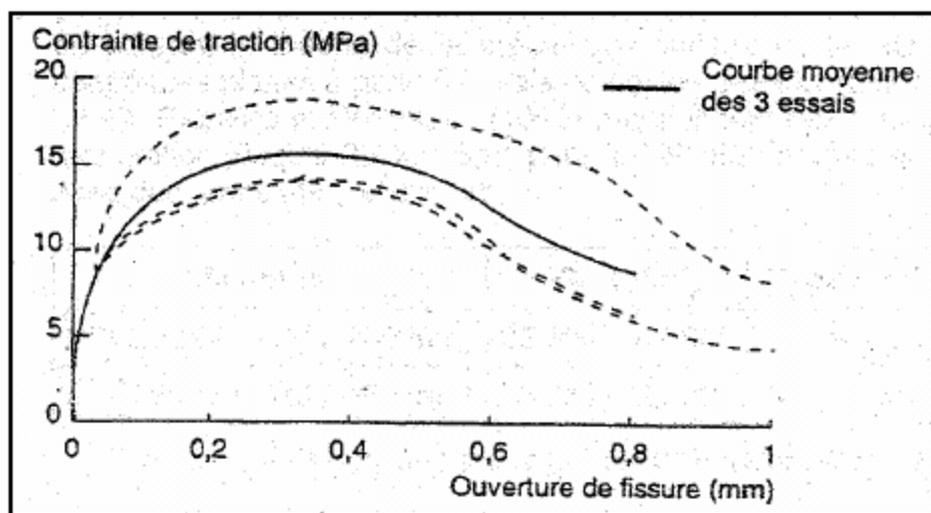


Figure 10- Courbe contrainte de traction - ouverture de fissure de béton, à 7 % en volume de fibres métalliques. [5]

L'augmentation du volume de fibres et la combinaison de fibres courtes et de fibres longues a permis d'obtenir un comportement ductile jusqu'à une ouverture de fissure de 400 μm selon Rossi et al.

a-Retrait :

Le retrait des matrices cimentaires est un processus relativement complexe. Parmi les cinq types de retrait, on s'intéresse dans cette étude aux retraits endogènes et de dessiccation des Béton à Ultra Haute Performance.

Neville a enregistré un retrait endogène de 700 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour un BUHP de rapport E/C égal à 0,17. Loukili et al ont trouvé un retrait endogène d'une valeur maximale égale à 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 160 jours, dont 45 % atteint en 1 jour et 95 % en 10 jours, sur des BUHP fibrés. Ils indiquent que les BUHP contenant plus de pâte de ciment, ils présentent un retrait endogène plus élevé que celui des bétons ordinaires.

Chap 01: Généralités sur les bétons fibré ultra performants.

En revanche, malgré l'absence de résultats expérimentaux à ce jour, les BUHP traités thermiquement à très haute température et en étuve pourraient développer un retrait quasiment nul. [5]

b-Fluage en compression :

Le fluage correspond à l'augmentation des déformations d'un élément de structure sous une charge maintenue constante au cours du temps. Les déformations de fluage sont évaluées par la différence des évolutions dans le temps des bétons chargés et non chargés.

Alepari et al ont mesuré les déformations dues au fluage (Figure 11) de BFUP traités à 90°C, d'une résistance de compression maximale de 160 MPa, et chargés à 7 jours.

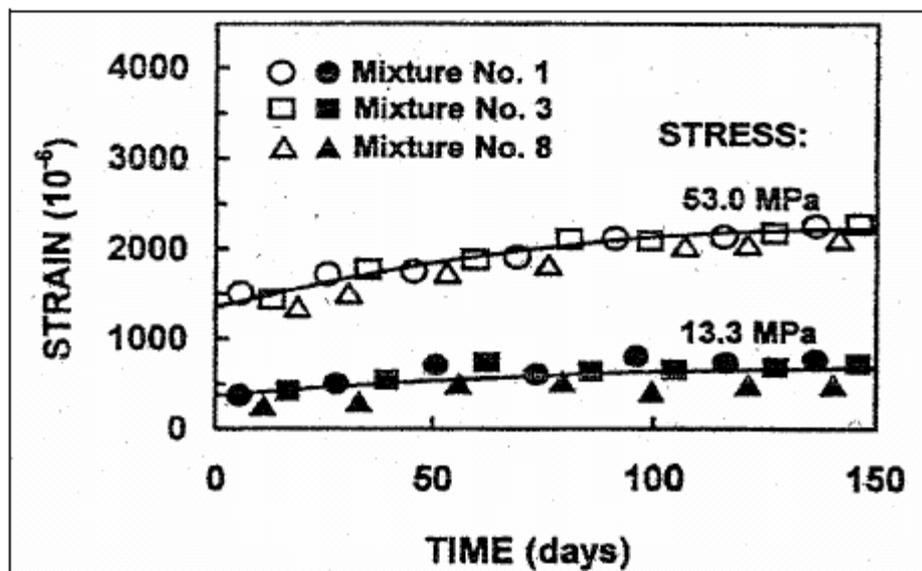


Figure 11- Déformations dues au fluage en compression de trois BFUP traités à 90 °C et chargés à 7 jours. [5]

Sous une contrainte de 53 MPa, le fluage spécifique du BUHP est d'environ 35×10^{-6} MPa-1 et correspondrait au tiers du fluage spécifique du béton ordinaire. Ils mentionnent que des résultats d'essais non publiés indiquent que le fluage spécifique des BUHP autoclavés est encore plus faible. [5]

c-DURABILITE :

La durabilité d'un matériau cimentaire dépend bien évidemment de l'environnement dans lequel il est situé mais aussi de la qualité de sa microstructure. Ainsi, d'après Baron et al, un béton est durable si sa composition et son assemblage minéralogique sont choisis en fonction des caractéristiques de l'environnement de l'ouvrage.

Les paramètres liés à la perméabilité et à la diffusivité (transports des espèces) sont les paramètres principaux à évaluer pour connaître la durabilité du béton. [5]

d-Absorption d'eau :

Plusieurs recherches ont été menées sur l'absorption d'eau des BUHP afin d'évaluer la pénétration des agents agressifs au sein du matériau. Roux et al ont réussi à mesurer une absorption d'eau des BUHP inférieure à 0,2 kg/m² après 15 jours, à comparer aux 2,75 kg/m² pour le béton ordinaire. Le BUHP est considéré comme un matériau possédant une porosité capillaire très faible et un matériau cimentaire très durable. [5]

I-6-CONCLUSIONS :

La présente recherche bibliographique montre que les BFUP sont des matériaux faciles à mouler et bien adaptés à la préfabrication. Leur formulation est fortement conditionnée par :

- le rapport eau/ciment très faible ($E/C < 0,2$).
- l'emploi de sable fin afin d'améliorer l'homogénéité.
- l'augmentation de la compacité, par optimisation du squelette granulaire et par pressage du matériau à l'état frais et pendant la prise.
- l'emploi des fibres pour augmenter la ductilité.
- l'optimisation du malaxage.
- l'amélioration de la microstructure par traitement thermique après la prise.

Ces bétons s'avèrent être des matériaux de hautes performances grâce à l'emploi d'adjuvants qui réduisent la quantité d'eau, et d'ultra fines comme la fumée de silice qui améliorent la compacité. De plus, l'ajout des fibres dans leur fabrication les rend très ductiles et très résistants à la traction. Leurs propriétés mécaniques obtenues sont ainsi très élevées :

- résistance à la compression de 150 à 200 MPa pour les BFUP réalisés sans pressage et avec un traitement thermique ne dépassant pas 100 °C ; jusqu'à 800 MPa pour les BUHP réalisés avec un pressage et traités thermiquement à 250°C ;
- résistance à la flexion de 30 à 60 MPa en fonction de la nature et de la proportion de fibres.

Les BFUP fibrés sont donc des matériaux très résistants en compression et à l'usure, et pourraient remplacer certains métaux comme l'acier et l'aluminium (ils ont un module d'élasticité comparable à celui de l'aluminium) tout en étant moins chers, malgré le coût élevé des constituants. L'utilisation des BFUP pourrait aussi permettre de diminuer le poids des pièces réalisées à ce jour en béton traditionnel en diminuant les sections et/ou en augmentant l'élanement des pièces. Enfin, les BFUP sont très fluides. On peut les utiliser pour produire des formes de complexité variée et obtenir une excellente reproduction des détails.

La problématique d'un BFUP consiste donc à mettre au point la formulation adéquate qui permette de répondre aux exigences des cahiers des charges du domaine d'application (génie civil, génie mécanique, etc...).

II.1. INFLUENCE DES FIBRES SUR LA DUCTILITE DES BETONS FIBRES :

II.1.1. Introduction :

L'utilisation des fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles. Depuis les trente dernières années, l'intérêt pour leur utilisation ne cesse de croître pour la fabrication du béton prêt à l'emploi, du béton préfabriqué et de béton projeté. Fabriquées à partir, de plastique, de verre et de matériaux naturels (cellulose) ou autre, les fibres sont disponibles en diverses formes (ronde, plates, gaufrées et déformées), dont la longueur varie généralement entre 6mm et 150mm et dont l'épaisseur est comprise entre 0.005 à 0.75mm. Elles sont ajoutées au béton durant le malaxage. Les principaux facteurs qui contrôlent la performance d'un matériau composite sont :

1-les propriétés physiques des fibres et de la matrice.

2-l'adhérence entre les fibres et la matrice.

Bien que les principes de base soient les mêmes, il existe plusieurs différences caractéristiques entre les armatures conventionnelles et les systèmes à base de fibres :

1-les fibres sont généralement distribuées à travers toute une section donnée tandis que les barres d'armatures sont disposées seulement là où ils sont requis.

2-la plupart des fibres sont plutôt courtes et peu espacées, contrairement aux barres ou aux treillis d'armature en continu ;

3-en général, il n'est pas possible d'obtenir le même rapport entre la surface de renforcement et la surface de béton que celui obtenu en utilisant un réseau de barres d'armature ou de treillis.

La plupart du temps, un faible volume de fibre est ajouté au béton (moins de 1%), ce qui s'avère efficace pour réduire la fissuration due au retrait plastique.

En général, les fibres ne modifient pas le retrait libre de béton, cependant, à des dosages assez importants, elles peuvent augmenter de façon significative la résistance à la fissuration et réduire la largeur des fissures. [8]

II.1.2. Les différents types et propriétés des fibres :



Figure-12- Plusieurs types de fibres et de produits en PRF.

En général, les fibres sont distribuées à travers toute une section de béton sorte que plusieurs fibres peuvent être mal orientées pour résister aux contraintes de traction résultant des charges appliquées. Selon la méthode de mise en place du béton, l'orientation aléatoire des fibres peut être soit bidimensionnelle ou tridimensionnelles. La mise en place par projection provoque généralement coulent une orientation aléatoire bidimensionnelles des fibres, alors que la méthode de mise en place par coulées successive produit généralement une orientation aléatoire tridimensionnelle. De plus, un grand nombre de fibres peuvent traverser les fissures à des angles entre 90° et peuvent aussi avoir une longueur d'un robage insuffisante pour permettre le développement d'une adhérence adéquate. par conséquent, seul un faible pourcentage des fibres est en mesure de résister efficacement aux contraintes de traction et de flexion. Les «facteurs d'efficacité» peuvent être aussi faibles que 0.4 pour l'orientation au hasard bidimensionnelle 0.25 pour l'orientation au hasard tridimensionnelle. Le facteur d'efficacité dépend de la longueur de la fibre utilisée et de la critique d'enrobage. D'un point de vue conceptuel, le renforcement à l'aide de fibre n'est pas très efficace pour développer une bonne résistance de composite.

Le béton fibreux sont mieux adaptés pour la fabrication de section étroites ou l'insertion d'armature conventionnelles serait extrêmement difficile. De plus, le béton projeté avec fibre convient mieux à la fabrication d'élément de forme irrégulière. Il est possible d'obtenir une importante réduction de la masse en utilisant des sections relativement mince dont les résistances est équivalentes à celle obtenue en utilisant de section de béton arme conventionnelles plus épaisses. [8]

II.1.3. LE RÔLE DES FIBRES :

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition des fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité [SUKONTASUKKUL 2004]. IL a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

Chap 02: Influence des fibres et de la poudre de verre

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures.
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes.

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer la structure en s'opposant au développement des fissures et à leur propagation. Selon le type, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire.

-l'augmentation de la ductilité et le poste fissuration ;

-la réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge ;

-la réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur) ;

-l'augmentation de la résistance à la traction par flexion ;

-l'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion.

En réalité, les fibres ont des effets sur les performances mécaniques des bétons dans tous les modes de rupture [GOPALATNAM et SHAH 1987].

On peut donc aisément comprendre qu'il est extrêmement difficile de généraliser l'apport exact des fibres par rapport à un béton ordinaire car le nombre des paramètres influant sur son comportement est considérable. [9]

II.2. INFLUENCE DE LA POUDRE DE VERRE SUR LES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX CIMENTAIRES :

II.2.1. Généralités :

L'incorporation d'un ajout cimentaire dans les mélanges de béton est une pratique largement répandue et documentée. En plus d'améliorer plusieurs propriétés du béton, le remplacement partiel du ciment par des ajouts cimentaires offre plusieurs avantages économiques et environnementaux. La réduction de la quantité de ciment requise entraîne une baisse des coûts de production, de la consommation énergétique et des émissions polluantes reliés à la fabrication du ciment Portland.

II.2.2. Définition :

Les ajouts sont des matières premières naturelles, artificielles, sous produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluant, ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leurs pourcentages dans la masse varient suivant le but de l'addition et le rôle qu'elle peut jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs. On distingue deux types d'ajouts : inertes et actifs. [10]

II.2.3. Origine et classification :

Il existe deux types d'ajouts selon leurs origines :

- Ajouts minéraux inertes.
- Ajouts minéraux actifs (naturels ou artificiels).

II.2.3.1. Les ajouts inertes :

Les ajouts inertes sont des éléments naturels ou artificiels chimiquement inertes qui ne jouent aucun rôle dans le processus de fabrication, d'hydratation, ou de durcissement du ciment portland mais peuvent modifier les propriétés finales du produit, ils sont généralement utilisés au niveau du broyage du clinker. [10]

Les roches carbonatées telle que le calcaire, craie, dolomie, sont largement utilisées comme ajouts naturels inertes au ciment.

La priorité est accordée aux roches les plus dures pour éviter un éventuel colmatage de la matière lors du broyage.

Les ajouts inertes sont moins connus dans la pratique de l'industrie cimentière, ils sont habituellement utilisés lorsque la cimenterie ne dispose pas de source d'ajouts minéraux actifs.

II.2.3.2. Les ajouts minéraux actifs :

Il existe deux types d'ajouts minéraux actifs :

II.2.3.2.1. Ajouts minéraux actifs naturels :

Les ajouts minéraux actifs d'origine sédimentaire sont les dolomites, les tripolis et les gaizes, ils se rapprochent par leurs compositions chimiques.

Les ajouts minéraux actifs d'origines volcaniques sont représentés par les pouzzolanes, les cendres, le tuf et la pierre ponce.

II.2.3.2.2. Ajouts minéraux actifs artificiels :

Parmi les ajouts actifs artificiels on peut citer :

- Les déchets siliciques actifs.
- Les argiles cuites (déchets de briques et de tuiles).
- Les cendres des combustibles.
- Les laitiers métallurgiques.
- Les déchets siliciques actifs obtenus à la suite de l'extraction de l'alumine à partir de l'argile renferment souvent l'anhydrite sulfurique a quantité élevée.
- Les argiles cuites se pressentent sous forme de poudre fine obtenue à la suite de broyage de l'argile a teneur élevé en KAOLINITE (AL_2O_3 , $2SiO_2$, $2H_2O$) spécialement cuite à une température de 600 à 800°C.
- Les laitiers métallurgiques sont également utilisés dans la production du ciment autant qu'ajouts minéraux actifs.

L'activité des laitiers est déterminée à partir de sa composition minéralogique et du rapport des phases cristallines et vitreuses qui dépendent des conditions de refroidissements.

L'utilisation des ajouts minéraux actifs dans l'industrie du ciment est préférée grâce à leurs avantages pas rapport aux ajouts inertes.

II.2.4. Rôle des ajouts minéraux actifs :

Le rôle des ajouts minéraux actifs consiste à fixer la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ du ciment qui se dégage lors de l'hydratation de C_3S pour former des compositions difficilement solubles (stables) qui contribuent à la résistance du ciment.

Les ajouts minéraux actifs améliorent la compacité du mortier et du béton, cette compacité donne une meilleure protection du ciment à l'agressivité des eaux douces et des sels.

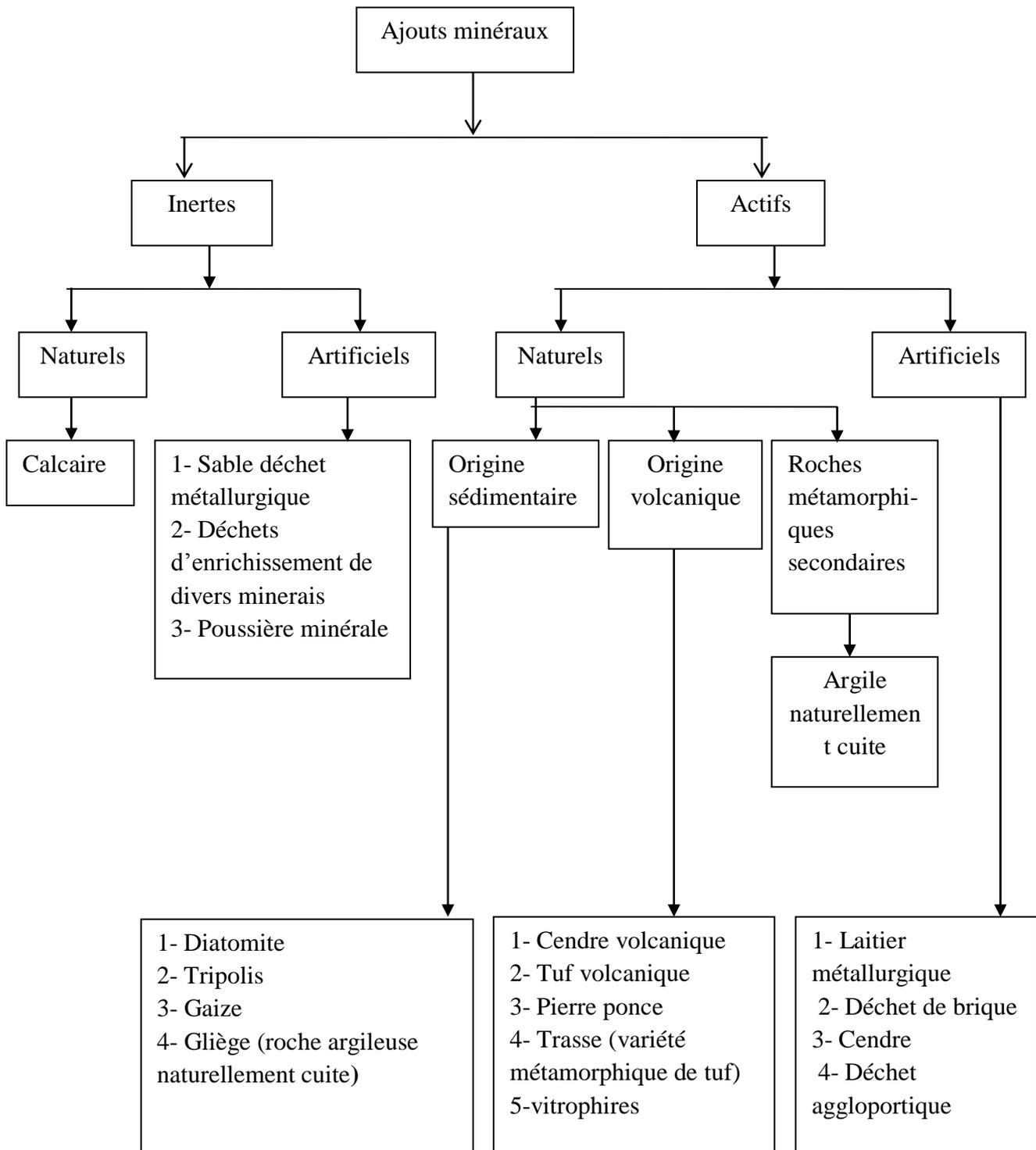


Figure 13. Origine et classification des ajouts cimentaires.

Les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé, la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles, telles que le schiste calciné, l'argile calcinée ou le méta kaolin (figure 14.), sont des matériaux qui, combinés au ciment portland, contribuent aux propriétés du béton durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois



Figure 14. Ajouts cimentaires. De gauche à droite : cendres volantes (classe C), métakaolin (argile calcinée), fumée de silice, cendres volantes (classe F), laitier et schiste calciné.

Ces matériaux sont aussi généralement catégorisés comme ajouts cimentaires ou ajouts minéraux. Une pouzzolane est un matériau siliceux ou aluminosiliceux qui, finement divisé et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment portland pour former des composés possédant des propriétés liantes.

Les ajouts cimentaires ajoutés au béton font partie du système cimentaire complet. Ils peuvent être utilisés en supplément ou comme remplacement partiel du ciment portland ou du ciment composé dans le béton, selon les propriétés des matériaux et l'effet souhaité sur le béton.

Les ajouts cimentaires sont utilisés pour améliorer une propriété du béton en particulier, comme par exemple pour réduire l'effet néfaste de la réaction alcali-granat. Le dosage optimum à utiliser doit être établi à l'aide d'essais.

Des essais sont nécessaires afin de déterminer si le matériau améliore réellement la propriété et le dosage à utiliser. Un dosage approprié est important puisqu'un surdosage peut être néfaste alors qu'un dosage trop bas ne produira pas l'effet désiré. De plus, les ajouts cimentaires réagissent de façon différente avec différents ciments.

Autrefois, la cendre volante, le laitier, la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles telles l'argile et le schiste calcinés étaient utilisés dans le béton de façon individuelle.

Aujourd'hui, à cause d'un meilleur accès à ces matériaux, les producteurs de béton peuvent combiner deux matériaux ou plus afin d'optimiser les propriétés du béton.

Des mélanges utilisant trois ajouts cimentaires, connus sous le nom de mélanges ternaires, sont de plus en plus disponibles. [10]

II.2.4.1. Cendres volantes :

Les cendres volantes, les ajouts cimentaires les plus fréquemment utilisés dans le béton, sont des résidus finement divisés (Poudre ressemblant au ciment) (Figure 4.) résultant de la combustion du charbon pulvérisé et évacué de la chambre de combustion d'un four par les gaz qui s'en échappent. La plupart des cendres volantes sur le marché sont un sous produit des centrales thermiques. Durant la combustion, presque toute la matière volatile et le carbone du charbon sont brûlés.

Les impuretés du charbon (telle l'argile, le feldspath, le quartz et le schiste) entrent en fusion et sont évacuées de la chambre à combustion par les gaz d'échappement. Durant cette étape, le matériau fusionné refroidit et se solidifie en petites particules sphériques vitreuses nommées cendres volantes. Les cendres volantes sont ensuite extraites des gaz d'échappement à l'aide de dépoussiéreurs électrostatiques ou de sacs filtrants.

La plupart des particules de cendres volantes sont des sphères solides et certaines sont des cénoosphères creuses.

Des plérosphères, qui sont des sphères contenant de plus petites sphères, sont aussi présentes.

Les matériaux broyés, tel le ciment portland, sont constitués de particules angulaires.

La dimension des particules de la cendre volante est comprise entre moins de 1 μm et plus de 100 μm , avec une dimension caractéristique de moins de 20 μm . Seuls 10 % à 30 % des particules (en masse) sont plus grosses que 45 μm .

La surface spécifique est généralement comprise entre 300 et 500 m^2/kg , bien que certaines cendres volantes aient des surfaces spécifiques aussi faibles que 200 m^2/kg et aussi élevées que 700 m^2/kg (figure 15.)

La masse volumique (masse par unité de volume incluant l'air entre les particules) d'une cendre volante mal compactée peut varier de 540 à 860 kg/m^3 alors que celle d'une cendre compactée par vibration ou compactée par l'entreposage est comprise entre 1120 et 1500 kg/m^3 .

La cendre volante est constituée surtout de silicate de verre contenant de la silice, de l'alumine, du fer et du calcium. Les composants mineurs sont le magnésium, le soufre, le sodium, le potassium et le carbone. Des composants cristallins sont présents en petites quantités.

La densité d'une cendre volante varie de 1,9 à 2,8. Elle est généralement de couleur beige ou grise (figure 16).

Les cendres volantes de type F et de type C, sont généralement utilisées comme ajouts pouzzolaniques dans les bétons d'usage courant. La cendre volante de type F a une faible teneur en calcium (moins de 8 % de CaO) et une teneur en carbone de moins de 5 %, quoique

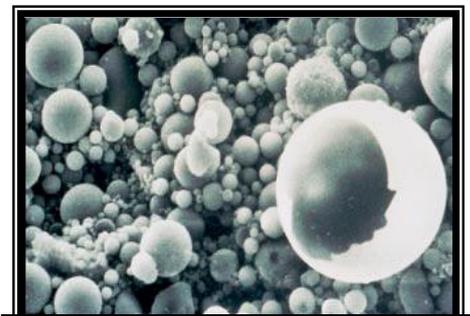


Figure 15- Micrographie de cendres volantes au microscope électronique à balayage. Grossissement 1000X. Même si la majorité des sphères de cendres volantes sont solides, quelques particules, appelées cénoosphères, sont creuses (comme montré sur la micrographie).

Chap 02: Influence des fibres et de la poudre de verre

certaines puissent avoir des teneurs en carbone de près de 10 %. La cendre volante de type C a une teneur plus élevée en calcium que celle de type F.

Elle comprend deux catégories : type CI (teneur en calcium intermédiaire) avec une teneur en CaO entre 8 % et 20 %; Type CH (haute teneur en calcium) avec une teneur en CaO de plus de 20 %. Les cendres volantes de type C ont des teneurs en carbone de moins de 2 %. Plusieurs cendres volantes de type C s'hydratent lorsqu'elles sont exposées à l'eau et durcissent en moins de 45 minutes. Certaines cendres volantes satisfont à la fois les exigences des types F et C.

Les cendres volantes de type F sont souvent utilisées à un dosage de 15 % à 25 % par masse de matériaux cimentaires et la cendre volante de type C est utilisée à un dosage de 15 % à 40 % par masse de matériaux cimentaires. Toutefois, lorsque le béton doit résister aux sels de déglçage, la quantité de cendre volante ne doit pas dépasser 25 % de la masse des matériaux cimentaires, sauf si des essais de durabilité confirment la bonne durabilité du béton avec cendre volante. Le dosage varie selon la réactivité de la cendre et l'effet souhaité dans le béton. [10]

II.2.4.2. Fumée de silice :

La fumée de silice, aussi appelée microsilice ou fumée de silice condensée, est un coproduit qui est utilisé comme pouzzolane (figure 17.). Ce coproduit est le résultat de la réduction du carbone et du quartz de très grande pureté dans un four à arc électrique durant la fabrication du silicium ou d'alliages de ferrosilicium. La fumée de silice s'élève sous forme de vapeur oxydée émise par les fournaies chauffées à 2 000 °C. Lorsqu'elle se refroidit, elle condense pour ensuite être captée dans d'énormes poches de tissu. La fumée de silice est ensuite traitée pour enlever les impuretés et pour contrôler la taille des particules.

La fumée de silice condensée est composée essentiellement de bioxyde de silicium (normalement plus de 85 %) sous forme non cristalline (amorphe). Puisqu'elle est aérogène comme la cendre volante, elle a une forme sphérique (figure 17). Elle est extrêmement fine, avec des particules de moins de 1 µm de diamètre, qui est en moyen est d'environ 0,1 µm, soit environ 100



Figure 16- Cendres volantes : une poudre ressemblant au ciment utilisé dans le béton depuis les années 1930.



Fig- 17 Poudre de fumée de silice.

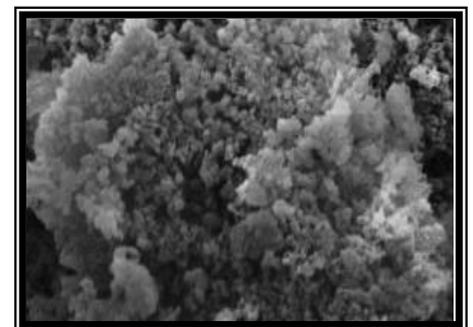


Figure 18- Micrographie de particules de fumées de silice au microscope électronique à balayage. Grossissement 5000X.

fois plus petit que la dimension moyenne d'un grain de ciment.

La fumée de silice condensée à une surface d'environ 20 000 m²/kg (selon la méthode d'adsorption d'azote). Pour fins de comparaison, la surface de la fumée de tabac est d'environ 10 000 m²/kg. Les ciments de type 10 et de type 30 ont des surfaces de 300 à 400 m²/kg et de 500 à 600 m²/kg (Blaine), respectivement. La densité de la fumée de silice est généralement d'environ 2,20 à 2,25, mais peut être aussi élevée que 2,5. Le ciment portland a une densité d'environ 3,15. La masse volumique de la fumée de silice varie entre 130 et 430 kg/m³. La fumée de silice est vendue sous forme de poudre mais est plus souvent disponible sous forme de liquide. La fumée de silice est utilisée selon un dosage correspondant entre 5 % et 10 % de la masse totale des matériaux cimentaires. Elle est utilisée dans des applications où un niveau élevé d'imperméabilité est requis, et dans le béton à haute résistance.

Lorsque le béton doit résister aux sels de déglacage, la quantité maximum de fumée de silice devrait être de 10 % de la masse de matériaux cimentaires. [10]

II.2.4.3. Pouzzolanes naturelles :

Les pouzzolanes naturelles débutent avec des projets d'infrastructures publiques du début du 20^e siècle, tels que les barrages, où elles ont été utilisées pour contrôler l'augmentation de la température dans le béton de masse et agir en tant que matériaux cimentaires. En plus de contrôler l'augmentation de la température, les pouzzolanes naturelles ont été utilisées pour améliorer la résistance du béton à l'attaque par les sulfates et elles ont été parmi les premiers matériaux utilisés pour combattre la réaction alcali-silice dans les bétons.

De nos jours, les pouzzolanes naturelles les plus couramment utilisées sont les matériaux traités thermiquement dans un four puis broyés en fine poudre.

On y retrouve notamment l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin (figure 18, 19 et 20). L'argile calcinée est utilisée dans les constructions en béton conventionnel, tout comme dans le cas des autres pouzzolanes. Elle peut être utilisée en remplacement partiel du ciment, en général entre 15 % et 35 %, et peut être utilisée pour améliorer la résistance à l'attaque par les sulfates, pour contrôler la réactivité alcali silice et pour réduire la perméabilité.

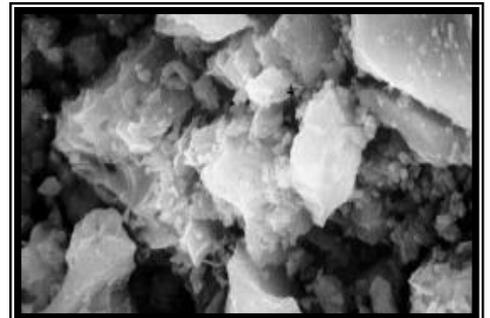


Figure 19. Micrographie du schiste calciné au microscope électronique à balayage. Grossissement 5000X.

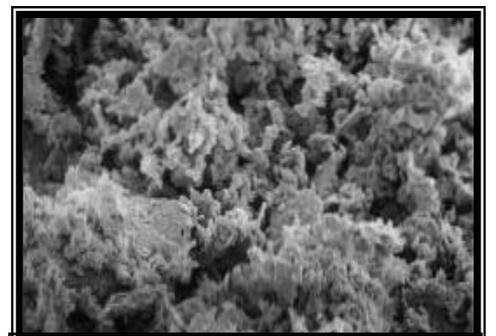


Figure 20. Micrographie de particules d'argile calcinée au microscope électronique à balayage. Grossissement 2000X.

Chap 02: Influence des fibres et de la poudre de verre

II.2.4.4. Laitier de haut fourneau :

II.2.4.4.1. Historique :

Depuis des décennies l'industrie sidérurgique transforme dans les hauts fourneaux les minerais de fer en fonte brute servant à la production d'acier de toutes natures.

La production qui en résulte après déversement dans des fosses et refroidissement est une roche artificielle de couleur gris clair dénommée LAITIER DE HAUTE FOURNEAU (LHF), possèdent des caractéristique chimique, physique est mécanique bien déterminées.

II.2.4.4.2. Définition :

Le laitier de haut-fourneau granulé (figure 22), aussi appelé ciment de laitier, est fabriqué à partir du laitier de fonte, c'est un liant hydraulique non métallique qui est composé essentiellement de silicates et d'alumino-silicates de calcium qui se sont développés dans des conditions de fusion de l'acier dans un haut-fourneau.

Le laitier en fusion, à une température d'environ 1 500 °C, est refroidi rapidement en le trempant dans l'eau pour former un matériau granuleux ressemblant à un sable vitreux.

Le matériau granulé, broyé à une taille de moins de 45 microns, possède une finesse Blaine d'environ 400 à 600 m²/kg. La densité d'un laitier de haut fourneau granulé broyé est comprise entre 2,85 à 2,95. La masse volumique des laitiers varie de 1050 à 1375 kg/m³.

Le laitier broyé, de forme angulaire et rugueuse (figure 23), s'hydrate en présence de l'eau et d'un activateur, le NaOH ou le Ca(OH)₂, tous deux présents dans le ciment portland, et durcit de la même manière que le ciment portland.

Toutefois, le laitier refroidi par air ne possède pas les propriétés hydrauliques du laitier refroidi par eau. Le laitier broyé de haut-fourneau, lorsqu'il est utilisé dans le béton à usage général, constitue normalement entre 30 % et 45 % des matières cimentaires du mélange.



Figure 21. Laitier de haut fourneau granulé broyé.

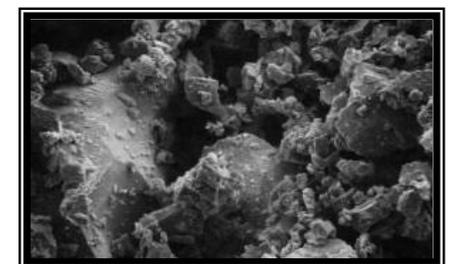


Figure 22. Micrographie de laitier au microscope électronique à balayage. Grossissement 2100X.

II.2.4.4.5. Composition chimique moyenne :

La composition chimique des laitier a évalué dans le temps, aujourd'hui les laitier ont une composition chimique est relativement constante, en moyenne le laitier contient:

Tableau 11. la composition chimique moyen de laitier. [11]

Eléments	Proportion [%]
CaO	38-45
SiO ₂	31-36
Al ₂ O ₃	9-18
MgO	4-10
Fe ₂ O ₃	<1
S	<1
CaOlibre	< 1
Na ₂ O + K ₂ O	0.5-1.2
MnO	<1

Les laitiers peuvent être divisés en deux groupes en fonction du rapport CaO/SiO₂ :

- ✓ Laitier acide (CaO/SiO₂ < 1)
- ✓ Laitier alcalin (CaO/SiO₂ >1)

Un refroidissement lent entraîne la cristallisation de silicates d'aluminium et de magnésium les plus courants sont le mellite (solution solide entre la gehlenite C₂AS et akermanite C₂MS₂) et la merwinite C₃MS₂, le laitier trempé est vitreux.

La structure du laitier peut être assimilée à celle d'un filet dont l'ossature est formée d'un réseau silicate covalent est dont certaines mailles ont été coupées aux ponts les plus faibles, les éléments structuraux de la phase vitreuse sont tétraèdres SiO₂ isolés et les groupes anionique de silice dont les charges sont neutralisés par des cations Ca²⁺ et Mg²⁺. [11]

II.2.4.4.6. Réactivités du laitier de haut fourneau :

Les facteurs qui influent sur la réactivité des laitiers sont les suivant :

- 1- le degré de vitrification (teneur en verre)
- 2- la composition chimique
- 3- la composition minéralogique
- 4- la finesse de broyage
- 5- L'activation des verres du laitier

Le degré de vitrification du laitier est très difficile à quantifier par l'absence d'un ordre de grandeur et l'impossibilité d'observer les pics par voie de diffraction de rayons X, il est difficile de déterminer la quantité minimale de verre dans un laitier pour assurer une bonne réactivité.

En augmentant le rapport (CaO + MgO)/(SiO₂ + Al₂O₃) > 1,15 la teneur en verre diminue parce que le réseau du verre formé de SiO₂ et de Al₂O₃ est réduit. [11]

Chap 02: Influence des fibres et de la poudre de verre

La réactivité du laitier augmente avec sa basicité, le contenu en acide soluble SiO_2 et Al_2O_3 et le contenu CaO . L'augmentation du contenu du Fe_2O_3 dans la structure vitreuse diminue le degré de condensation des anions silicates dans la structure vitreuse ce qui également augmente la réactivité du laitier. La surface spécifique et la distribution granulométrique affectent aussi la réactivité du laitier.

Les verres avec une certaine quantité de phase cristallisée ont une réactivité satisfaisante. Alors la structure vitreuse ne constitue pas à elle seule une garantie d'une grande réactivité du laitier. La composition chimique est un paramètre très important aussi, elle influe sur le degré de vitrification du laitier au moment de la trempe, mais aussi sur la solubilité et ainsi sur la réactivité du verre au cours de son hydratation. [11]

Les meilleures résistances sont données par des laitiers contenant environ 5% de matière cristalline qui crée des tensions dans la structure et représente des sites de nucléation pour les produits d'hydratation.

Pour prévoir la réactivité du laitier en fonction de sa **composition chimique**, plusieurs modules ont été élaborés, les modules suivants sont donnés à titre indicateur pour définir une composition chimique souhaitable d'un laitier mais aucune exigence n'est prévue :

$$M_1 = (C + M + 0,33A)/(S + 0,67A) \geq 1$$

$$M_2 = (C + M + A)/S \geq 1$$

$$M_3 = (C + \text{CaS} + 0,5M + A)/(S + \text{MnO}) \geq 1,5$$

La composition minéralogique et chimique qui peut être représentée par un nombre appelé module hydraulique ou module de basicité tel que $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2$. [12]

La réactivité dépend également de la finesse de broyage et de la présence des activateurs.

La magnésie incorporée jusqu'à 2,5% améliore le comportement hydraulique du laitier et en quantité plus élevée que 11% équivaut au CaO , l'alumine Al_2O_3 en dosage plus élevé que 13% augmente les résistances à court terme, mais baisse celles à long terme, tandis que le MgO a un effet négatif sur la résistance.

Ces résultats contradictoires sont sûrement la conséquence de la réactivité différente des laitiers. Alors, chaque laitier représente un cas particulier, et des conclusions générales sur la résistance des bétons au laitier ne seraient pas appropriées.

II.2.5. Utilisation de la poudre de verre comme ajout cimentaire :

II.2.5.1. INTRODUCTION :

Différents ajouts minéraux sont actuellement utilisés dans le béton. Ils sont utilisés en addition ou en substitution d'une partie du ciment comme matières cimentaires supplémentaires. Leur

Chap 02: Influence des fibres et de la poudre de verre

usage fournit au béton une matrice plus dense qui sera plus résistante aux produits agressifs tels que les sulfates, les chlorures, et les autres agents agressifs.

La finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin gouverne leurs propriétés cimentaires dans le béton. Leur contenu en phase amorphe est un facteur clé dans la réactivité des ajouts minéraux. (A.TAGNIT ET P-C NKINAMUBANZIB.les ajouts cimentaires et le développement durable. département de génie civile, université de sherbrooke.

II.2.5.2. Généralités sur les verres :

Du fait sa nature amorphe et qu'il contient des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est finement broyé. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment portland dans les bétons.

Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons se gonflent et se fissurent. [8].

Depuis, l'idée a été en partie abandonnée. Ce n'est que depuis une vingtaine d'année que le sujet est redevenu d'actualité. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables municipalités et celles-ci ont encouragé de nouvelles études. [8].

II.2.5.3. Définition du verre :

L'état solide est plus ordonné que l'état gazeux ou que l'état liquide : les cristaux présentent une meilleure illustration. Il existe des solides apparemment moins ordonnés tel que : verre, polymères vitreux et des solides partiellement ordonnés comme les polymères semi-cristallins. Pour tous ces matériaux non-cristallins, il existe fréquemment une certaine forme d'ordre à courte distance, même si ce n'est pas l'ordre cristallin.

Si l'on fond des cristaux de quartz naturel, on constate après refroidissement brutal que le matériau manifeste des propriétés différentes de celles du matériau initial.

On obtient un verre, la silice vitreuse. L'étude approfondie de la silice vitreuse, en particulier par diffraction des rayons X, montre que les distances interatomiques imposées par les liaisons covalentes sont toujours respectées.

Les tétraèdres continuent à exister dans la silice vitreuse, comme dans la cristobalite, mais il n'y a pas de motif qui se répète périodiquement.

II.2.5.4. Comportement du verre dans un milieu cimentaire :

Le verre incorporé dans les bétons peut manifester plusieurs types de comportement, essentiellement en fonction de sa granularité : une granularité grossière tend à provoquer un phénomène d'alcali-réaction générateur de désordres, alors qu'un verre fin développe une action bénéfique identifiable à une réaction pouzzolanique.

II.2.5.5. Réaction pouzzolanique du verre :

L'activité pouzzolanique du verre peut être évaluée par diverses : les testes mécaniques sur éprouvettes de mortier et béton à base de ciment ou sur des mortiers à base de chaux, ou encore tests chimiques de consommation de chaux notamment par ; l'essai chapelle, ATG, et DRX.

Il a été difficile, voire impossible, de rassembler tous les travaux élaborés dans les mêmes conditions. Toutefois les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

1. La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique : plus les grains de verre sont fins, meilleure et son activité pouzzolanique.
2. La résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente.
3. L'activité pouzzolanique varié d'un verre à un autre, selon leurs couleurs, le verre brun est le verre qui possède la plus faible activité, par contre le verre vert et le verre blanc présentent une activité pouzzolanique considérable.

II.2.6. CONCLUSIONS :

L'utilisation des ajouts ouvre les possibilités de formulation de béton adaptés à des conditions variées, certaines normes ont évolué et se sont complétés des conditions que devraient satisfaire les additions pour pouvoir être partiellement substituables au ciment. Au niveau du béton, il faut que celui-ci demeure mécaniquement résistant et durable. Cela implique que les additions soient normalisées et que leur conformité aux normes soit garantie.

[13]

Les caractéristiques présentés par le verre lui confère d'avoir la qualité d'un ajout cimentaire utile pour la confection des bétons et mortiers de haute performance.

Chapitre 03 :Matériaux et procédures expérimentales

III.1. Introduction :

Dans cette partie, on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux.

La caractérisation des matériaux de construction tels que la matrice cimentaire nécessite la connaissance de la nature de ses composants. Par ailleurs, la détermination des dosages optimaux, ainsi que l'illustration de certaines interprétations ne pourraient être possible que si les différents constituants sont bien caractériser, c'est l'objectif de ce chapitre.

Nous procéderons successivement à l'identification des matériaux utilisés, à la présentation des essais et à la caractérisation des bétons élaborés.

III.2. Le Ciment :

Le ciment utilisé est le ciment portland CPJ-CEMII/A-L 52 ,5N, EL SARIE est un ciment grés pour béton ; destiné à la construction de résistance élevée ; c'est le résultat de 80 - 95 % de clinker ainsi que des ajouts secondaires entre 0 et 5 %.

Le gypse est ajouté pour réguler la prise du ciment.

La composition et les caractéristiques du ciment sont conformes aux normes en vigueur, en l'occurrence la NA 442.

Les compositions chimiques et minéralogiques ainsi les caractéristiques physico-mécaniques sont présentées respectivement dans les tableaux 13, 14, 15.

Tableau12: Composition minéralogique du ciment.

constituant	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO _{libre}
Teneur %	58	18	04	14	01

Tableau 13: Composition chimique du ciment.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cl ⁻	Ins	PF
Teneur en %	25,44	5,42	3,44	58,70	1,83	0,70	0,20	2,34	0,072	1,66	1,420

Tableau 14: Caractéristiques physico-mécaniques du ciment.

Caractéristiques physiques	Résistances mécaniques
Début de prise 205 mn	Flexion (MPa) :
Fin de prise 295 mn	- 02j : 5,0
Masse spécifique 3,05 g/cm ³	- 07j : 7,2
SSB 4114 cm ² /g	- 28j : 8,6
Retrait (µm/m) :	Compression (MPa):
03j _ 153	- 02j : 22,6
07j _ 388	- 07j : 42,5
28j _ 725	- 28j : 58,9
Gonflement (µm/m) :	
03j _ 0	
07j _ 0	
28j _ 0	
Stabilité (mm) :	
Froid : -	
Chaud : 0,0	

Commentaire :

Les caractéristiques manifestées précédemment sont satisfaites aux exigences des normes en vigueur.

III.3. La poudre de verre :

Du fait sa nature amorphe et qu'il contient des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est finement broyé. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment portland dans les bétons.

Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons se gonflent et se fissurent. [2].

Depuis, l'idée a été en partie abandonnée. Ce n'est que depuis une vingtaine d'année que le sujet est redevenu d'actualité. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables municipalités et celles-ci ont encouragé de nouvelles études. [2].

Chapitre 03 :Matériaux et procédures expérimentales

L'état solide est plus ordonné que l'état gazeux ou que l'état liquide : les cristaux présentent une meilleure illustration. Il existe des solides apparemment moins ordonnés tel que : verre, polymères vitreux et des solides partiellement ordonnés comme les polymères semi-cristallins. Pour tous ces matériaux non-cristallins, il existe fréquemment une certaine forme d'ordre à courte distance, même si ce n'est pas l'ordre cristallin.

Si l'on fond des cristaux de quartz naturel, on constate après refroidissement brutal que le matériau manifeste des propriétés différentes de celles du matériau initial.

On obtient un verre, la silice vitreuse. L'étude approfondie de la silice vitreuse, en particulier par diffraction des rayons X, montre que les distances interatomiques imposées par les liaisons covalentes sont toujours respectées.

Les tétraèdres continuent à exister dans la silice vitreuse, comme dans la cristobalite, mais il n'y a pas de motif qui se répète périodiquement.

Pour notre étude, le verre provient essentiellement de verre sodocalcique, la poudre de verre est obtenue après le broyage de débris de verre ramassés ; le broyage dure 2h pour aboutir à la finesse voulue.

Sa préparation se fait en plusieurs étapes qui se résument par le schéma suivant :

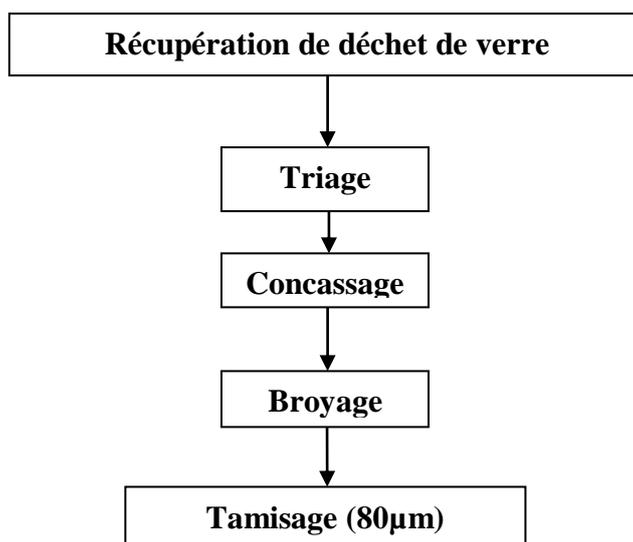


Figure 24: Schéma technologique de préparation de la poudre de verre.

Chapitre 03 : Matériaux et procédures expérimentales

Tableau 15: Compositions chimiques des poudres de verre.

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PAF
Verre Transparent	72,42	1,08	0,36	10,35	1,53	0,30	0,41	12,77	0,01	0,03	0,73
Verre Opaque	70,55	1,02	0,39	11,65	1,34	0,34	0,35	13,83	0,01	0,02	0,49
Verre Fumé	71,09	1,02	0,75	10,91	1,81	0,24	0,38	12,42	0,01	0,03	1,34

Discussion :

Les trois types de verre sont des verres sodo-calcique.

Le verre opaque contient une quantité plus élevée en soude et calcium.



Figure 25: Déchets de verre concassé et/ou finement broyé.

Tableau 16: Masses absolues des poudres de verre.

Type de verre	Transparent	Opaque	Fumé
Masse volumique (g /cm ³)	2,59	2,53	2,52

Tableau 17: Surface spécifique Blaine des poudres de verre.

Type de verre	Transparent	Opaque	Fumé
SSB (cm ² /g)	8520	11712	10167

Interprétation :

En remarque que la SSB des poudres de verre sont toutes plus grandes que celle du ciment.

Les poudres de verre fumé et opaque sont considérablement plus fines que la poudre de verre transparent.

III.4. Le sable :

Pour la confection de notre béton, on a utilisé le sable de la wilaya d'Oued Souf situé à 620 km sud-est d'Alger. Plusieurs essais ont été réalisés pour caractériser ce sable.

- Le module de finesse **MF** est défini comme étant égale au centième de la somme des refus cumulés sur les différents tamis de la série suivante : 0,063 - 0,315 - 1,6 - 3,15 - 5mm. Il permet de juger globalement la granularité d'un sable, un module de finesse élevé indique un sable grossier, un module faible caractérise un sable fin.
- La propreté est une notion qualitative importante d'appréciation d'un sable. En effet, les sables contiennent en général des fines à différentes teneurs. Les deux essais de contrôles de propreté sont l'équivalent de sable et l'essai au bleu méthylène.

$$ES = h_1/h_2 * 100.$$



Figure 26: Essai de l'équivalent sable.

- L'analyse chimique du sable donne la composition pondérale en % des différents éléments chimiques sous forme d'oxydes.

Chapitre 03 :Matériaux et procédures expérimentales

Tableau 18: Composition chimique du sable d'oued Souf.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	TiO ₂	PF
Teneur %	93,2	2,49	0,37	0,89	0,44	1,26	0,36	0,01	0,08	0,06	0,81

Tableau 19: Caractéristiques physiques du sable d'oued Souf.

Mv _{ap} (kg /m ³)	Mv _{ab} (g/cm ³)	ESP	Mf
1620	2,6	75%	2,06

Tableau 20: Analyse granulométrique du sable d'oued Souf.

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus (%)	Passants (%)
6,3	10,9	1,09	98,91
5	12,9	1,29	98,71
2,5	29,6	2,96	97,04
1,25	88,2	8,82	91,18
0,63	308,9	30,89	69,11
0,315	686,6	68,66	31,34
0,16	941,4	94,14	5,86
0,08	995,5	99,55	0,45
FT	999,9	99,99	0,01

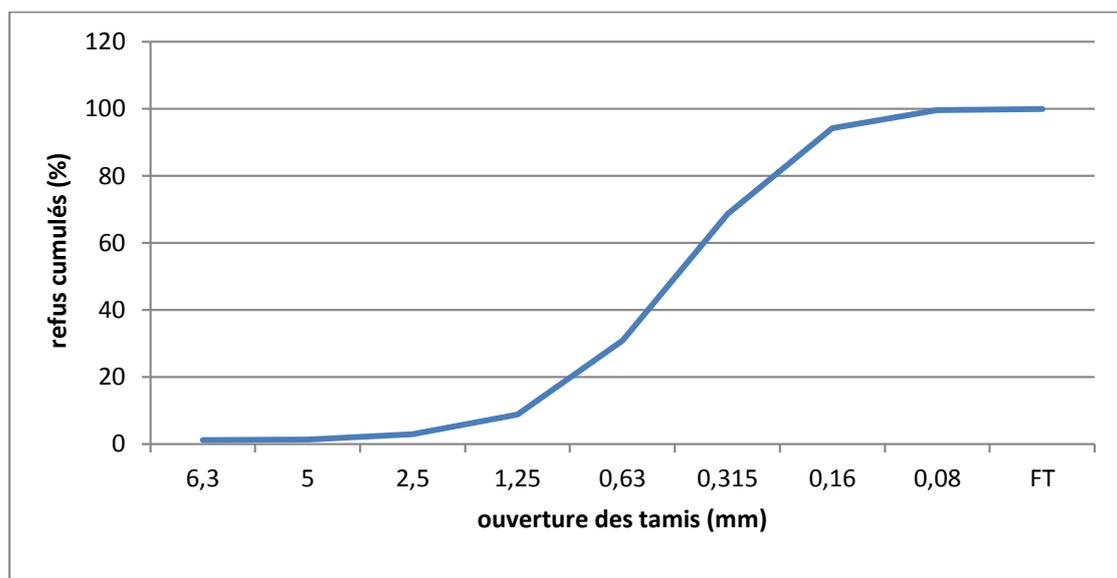


Figure 27: Courbe granulométrique du sable d'Oued Souf.

Le module de finesse est calculé conformément à la norme NF P 18-560

Le module de finesse du sable utilisé est 2,06.

D'après les résultats obtenus par l'analyse granulométrique on remarque que le module de finesse du sable **d'Oued Souf** entre dans l'intervalle recommandé par l'**AFGC**.

III.5. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour gâcher notre béton est l'eau potable de robinet, on a pris la précaution de constater sa propreté.

III.6. Adjuvant :

Le superplastifiant nommé ADVA @FLOW 390 est un superplastifiant de nouvelle génération, haut réducteur d'eau conférant au béton prêt à l'emploi une grande ouvrabilité et une rétention de slump pour les coulages difficiles même à haut température.

ADVA flow 390 est adapté aux bétons fluides, autoplaçants (BAP), et aux bétons de hautes performances (BHP).

C'est un adjuvant polycarboxylate conforme à la norme : EN 934-2(T3.1-3.2) ASTM C494 type A& Type F.

III.6.1. Avantages :

- Les bétons contenant ADVA FLOW 390 sont d'une grande ouvrabilité et possèdent une excellente rétention de slump.
- Un béton très fluide peut être obtenu en incorporant ADVA®flow 390 dans un béton de 50 mm de slump.
- Les bétons obtenus sont très cohésif et les formulations de bétons pompables lui sont parfaitement adaptées.
- ADVA®FLOW 390 peut être utilisé comme haut réducteur d'eau pour augmenter considérablement la résistance la résistance en compression et de fait, l'imperméabilité et la durabilité.
- Destiné aux producteurs de béton prêt à l'emploi, il permet d'obtenir des bétons de hautes performances ou des bétons autoplaçants et autonivelant utilisés sur chantier pour : ouvrages d'art, voiles, murets, sols, poteaux...
- Le maintien de rhéologie peut atteindre 30 min à 1H selon les conditions sans générer de retard de prise.

III.6.2. Caractéristiques Techniques :

Apparence : liquide clair opaque.

Densité : 1.05 ± 0.02 à 20°C.

Air entraîné : 1.5%.

Teneur en chlorure : néant.

Point de congélation : 0°C.

Durée de conservation : 1 an en emballage d'origine.

Dosage optimal : 0.2 → 2 %.

III.6.3. Compatibilité avec le ciment :

ADVA ®FLOW 390 peut être utilisé avec tous types de ciment y compris ceux aux fillers calcaire. Il est aussi efficace dans les bétons contenant des cendres volantes, des cendres de haut fourneau ou des fumées de silice.

Compatibilité avec d'autres adjuvants :

ADVA ®FLOW 390 ne doit pas être mélangé avec d'autre adjuvants. Ces performances en seraient affectées ; dans ce cas.

III.6.4. Mise en œuvre :

Prêt à l'emploi. Il sera ajouté à une partie de l'eau de gâchage avant l'ajout de ciment.

Chapitre 03 :Matériaux et procédures expérimentales

Après l'ajout de ciment, il est recommandé de mélanger deux minutes afin de bien disperser le produit.

III.7. Fibres polypropylène :

On utilise des fibres organiques (polypropylène) commercialisées par la société GRANITEX appelées GRANIFIBRE.

GRANIFIBRE sont des fibres en polypropylène qui, ajoutées au béton et au mortier, réduisent les fissurations et le faïençage.les chapes réalisées avec l'addition du GRANIFIBRE présentent de meilleures résistances à l'abrasion et aux chocs.

III.7.1. Domaines d'application :

- Hangars de stockage.
- Atelier mécaniques.
- Revêtements extérieurs.
- Aires de circulation.
- Parking...

III.7.2. Propriétés :

Les fibres dans le béton ou mortier créent un réseau fibré de haute densité, qui :

- Améliorent la cohésion à l'état frais.
- Réduisent les fissurations de retrait et le cracking.
- Résistent aux milieux alcalins.
- Augmentent les résistances à l'abrasion et aux chocs, pouvant atteindre des valeurs 100 fois supérieures à celle du témoin.

III.7.3. Caractéristiques générales :

- Longueur12mm
- Densité 0,9
- Point de fusion150°C
- Module d'Young 3kN /mm²
- Allongement à la rupture 50%
- Section de la fibre 30 μm

III.7.4. Mode d'emploi:

La quantité de GRANIFIBRE est ajoutée directement dans le malaxeur avec les composants du béton secs (sans eau).

Si GRANIFIBRE (fibres de polypropylène) sont utilisées en dose, prolonger le malaxage de 5 min afin de faire dissoudre le sachet.

Pour les mortiers de granulométrie inférieure à 10 mm, il est préférable d'ajouter la quantité de fibre par dispersion manuelle.

III.8. Conclusion :

Suivant les résultats obtenus, après caractérisation des différents constituants à savoir (sable, ciment, poudre de verre), on peut conclure que ces derniers sont conforme aux exigences des normes en vigueur pour leur emploi dans les bétons en général et les BFUP en particulier.

Chapitre 04 : caractérisation des bétons.

IV.1. Calcul de la composition des BFUP selon la méthode empirique :

Le principe de base de la formulation de béton à ultra haute performance consiste en une optimisation du mélange des matières premières, de façon à obtenir un béton de plasticité élevée, conformément aux exigences de la recommandation de l'AFGC.

Cette optimisation est la suivante :

- Le rapport E/C constant égal à 0,27.
- Le volume de fibre constant, maintenus à 1kg/m³.
- La quantité du ciment égale à 700 kg/m³.
- La quantité d'ajout cimentaire (poudre de verre) est fixée à 10% du poids du ciment.
- Le volume de superplastifiant est pris selon le point de saturation.

VI.2. Séquence de malaxage :

- Verse 70% d'eau, le ciment, l'ajout et les fibres de polypropylènes.
- Malaxer pendant 30 secs à vitesse lente.
- Verser l'adjuvant et le reste d'eau pendant les 30 sec qui suivent et malaxer à la vitesse lente.
- Augmenter la vitesse pendant 30 secs.
- Arrêter le malaxeur et racler les parois pendant 30 sec.
- Laisser le mortier au repos 2 à 3 min.
- Malaxer à vitesse accélérée 3min à 4 min.

Toutes les formulations de BFUP ont été confectionnées suivant le même mode opératoire, avec des moyens matériels identiques, et coulées dans les mêmes géométries de moules dans des conditions similaires. Les échantillons sont coulés sur les moules de dimension 4x4x16 cm³.

Ciment = 700 kg/m³ soit 225,8 l/m³

F = 1 kg/m³ soit 1,11 l/m³

Poudre de verre 70 kg /m³ soit 27,77 l/m³

Adjuvant 2,3% de la masse du ciment soit 15,33 l/m³

E/C = 0,27 soit 1407,9 kg/m³

Chapitre 04 : caractérisation des bétons.

Le dosage des différents constituants pour les 03 compositions de BFUP sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 22: Composition des BFUP réalisés (kg/m³).

	Verre Fumé	Verre Transparent	Verre Opaque
E/C	0,27	0,27	0,27
Ciment	700	700	700
Poudre de verre	70	70	70
Fibres	1	1	1
Adjuvant	16,1	17,5	17,5
Eau	189	189	189
Sable	1407,9	1403,11	1403,11

VI.3. Résultats :

VI.3.1. Caractéristiques à l'état frais :

Les résultats de mesure des masses volumiques montrent que les BFUP élaborés sont denses et identiques.

Tableau 23 : Masse volumique des mortiers à l'état frais (kg/m³).

BFUP avec poudre de verre fumé	BFUP avec poudre de verre transparent	BFUP avec poudre de verre opaque
2160	2150	2150

L'essai le plus courant permettant de caractériser la mobilité en milieu confiné, car le plus facile à mettre en œuvre, est l'essai d'étalement réalisé à l'aide d'un cône à mortier (petit cône d'Abrams) selon les recommandations de l'Association Française de Génie Civil.



Figure 28: Essai d'étalement au mini cône d'Abrams.

Les résultats de l'étalement des mortiers en béton fibrés en fonction du taux d'adjuvant sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 24: Etalement des mortiers fibrés avec 10% de poudre de verre.

Types de Mortiers	BFUP sans poudre de verre	BFUP avec poudre de verre transparent	BFUP avec poudre de verre fumé	BFUP avec poudre de verre opaque
Taux d'adjuvant (%)	2,5	2,5	2,3	2,5
Etalement (cm)	16	16	15	13

Interprétation :

En remarque que l'étalement des BFUP avec substitution de poudre de verre transparent et fumé est proche de celui réalisé sans poudre de verre, se qui signifie que ces bétons ont une bonne ouvrabilité et l'hydratation du ciment n'a pas été affectée.

La finesse de la poudre de verre opaque n'était pas efficace sur la qualité du mortier et n'a pas donné une bonne ouvrabilité, suite à la demande excessive en eau et en superplastifiant [23].

VI.4. CARACTERISTIQUES A L'ETAT DURCI :

La masse volumique a été calculé par pesage des échantillons durcis et détermination de leurs volumes par mesure des dimensions de chaque échantillon.

La densité de chaque type de bfup est la moyen de 03 valeurs de densité dans la même période de temps.

Tableau 25: Masse volumique des mortiers à l'état durci (kg/m³).

BFUP avec poudre de verre fumé	BFUP avec poudre de verre transparent	BFUP avec poudre de verre opaque
2370	2380	2360

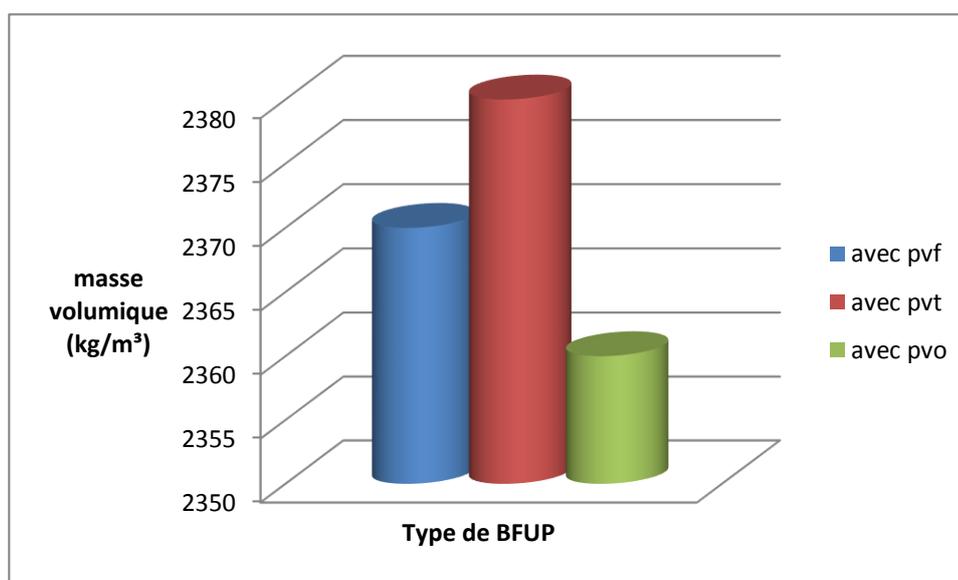


Figure 29: Masse volumique à l'état durcis.

Le comportement mécanique de tous les BFUP a été étudié en flexion simple (3 points) et en compression uniaxiale sur des éprouvettes prismatiques 40x40x160 cm³.

A chaque échéance, et pour chaque types de BFUP, un seul échantillon est testé en flexion simple sur le bâti de flexion d'une (échelle maximale de la force : 10 KN).

Les deux morceaux d'éprouvettes obtenus après rupture en flexion sont alors soumis à une compression uniaxiale sur le bâti de compression de la même presse (échelle maximal de la force : 200KN).



FIGURE 30: essai de compression sur les BFUP en substitution de poudre de verre.

Tableau 26: résistance en compression (en MPa) avec 10% de poudre de verre.

Age	Verre fumé	Verre transparent	Verre opaque
2j	56,25	62,5	60,0
7j	69,37	75,0	84,37
28j	92,5	88,75	101,25

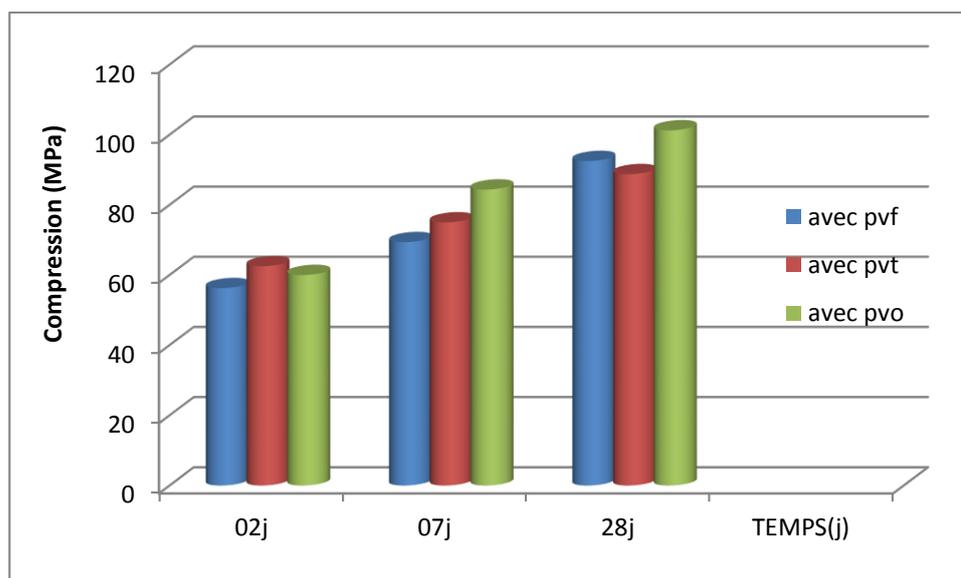


Figure 31: Résistance à la compression des BFUP élaborés.

Interprétation :

On remarque que les trois compositions ont développé des résistances à la compression proches et considérablement élevés.

Les résistances à 2 jours des trois formules dépassent les 50 MPa, ceci s'explique par l'hydratation précoce des trois compositions avec un rapport E/C assez faible de 0,27 conjugué à la forte SSB des poudres de verre.

A 07 jours, les résistances se différencient et cela signifie que les réactions pouzzolaniques des trois poudres de verre ont commencé à donner effet. C'est la poudre de verre opaque qui développe la plus grande résistance ; ensuite celle du verre transparent et puis fumé.

A 28 jours, on voit bien que la formule avec la poudre de verre opaque à développer une très grande résistance à la compression (plus de 100 MPa) à cause de la densification des BFUP due au remplissage des vides par la poudre de verre et l'activité pouzzolanique de la poudre de verre finement broyé qui par son fort dosage en silice peut diminuer le rapport Ca/Si jusqu'à la valeur 0,9 [14].

Chapitre 04 : caractérisation des bétons.

Tableau 27: Resistances en flexion des différents BFUP étudiés (en MPa).

Age	Verre fumé	Verre transparent	Verre opaque
2j	8,77	8,54	8,07
7j	8,83	9,07	9,21
28j	9,48	9,22	11,90

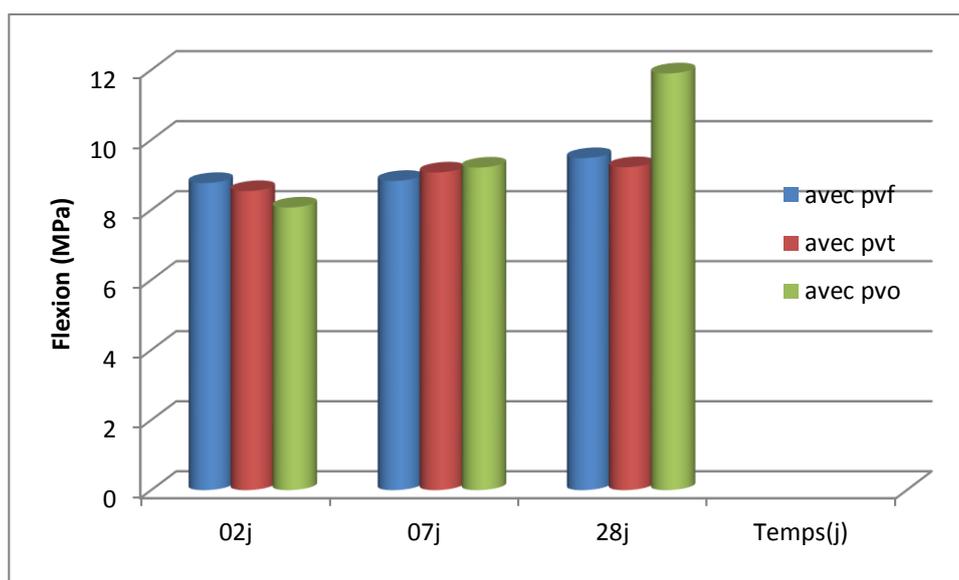


Figure 32: résistance à la flexion des BFUP élaborés.



Figure 33: Essai de flexion simple.

Chapitre 04 : caractérisation des bétons.

Interprétation :

D'après les résultats obtenus, on constate que la résistance à la flexion de toutes les compositions est identique, sauf pour la troisième composition (BFUP avec poudre de verre opaque), la résistance à la flexion à 28 jours est plus élevée. Cela peut être la conséquence de sa composition chimique qui renferme un taux plus élevé silice.

Les fibres de polypropylènes ont améliorés considérablement les résistances à la flexion et cela grâce à leurs résistances à la traction qui donne au béton fibré la caractéristique spécifique qui est la ductilité.

Conclusion

L'objectif de notre travail concerne l'utilisation de la poudre de verre finement broyé comme substitution cimentaire dans le but de formuler un béton à haute performance.

Pour les constituants utilisés au cours de ce travail, sont en général conformes aux normes en vigueur.

Le sable d'oued souff est très propre selon la norme NF P18-597, qui exige un équivalent de sable supérieur ou égale à 70%, ainsi que sont adsorption d'eau qui est faible.

Le ciment 52,5 R importé de la part de Lafarge et qui à une finesse supérieure à $4000\text{cm}^2/\text{g}$ avec une composition minéralogique dominé par C_2S (supérieur à 60%).

Les poudres de verres exploitées ont une composition chimique identique qui est de nature siliceuse.

Les finesses de toutes les poudres sont supérieures à celle de ciment (supérieur à $8000\text{ cm}^2/\text{g}$).

L'étude s'est articulée autour de deux principaux axes suivant :

- ✓ Etude de l'influence de la poudre de verre sur les propriétés des bétons élaborés ;
- ✓ Caractérisation des bétons avec poudre de verre à travers des essais physico-mécanique.

Les résultats obtenus au cours de ce travail mènent aux conclusions suivantes :

- La maniabilité des bétons avec la poudre de verre transparent et fumé n'est pas loin de celle du béton témoin.
- La poudre de verre opaque à sensiblement affectée la maniabilité du béton élaboré.
- L'adjuvant utilisé n'a pas aboutis aux résultats voulus.
- La poudre de verre que se soit transparent, fumé ou opaque à jouer deux rôles physique et chimique (pouzzolanique).
- Les différents comportements mécaniques (compression et flexion) sont accrus avec la substitution d'une partie de ciment par la poudre de verre.
- Les résultats de la résistance à la compression à 28 jour sont élevés et arrive jusqu'à 100 MPa et plus.
- Les résistances à la flexion augmente dans le temps et arrive jusqu'à 11 MPa.
- La composition de BFUP proposé par l'AFGC à aboutis à des bonnes caractéristiques mécanique, se qui rend ces recommandations utiles et mérite d'être étudié et développé.

CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Enfin, la valorisation de verre dans le béton se présente comme une issue important dans la préservation de l'environnement et cela par la substitution d'une partie de ciment par la poudre de verre issue des déchets des verres plats.

La diminution de taux de ciment dans les bétons passe par la substitution des ajouts cimentaires, ce qui réduit la quantité de CO₂ émis dans l'espace pendant la production des ciments.

Perspective

A la lumière des résultats issus de ce travail on peut se conclure sur les points suivants :

Le rapport $E/C = 0.27$ est suffisant pour la bonne hydratation de ciment 52.5 R et utile pour aboutir à des performances physico-mécaniques excellentes.

La recherche d'un bon adjuvant qui développe des réactions compatible avec le ciment 52.5 peut conduire à des caractéristiques physico-mécaniques plus intéressantes.

La finesse des poudres de verres introduit dans ce travail est beaucoup plus que celle de ciment. Ce qui ouvre la possibilité de jouer sur cette caractéristique importante des ajouts cimentaires.

La recherche d'une meilleur activité pouzzolanique nous à conduit à l'exploitation des déchets de verre, ce qui ouvre la porte à l'utilisation d'autres verres industrielles ou bien le faire mélangé avec d'autres ajouts cimentaires.

La séquence de malaxage proposé par l'agence française de génie civile est excellente pour la réalisation des BFUP, tandis que la bonne distribution des fibres de polypropylène nécessite d'autre études supplémentaires.

L'utilisation des fibres métalliques ou bien du verre semble efficace pour avoir des meilleures résistances à la flexion.

L'utilisation du verre dans le béton est relativement récente. La plupart des travaux antérieurs ont porte sur des poudres de verre de finesse soit beaucoup plus grand ou soit plus petite que celle du ciment.les résultats obtenus ont montre que les effets et performances développés par la poudre de verre en substitution partielle du ciment dans le béton sont influencés par sa finesse. Cependant les résultats ne convergent pas sur le taux de substitution et la finesse moyenne requise pour obtenir des qualités optimales du matériau.

Aucun résultat n'aborde explicitement les gains de performances en fonction de la finesse versus l'énergie de broyage requise pour cette finesse qui semble être un élément prépondérant à la détermination du paramètre cout/performance. Ce paramètre demeure sans nul un des principaux facteurs qui faciliteraient la vulgarisation à grande échelle de cette nouvelle technique d'utilisation du verre dans le béton est encore à l'étape expérimentale et nécessite encore des études approfondies pour sa normalisation.

Références Bibliographiques

- [1] : Philippe. P. Propriétés Mécaniques et Microstructurales de Nouvelles Matrices A Ultra Haute Performance. Université de sherbrooke. Canada.2012.
- [2] : PFE, H. ZEROUB. Valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable (approche expérimentale). Université de Boumerdes.2011.
- [3] : Les bétons fibré ultraperformant BFUP. Utilisation des bétons fibrés à ultra-haute performances en site maritime-étude de cas, rapport département multimodalité, septembre 2011. CETMEF. N. Rouxell, N. Bourneton, A, Hauchecorne.
- [4] : Bétons fibrés à ultra-hautes performances, Recommandations provisoires ; association française de génie civile-document scientifique.
- [5] :thèse doctorat **TAFRAOUI Ahmed**.«Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie)».13 Février 2009 p 15-50.
- [6] : document de recommandation **AFGC**«association française de génie civil ».
- [7] : mémoire de fine d'étude **SI AHMED.H** et **OUALIT.M**«formulation et caractérisation rhéologique d'un BAP» ; Boumerdes; 2007.
- [8] : **WALID. DJ.** Caractérisation physico-mécanique des BFUP de poudre de verre, université de Boumerdes.2014.
- [9] :**J.J. Beaudoin.** *Le béton renforcé de fibres.*
- [10] :Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese Normand F. MacLeod et Richard J. McGrath « Dosage et contrôle des mélanges de béton » 7^{ème}édition canadienne 2004.
- [11]:**UchikawaH.** “effects of blending components on hydration and structure formation “8th international Congress on the Chemistry of cement. VI. Rio de Janeiro, Bresil, PP. 249 – 280 .1986
- [12] :**Daimon, M.** “ Mécanisme et cinétique de l'hydratation du ciment au laitier“ 7^e Congres international de la chimie des ciments V, 1. Paris
- [13] : **BARON** et **jean pierre OLLIVIER** ; les bétons : Bases et données pour leur formulation ; France ; troisième tirage 1999.
- [14] : Propriétés Mécaniques et Microstructurales de Nouvelles Matrices à Ultra Haute Performance. Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI en cotutelle avec l'Université de SHERBROOKE (CANADA) [Mansoutre et Lequeux 1996].