

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie des Matériaux

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Master

Spécialité : Génie des matériaux

Option : Contrôle qualité des matériaux

THÈME

Elaboration et étude des caractéristiques physico-mécaniques

des Bétons fibrés à ultra hautes performances

avec ajouts de pouzzolane naturelle et de fumées de silice

Réalisé Par :

ARAB Azedine

RAFAI Hichem

Sujet Proposé et suivi par :

Pr. BENMOUNAH .A

Devant le jury :

N° d'ordre/FSI/2017

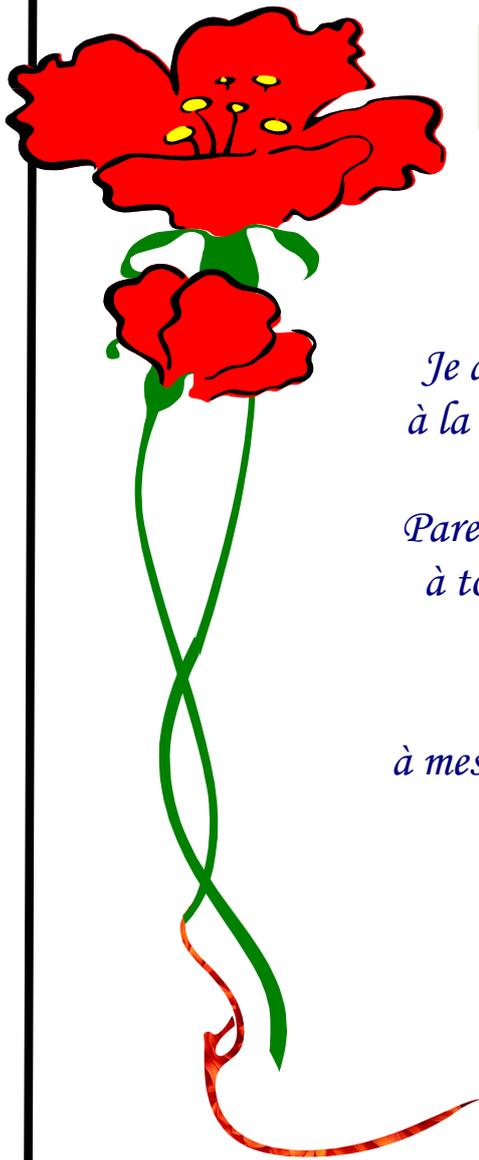
Remerciements

Nous tenons en premier lieu à remercier le bon Dieu de nous avoir mis sur le bon chemin.

Nous remercions notre promoteur, Monsieur A. BENMOUNAH, Professeur à la faculté des sciences de l'ingénieur, et directeur de l'unité de recherche Matériaux Procédés Environnement pour son aide et sa motivation très utiles pour mener à terme ce travail.

Nous adressons également nos remerciements les plus vifs à Monsieur B.BENOTHMANE, chef de département de génie des matériaux, pour son soutien au cours de notre pratique, Nos remerciements vont également à Monsieur BELLAL, qui nous a ouvert les portes pour accéder au laboratoire matériaux au Centre d'Etude Technique d'Industrie des Matériaux de construction, à Monsieur C.OULD ALI de nous avoir accepté pour effectuer notre stage pratique au sein du Laboratoire Central des Travaux Publics, ainsi qu'à toute l'équipe du laboratoire matériaux :M^{me} H.CHETIBI, M^{lle} A.DERDER, Mr. M.ZENNINI, Mr A.KENNOUCHE, Amine et Sofiane et au chef de service du laboratoire géotechnique Mr. H.AFFENDI, Khaled et Adel, Aussi à M^{lle} N.TABET pour nous avoir fourni en pouzzolane naturelle, sans oublier M^{me} D.MADANI du laboratoire de chimie, l'équipe du laboratoire de rhéologie et Mr S.AIT HACENE à l'UR-MPE.

Enfin, Nous remercions Pr SAMAR, Dr KHERIBET, Dr SAFI, Pr GHERNOUTI, Mr DJERIDI, Mr CHOUAIB, Dr TAZROUT, Pr BEZZAZI ainsi que tous nos enseignants de la faculté des sciences de l'ingénieur pour leurs précieux enseignements et l'aide fourni tout au long du cursus universitaire.



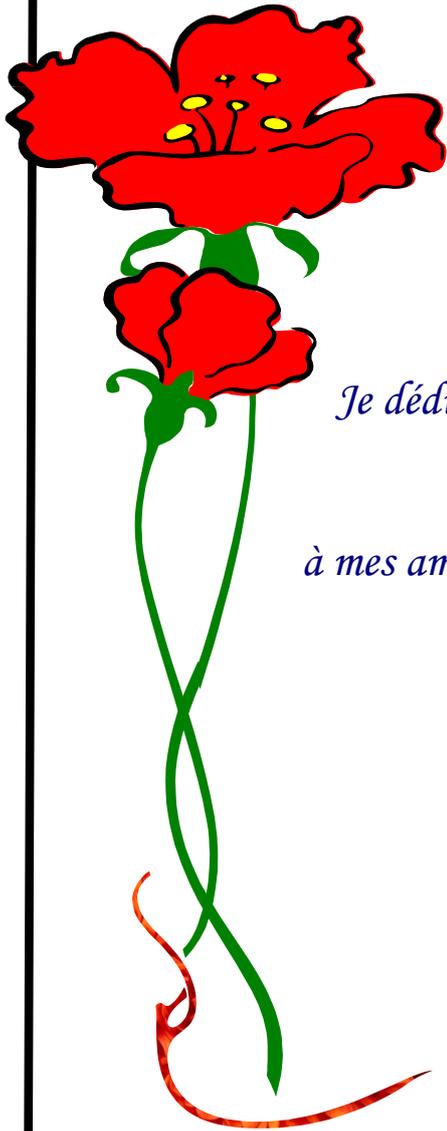
Dédicace

*Je dédie ce travail en premier lieu
à la mémoire de mes grands parents
à mes chères
Parents et Sœurs, à ma nièce Dahlia
à toute la famille Arab et Sadouni*

Et

*à mes amis : Nabil, Oussama, Yacine,
Hakim, M'hamed.*

ARAB Azedine.



Dédicace

*Je dédie ce travail en premier lieu à mes chères
Parents, mon frère et ma sœur
et
à mes amis : Abdelhak, Seif-eddine et Mahieddine*

RAFAI Hichem.

RÉSUMÉ DU MÉMOIRE

Les Bétons Fibrés Ultra Performants (BFUP) sont les matériaux cimentaires aux performances les plus exceptionnelles. Ils se distinguent par des résistances caractéristiques à 28 jours en compression et en traction supérieures respectivement à 150 MPa et 6 MPa. Cependant, les formulations actuelles onéreuses et peu écologiques limitent leur utilisation et leur essor. Suite à une première étude comparative de formulations, quatre compositions ont été mises au point sans traitement thermique, Leurs caractérisations à l'état frais et à l'état durci ont ensuite été réalisées afin de dresser leurs cartes d'identité et proposer une alternative à l'utilisation de la fumée de silice dans le BFUP.

La pouzzolane naturelle réagit lorsque mélangée avec la chaux et donne naissance au sel insoluble de la chaux, de silice d'alumine dont la formation provoque la prise, ses propriétés hydrauliques font d'elle ainsi donc un bon candidat au remplacement de la fumée de silice comme poudres réactives ou ultrafines et sujet de notre mémoire.

Mots clés : Les Bétons Fibrés Ultra Performants, formulation, comportement à l'état frais, comportement mécanique, fumée de silice, pouzzolane naturelle.

ABSTRACT

Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes are cementitious materials of exceptional performances. They are characterized by a compressive and tensile strength over respectively 150 MPa and 6 MPa at 28 days. However, expensive materials and environmental cost of current mix design restrict their use and development. Firstly, a comparative study of mix designs has been established, four mixtures have been developed without heat treatment application. The characterization of fresh and hardened state was conducted in order to establish their identity cards and propose an alternative for the use of silica fume in the UHPFRC mix design.

The natural pozzolana harden in water when mixed with calcium hydroxide or with materials that can release calcium hydroxide (Portland cement clinker) the properties given by pozzolana adds makes it good choice for the replacement of silica fume as a reactive powder and subject of our study.

Key words: Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes, mix design, fresh behaviour, hardened behavior, silica fume, natural pozzolana.

ملخص

الخرسانات ذات الأداء الفائق المقوّاة بالألياف من المواد الإسمنتية الإستثنائية التي تتميز بمقاومات للإنضغاط بعد 28 يوم التي تتعدى 150 ميغا باسكال و 6 ميغا باسكال بالنسبة لقوة الشد. إلا أنّ التشكيلات الحاليّة باهضة الثمن و غير صديقة للبيئة تحدّ من إنتشارها و استعمالاتها. تبعا لدراسة أولية مقارنة للتشكيلات المختلفة، تم صياغة أربع مكوّنات دون الخضوع إلى معالجة حرارية . ثم بعد ذلك تم تشخيصها في الحالة الطّرية و الحالة الصلبة لغرض إقامة بطاقات تعريفية لهاته الأخيرة مع إقترح بديل لاستعمال غبار السليكا في خ.ذ.أ.ف.م.أ.

البوزولان الطبيعية تتفاعل في الماء عند خلطها مع هيدروكسيد الكالسيوم أو نواتج هدرجة مكوّنات الإسمنت لتشكل مكوّنات جديدة ذات خصائص هيدروليكية التي تزيد من مقاومة الخرسانة، ممّا يجعل منها البديل الأمثل لتعويض غبار السليكا كمسحوق متفاعل و موضوعا لمذكرتنا.

كلمات مفتاحية : الخرسانات ذات الأداء الفائق المقوّاة بالألياف، الصياغات التشكيلية، خصائص الحالة الطّرية، خصائص الحالة الصلبة، غبار السليكا، البوزولان الطبيعية.

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale1

CHAPITRE I : Les bétons aux nouvelles performances

I.1. Introduction..... 3

I.2. Les différents types des nouveaux bétons..... 4

I.2.1. Les BHP 4

I.2.1.1. Introduction 4

I.2.1.2. Définition des BHP 4

I.2.1.3. Les constituants du BHP 5

I.2.1.4. Formulation des BHP 5

I.2.1.6. Autres propriétés des BHP 7

I.2.2. Les BAP 7

I.2.2.1. Introduction 7

I.2.2.2. Définition..... 8

I.2.2.3. Avantages des BAP 8

I.2.2.4. Formulation des BAP 9

I.2.3. Les BCR 10

I.2.3.1. Définition..... 10

I.2.3.2. Domaines d'utilisation..... 11

I.2.4. Les BFUP 12

I.2.4.1. Définition et applications..... 12

SOMMAIRE

CHAPITRE II : Les bétons fibrés à ultra hautes performances

II.1. Introduction	14
II.2. Généralités	14
II.3. Domaines d'applications	14
II.4. Formulation des BFUP	17
II.4.1 Principe de formulation	17
II.4.2. Constituants	18
II.4.2. 1. Ciment	20
II.4.2. 2. Les poudres réactives ou ultrafines	20
II.4.2.2.1 Les pouzzolanes.....	20
II.4.2.2.2 La fumée de silice.....	21
II.4.2.2.3 Cendres volantes.....	23
II.4.2.2.4 Laitier de haut fourneau.....	23
II.4.2. 3. Le sable.....	24
II.4.2.4 Adjuvants superplastifiants.....	25
II.4.2.4.1 Mécanismes d'action des adjuvants superplastifiants	25
II.4.2.4.2 Utilisation des superplastifiants dans les BFUP.....	26
II.4.2.5 Les fibres	27
II.4.2.5.1. Les différentes natures des fibres	27
II.4.2.5.1. Différents types de fibres.....	28
II.4.2.5.2. Effet des fibres dans une matrice.....	30

CHAPITRE III : Caractérisation des BFUP

III.1. Introduction	34
III.2. Propriétés Rhéologiques	34
III.2.1. Essai de fluidité	35
Mesure de l'étalement	35

SOMMAIRE

III.2.2. Ségrégation dynamique (l'essai de la boîte en L)	36
III.2.3. Ségrégation statique	37
III.2.3.1. Principe de l'essai de stabilité au tamis	38
III.3. Mise en œuvre	39
III.3.1. Pompabilité.....	39
III.4. Caractéristiques Mécaniques et Physiques.....	40
III.4.1. La résistance à la compression	40
II.4.1.1 Le rapport entre l'eau d'hydratation du ciment et la résistance à la compression	41
III.4.1.2 Essai de compression	42
III.4.2. La résistance à la traction	44
III.4.3 La résistance à la flexion.....	45
III.4.3.1. Essai de flexion	46
III.4.4. Module de Young.....	46
III.4.5. Comportement à la fatigue	47
III.4.6. Contrôle non-destructif	47
III.4.6.1. Contrôle par ultrasons	47
III.4.7. Le Retrait.....	49
III.4.8. Le fluage.....	50
III.4.9. La porosité.....	52
III.4.10. La Ductilité.....	52
III.5. Caractéristiques Chimiques.....	53
III.5.1. Hydratation.....	53
III.5.2. Tenue aux Milieux Agressifs	53
III.6. Durabilité.....	54

SOMMAIRE

CHAPITRE IV : Partie pratique

IV. Méthodologie et objectif du travail pratique	56
PREMIERE PARTIE	57
IV.1. Caractérisation physique, chimique et mécanique des constituants	57
IV.1.1. Le ciment CEM II/ A-L 52.5 N	57
IV.1.2. Le sable	60
IV.1.2.1. Le sable de Chelghoum El-Aid (0/3)	60
IV.1.2.2. Le sable de Boussaâda (0/1).....	62
Correction du sable de Chelghoum El-Aid (0/3) par le sable de Boussaâda (0/1).....	64
IV.1.3. Les gravillons	65
Caractéristiques mécaniques des gravillons 3/8 de Bouzegza	65
IV.1.4. La pouzzolane	69
IV.1.5. La fumée de silice	72
IV.1.6. Les fibres métalliques	74
IV.1.7. Le superplastifiant.....	76
IV.1.8. L'eau de gâchage	77
DEUXIEME PARTIE	77
IV.2. Etude rhéologique de la pâte de ciment	77
Détermination du point de saturation (Sika Tempo 12 - CEM II 52.5)	77
IV.2.1 Préparation des mélanges	78
TROISIEME PARTIE	83
IV.3. Formulation des compositions	83
IV.3.1. Préparation des moules	83
IV.3.2. Formulation des différents bétons	84
IV.3.3. Confection des éprouvettes	84
IV.3.3. La procédure de malaxage	85

SOMMAIRE

IV.3.4. Caractérisation des différentes compositions.....	86
• À l'état frais	86
IV.3.4.1. Mesure de l'affaissement selon la norme NF EN 12350-2, 2012	86
IV.3.4.2. Essai de fluidité	88
• Mesure de l'étalement au cône d'Abrams	88
IV.3.4.3. Essais de ségrégation statique	89
• Mesure de la stabilité au tamis	89
IV.3.4.4. Conservation des éprouvettes	90
• À l'état durci	90
IV.3.4.5. Suivi du poids.....	90
IV.3.4.6. Contrôle non destructif par ultrasons	91
IV.3.4.7. Module de Young E_d	92
IV.3.4.8. Résistance à la compression (Norme NF P18-407)	93
IV.3.4.9. Résistance à la flexion (Norme NF EN 12390-5).....	96
Conclusion générale	98
Références bibliographiques	

Liste des figures

Figure.I. 1: Réfection du pont Champlain en BHP.....	4
Figure.I. 2: Relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement d'un béton	8
Figure.I. 3: Mise en œuvre d'un BAP.....	9
Figure.I. 4: Mise en œuvre d'un BCR.....	11
Figure.I. 5: Passerelle de Seoul.....	13
Figure II. 1 : Optimisation de l'emploi du BFUP par l'exploitation simultanée de ses propriétés principales. Degré d'efficacité: + = bon, ++ = très bon, +++ = excellent.....	15
Figure II. 2 : Comparaison entre différents éléments de structure de mêmes résistances conçues avec différents matériaux	15
Figure II. 3 : Protection ou renforcement d'un béton armé par une couche de BFUP	16
Figure II. 4 : Effet des ultras fines et du ciment sur la compacité du béton	18
Figure II. 5: Pouzzolane rouge de Beni-Saf.....	21
Figure II. 6: Représentation schématique d'une fibre mélangée avec une matrice cimentaire avec et sans l'ajout de la fumée de silice	22
Figure II. 7 : Poudre de fumée de silice.....	22
Figure II. 8 : Procédé de production de la fonte	23
Figure II. 9: sable de dune 0/1 mm riche en silice.....	24
Figure II. 10: Mécanismes d'action des adjuvants superplastifiants.	26
Figure II. 11: Rôle des fibres dans la matrice de béton	27
Figure II. 12: Fissuration dans un béton avec et sans fibres	30
Figure II. 13 : Comportement a la traction du béton fibré.....	31
Figure II. 14: Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur d'une fibre.....	32
Figure III. 1 : Rhéomètre AR2000	35
Figure III. 2: Essai d'étalement	36
Figure III. 3: Mesure des paramètres après stabilisation	36
Figure III. 4: Remplissage du béton dans la boîte en L.....	37

Liste des figures

Figure III. 5: Procédure d'essai de la stabilité au tamis	38
Figure III. 6: Relation «contrainte-déformation» en compression	40
Figure III. 7: Influence du rapport eau/liant sur la résistance à la compression du béton.....	41
Figure III. 8: Influence de la porosité sur la résistance à la compression du béton.....	42
Figure III. 9: Influence de la porosité sur la résistance à la compression du béton.....	43
Figure III. 10: Essai de compression sur des éprouvettes cubiques.	44
Figure III. 11: Comportement en traction directe.....	45
Figure III. 12: Essai de flexion	46
Figure III. 13: Appareil d'ultrasons « Proceq ».....	49
Figure III. 14: Influence du rapport E/L sur le retrait du BPR	50
Figure III. 15: Comparaison du fluage spécifique des bétons à ultra hautes performances ...	51
Figure.IV. 1 : Détermination de la consistance normale avec l'appareil de Vicat (sonde)	57
Figure.IV. 2 : détermination du temps de prise avec l'appareil de Vicat (aiguille).....	58
Figure.IV. 3 : Essais de flexion et de compression sur mortier	60
Figure.IV. 4 : Détermination de l'équivalent de sable	61
Figure.IV. 5 : Machine d'abrasion Los Angeles.....	66
Figure.IV. 6 : Machine d'abrasion Micro-Deval	67
Figure.IV. 7 : Courbe d'analyse granulométrique par tamisage.	69
Figure.IV. 8 : Concassage des grands cailloux Figure.IV. 9 : Concasseur à mâchoire.....	70
Figure.IV. 10 : Etuve de séchage	70
Figure.IV. 11 : Broyeur à boulets	71
Figure.IV. 12 : Pouzzolane naturelle broyée.....	71
Figure.IV. 13 : La fumée de silice	74
Figure.IV. 14 : Les fibres métalliques	75
Figure.IV. 15 : Schéma d'une fibre métallique.....	75
Figure.IV. 16 : Rhéomètre AR2000.....	77

Liste des figures

Figure.IV. 17 : Préparation des mélanges	79
Figure.IV. 18 : La variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement à différentes teneurs de superplastifiant (Tempo12) avec 10 % de pouzzolane.	79
Figure.IV. 19 : La variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement à différentes teneurs en super plastifiant (Tempo12) avec 10 % de pouzzolane.	80
Figure.IV. 20 : La variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement à différentes teneurs en superplastifiant (Tempo12) avec 10 % de fumée de silice.	81
Figure.IV. 21 : Evolution de la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement à différentes teneurs en superplastifiant (Tempo 12) avec 10 % de fumée de silice.	82
Figure.IV. 22 : Fabrication des moules cubiques	83
Figure.IV. 23 : Malaxeur Figure.IV. 24 : Mélange à sec	86
Figure.IV. 25 : Mesure de l'affaissement avec cône d'Abrams.....	87
Figure.IV. 26 : Histogramme de mesure de l'affaissement	87
Figure.IV. 27 : Cône d'Abrams Figure.IV. 28 : Mesure de l'étalement.....	88
Figure.IV. 29 : Histogramme représentant l'étalement des différents bétons	89
Figure.IV. 30 : Conservation des éprouvettes.....	90
Figure.IV. 31 : La variation de la masse volumique des différents bétons en %.....	91
Figure.IV. 32 : Étalonnage de l'appareil Figure.IV. 33 : Appareil de contrôle par ultrasons	92
Figure.IV. 34 : Essai de compression	94
Figure.IV. 35 : Histogramme représentant l'évolution des résistances à la compression des différentes formulations	94
Figure.IV. 36 : Effet de l'ajout de fibres métalliques sur la détrition sous compression des BUHP	95
Figure.IV. 37 : Essai de flexion sur des éprouvettes prismatiques	96
Figure.IV. 38 : Influence de l'ajout de fibres métalliques sur le comportement des BUHP en traction par flexion	97

Liste des tableaux

Tableau.I. 1: Formulation d'un BHP avec et sans addition (fumée de silice)	6
Tableau II. 1: différentes mises en applications des BFUP	16
Tableau II. 2: Composition et propriétés de trois bétons différents, béton ordinaire, béton à hautes performances	19
Tableau II. 3: Le domaine d'application selon le type de fibres	33
Tableau III. 1: Classes de résistance à la ségrégation	38
Tableau III. 2: la vitesse de propagation des ondes et la qualité du béton	48
Tableau III. 3: Indicateurs de durabilité des différents types de bétons.....	54
Tableau IV. 1 : caractéristiques physiques du ciment CEM II/ A-L 52.5 N.....	57
Tableau IV. 2 : La composition chimique du ciment CEM II/ A-L 52.5 N	58
Tableau IV. 3 : Résultats analytiques intermédiaires	59
Tableau IV. 4 : Composition minéralogique	59
Tableau IV. 5 : Caractéristiques mécaniques du ciment CEM II / A-L 52.5 N.....	59
Tableau IV. 6 : Caractéristiques physiques du sable de Chelghoum El-Aid.....	60
Tableau IV. 7 : Analyse granulométrique par tamisage du sable de Chelghoum El Aid (0/3)	61
Tableau IV. 8 : Caractéristiques physiques du sable de Boussaâda	62
Tableau IV. 9 : La composition chimique du sable de Boussaâda (0/1)	63
Tableau IV. 10 : Analyse granulométrique par tamisage du sable de Boussaâda (0/1)	64
Tableau IV. 11 : Pourcentage de tamisât calculé du sable corrigé	65
Tableau IV. 12 : Caractéristiques physiques des gravillons (3/8) de Bouzegza.....	65
Tableau IV. 13 : Résistances mécaniques de quelques roches utilisées comme granulats.....	67
Tableau IV. 14 : Essais de caractérisation mécanique des gravillons (3/8) de Bouzegza	67
Tableau IV. 15 : Analyse granulométrique par tamisage des gravillons 3/8 de Bouzegza	68
Tableau IV. 16 : La composition chimique de la pouzzolane	71
Tableau IV. 17 : Caractéristiques physiques de la pouzzolane	72

Liste des tableaux

Tableau IV. 18 : Données techniques de la fumée de silice	73
Tableau IV. 19 : La composition chimique de la fumée de silice	73
Tableau IV. 20 : composition de la pâte de ciment.	78
Tableau IV. 21 : Composition des mélanges	84
Tableau IV. 22 : Procédure de malaxage	85
Tableau IV. 23 : caractéristiques des bétons fluides à l'état frais	86
Tableau IV. 24 : Résultats de mesure de la stabilité au tamis	89
Tableau IV. 25 : Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons.....	92
Tableau IV. 26 : Valeur du module d'élasticité dynamique des différents bétons.....	93
Tableau IV. 27 : Résistances à la rupture en compression (Rc)	94
Tableau IV. 28 : Résistances à la flexion (Rf).....	96

Introduction générale

La famille des bétons s'enrichit régulièrement depuis quelques années avec des bétons aux nouvelles performances, tels que les bétons à hautes performances (BHP), les bétons autoplaçants (BAP) et les bétons fibrés ultra performants (BFUP).

La formulation de ces bétons, la mieux adaptée possible à une fabrication de produits en béton, est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles en prenant en compte tous les aspects du ou des problèmes posés (caractéristiques des matières premières, caractéristiques et performances des produits fabriqués, coût...).

Les Bétons Ultra Fibrés Performants (BFUP) représentent actuellement la famille de matériaux à matrice cimentaire aux propriétés mécaniques et de durabilité les plus exceptionnelles. En outre, leur capacité autoplaçante à l'état frais offre une excellente qualité de mise en œuvre particulièrement adaptée à la préfabrication. Or, malgré leurs caractéristiques et leurs avantages indéniables, certaines spécificités liées à leurs formulations et à leur production rendent leurs coûts prohibitifs et leur bilan carbone peu satisfaisant, ce qui freine leur essor. Leurs applications résident ainsi très souvent, à ce jour, en quelques « niches » pour lesquelles leurs qualités les rendent indispensables.

Ce travail vise à faire une étude des BUHP afin de voir l'influence de l'ajout de fibres métalliques avec addition d'ultrafines de pouzzolane naturelle sur les propriétés physiques et mécaniques des BFUP à l'état frais et durci. La pouzzolane ajoutée est issue de l'ouest Algérien des carrières de Beni-Saf. Elle a pour fonction de substituer la fumée de silice importée qui est à titre indicatif cinq à six fois plus chère que le ciment, tandis que la pouzzolane naturelle se trouve en abondance dans le pays.

Ce mémoire se divise en deux grandes parties, la première est une synthèse bibliographique, la deuxième est une partie expérimentale.

Le manuscrit de mémoire s'étale sur quatre principaux chapitres :

Le premier chapitre présente une recherche bibliographique sur les différents types de nouveaux bétons, leurs formulations, propriétés, avantages et domaines d'application.

Le deuxième chapitre traite une synthèse bibliographique des bétons fibrés à ultra hautes performances, le principe de formulation, les constituants et le domaine d'application.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de différentes propriétés des BFUP, ainsi leur caractérisation à l'état frais et durci.

Introduction générale

Le dernier chapitre aborde la caractérisation des matériaux utilisés, la formulation des bétons et la présentation des essais réalisés avec discussion et interprétation des résultats. Enfin, nous terminerons par une conclusion générale, des recommandations et des perspectives.

I.1. Introduction

L'histoire du ciment commence en 3000 Av. J-C, où les Egyptiens ont utilisé des mortiers en gypse et des mortiers en chaux pour construire les pyramides. Puis, les Romains ont utilisé une sorte de béton pouzzolanique: Il s'agit d'un dépôt volcanique qui se solidifie si on le mélange avec de l'eau et de la chaux (Aujourd'hui la pouzzolane est classée comme un ajout) [1]

Smeaton (1756), Vicat (1818), Aspadin (1825) furent parmi les inventeurs des bétons modernes. Monier et Lambot (1848), coignet (1852), Hennebique (1880) réalisèrent, avec ce matériau les premières constructions en béton armé (avec des résistances en compression de 15 à 25 MPa). Puis durant un siècle, le béton resta un mélange de : granulats, ciment, et d'eau.

Ces dernières décennies, de nombreux travaux scientifiques ont montré les effets néfastes, pour la résistance et la durabilité, des excès de l'eau de gâchage. Dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives des bétons, il était donc nécessaire d'explorer les voies visant à réduire ce dosage en eau (découverte des plastifiants et fluidifiants vers les années 1970). En parallèle, d'autres recherches sont orientées pour l'obtention d'un mélange de très haute compacité, lors de la composition du béton (optimisation de l'étendu granulaire à une échelle microscopique par l'ajout d'additions extrafines) [2].

Ces deux voies de recherche sont abouties à des résultats très intéressants, et à la découverte des nouveaux bétons qui ont des performances très élevées et surtout au niveau de la résistance et de la durabilité.

Dans ce chapitre on propose une synthèse bibliographique sur les différents types de nouveaux bétons, et leurs principales caractéristiques.

I.2. Les différents types des nouveaux bétons

I.2.1. Les BHP

I.2.1.1. Introduction

Les Bétons à Hautes Performances (BHP), sont des matériaux à très haute compacité et haute résistance. Elle est de l'ordre plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances. Hautes performances signifient aussi facilité de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. Les BHP ont une porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et de façon générale, présentent une durabilité accrue.



Figure.I. 1: Réfection du pont Champlain en BHP.

I.2.1.2. Définition des BHP

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérisent par :
· Une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre;
· Un rapport Eau /liant inférieur à 0,4. Ils présentent une structure très dense, une faible porosité et une très bonne résistance à la pénétration d'agents agressifs.

I.2.1.3. Les constituants du BHP

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

- **Ciments:** conformes à la norme NF EN 197-1 de types CEM I ou CEM II ou CEM III et de classes de résistance conseillées 42,5 ou 52,5 (N ou R).
- **Granulats :** conformes à la norme NF EN 12620 « Granulats pour bétons » et à la norme XPP 18-545 (article 10: « granulats pour bétons hydrauliques »).
- **Additions :** conformes aux diverses normes en vigueur – cendres, laitiers de haut fourneau, fillers calcaires, filler siliceux, éventuellement ultrafines (fumées de silice).
- **Adjuvants :** plastifiants réducteur d'eau et superplastifiants haut réducteur d'eau conformes à la norme NF EN 934-2.

I.2.1.4. Formulation des BHP

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. En effet, les dimensions et les volumes des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité. L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire. La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes :

a. Détermination d'une formule théorique prévisionnelle

- sélection des constituants en fonction de l'expérience locale.
- détermination des proportions des constituants.
- optimisation du squelette granulaire.

b. Optimisation du mélange en laboratoire:

- validation de la compatibilité ciment /adjuvant.
- ajustement de la quantité de la pâte et de l'adjuvant.
- vérification du comportement rhéologique du béton frais.
- analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants.
- analyse de la sensibilité de la formule aux conditions climatiques possibles lors de la mise en œuvre (température).

c. Validation de la formule sur chantier :

- vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- vérification des éventuelles spécifications complémentaires telle que la pompabilité.
- vérification des caractéristiques du béton.

Exemples de Formulation d'un BHP: [3]**Tableau.I. 1:** Formulation d'un BHP avec et sans addition (fumée de silice)

BHP sans additions		BHP avec addition : à base de la fumée de silice	
Ciment CEM I 52,5 (Kg/m ³)	450	Ciment CEM I 52,5 (Kg/m ³)	420
Gravillon 6/20 (Kg/m ³)	1027	Fumée de silice (Kg/m ³)	35
Sable 1 (0/4) (Kg/m ³)	648	Gravillon (6/10) Kg/m ³	250
Sable 2 (0/1) (Kg/m ³)	105	Gravillon (10/14) (Kg/m ³)	730
Eau (L/m ³)	160	Sable 1 (0/4) (Kg/m ³)	660
Superplastifiant (Kg/m ³)	11,25	Sable 2 (0/1) (Kg/m ³)	140
Adjuvant retardateur (Kg/m ³)	4,5	Eau (L/m ³)	152
		Superplastifiant (%)	1,73

I.2.1.5. Propriétés physico-chimiques et mécaniques des BHP

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

Résistances mécaniques : Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, compte tenu de la rapidité de la cinétique de montée en résistance, et très élevées à long terme (avec une montée en résistance se poursuivant au-delà de 28 jours). Un BHP de 60 MPa à 28 jours peut offrir des résistances mécaniques de 15 MPa à 24 heures, voire davantage, et 40 MPa à 7 jours. Le gain est aussi important en termes de résistance en traction ou en cisaillement

Module d'élasticité : Le module d'élasticité des BHP est supérieur à celui des bétons traditionnels.

Retrait : Le retrait total du BHP est globalement identique à celui d'un béton traditionnel mais avec une cinétique différente (il se produit plus tôt et se développe principalement pendant les premiers jours après le coulage). Le retrait de dessiccation à l'état durci est plus

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

1.2.1.6 Autres propriétés des BHP :

Fluage : Les BHP présentent un fluage (déformation différée sous chargement permanent) plus faible que les bétons traditionnels.

Imperméabilité : Leur faible porosité capillaire confère aux BHP une très faible perméabilité

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

Migration des ions chlorure : La résistance des BHP à la migration des ions chlorure est supérieure à celle des bétons courants, grâce à sa microstructure plus dense.

Tenue aux attaques gel/dégel : Les BHP, correctement formulés, résistent aux cycles gel/dégel grâce à leur forte compacité et à leur résistance mécanique élevée.

Carbonatation : De nombreuses études ont démontré que la durabilité des BHP vis-à-vis de la carbonatation est nettement supérieure à celle d'un béton traditionnel. [4]

I.2.2. Les BAP

I.2.2.1 Introduction

Les différentes structures actuelles du génie civil présentent de plus en plus des formes complexes, avec une concentration assez importante d'armature (sections très ferrillées). Celles-ci entraînent d'énormes difficultés de réalisation sur chantier surtout l'accès pour la mise en place et consolidation du béton dans le coffrage.

Afin d'adapter le béton à ce type d'ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de bétons se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (faibles ségrégations, ressuage et tassement), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité. L'aboutissement de ces recherches a

donné naissance à une nouvelle gamme de béton pouvant satisfaire les propriétés citées ci-dessus, appelée BAP.

OZAWA et coll. [1991] ont démontré l'existence d'une relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement. Pour de faibles valeurs de l'affaissement, l'écoulement a tendance à s'arrêter sous l'effet d'une augmentation de la friction entre les particules du béton.

Pour des valeurs d'affaissement plus élevées, au contraire, les granulats peuvent se séparer plus facilement du mortier et l'écoulement peut être bloqué par la formation des ponts de granulats en contact avec des obstacles (paroi, ferrailage, etc.) : c'est la ségrégation. Enfin, une capacité de remplissage maximale nécessite une déformabilité maximale et une ségrégation minimale. La figure I.2 montre la relation qui existe entre ces différents paramètres.

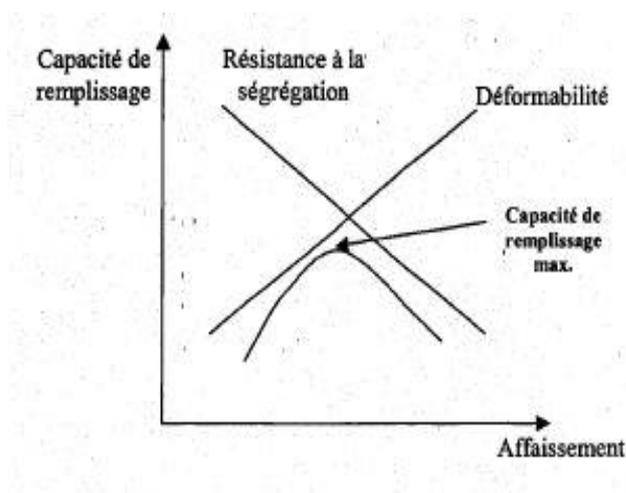


Figure.I. 2: Relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement d'un béton.

I.2.2.2. Définition

Les bétons autoplaçants ou autonivelants sont des bétons très déformables, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de gravité, sans apport de vibration interne ou externe, même dans des coffrages très ferrillés. Ces bétons ne sont qualifiés d'autoplaçants que si le matériau durci final présente des propriétés uniformes, c'est-à-dire s'il n'a pas subi un taux de ségrégation élevé.

I.2.2.3. Avantages des BAP

Les bétons autoplaçants présentent plusieurs avantages, On peut citer :

- Qualité des parements et arase systématique.
- Coulage à partir d'un seul point (ou endroit).
- Réduction du coût de la main d'œuvre.
- Obtention d'une meilleure qualité du béton, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation.
- Réduction des nuisances sonores dues à la vibration.
- Bétonnage dans des zones fortement ferrillées et rapidité du coulage.



Figure.I. 3: Mise en œuvre d'un BAP.

I.2.2.4. Formulation des BAP

Les méthodes proposées pour le dosage des bétons suivent toujours les mêmes objectifs :

- Maniabilité acceptable du béton après malaxage ;
- Durabilité, résistance mécanique et apparence uniforme du béton durci ;
- Rapport qualité/coût acceptable.

KASHIMA et coll. [1995] s'orientent sur une des trois approches pratiques pour préparer un BAP :

- Augmentation de la quantité de pâte et l'utilisation d'un superplastifiant de manière à réduire le rapport E/L sans affecter la viscosité.
- Utilisation d'un agent de viscosité, l'accroissement de la quantité de la pâte et l'utilisation d'un superplastifiant afin d'augmenter la fluidité et diminuer le risque de ségrégation.

- Faible augmentation de la quantité de liant ou de fibre et l'utilisation d'un superplastifiant et d'un agent de viscosité pour obtenir une fluidité et une viscosité satisfaisantes. [5].

I.2.3. Les BCR

I.2.3.1 Définition

On appelle Béton Compacté au Rouleau (BCR) un béton raide, non armé, d'affaissement nul composé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants, dont la mise en place nécessite un compactage externe pour être bien consolidé. Du point de vue structural, le BCR est un ouvrage rigide présentant le même comportement qu'une dalle de béton et est soumis aux mêmes critères de conception.

La portance et la résistance à la déformation des couches de support et celles de roulement confectionnées dans un tel cas permettent de soumettre celles-ci aux sollicitations d'un trafic intense. Le BCR présente une grande résistance et une bonne durabilité donc, est bien adapté aux charges des équipements lourds.

Il a été prouvé qu'un mélange de BCR avec une teneur en liant de 300 kg/m³ et un rapport E/C d'environ 0,35 peut développer une résistance en compression à 28 jours de 40 MPa et une résistance en flexion à 3 jours de 5 MPa.

Dans le cas des routes, le BCR peut être utilisé pour deux applications :

- comme couche-support d'une chaussée revêtue en liant hydrocarboné;
- comme couche de roulement traitée en surface de manière à subir directement le passage du trafic.

La dernière application a la particularité d'une mise en œuvre rapide avec donc une réduction du coût de construction.

La réalisation du BCR est faite avec les mêmes équipements généralement utilisés pour la construction des chaussées en béton. Il est produit en centrale fixe ou mobile, transporté par le camion à benne basculante et mise en place à l'aide d'épandeur, de finisseur. Le compactage est assuré par le rouleau compacteur.

L'épaisseur minimale d'une dalle de BCR est de 15 cm. Il faut à chaque fois s'assurer que la couche inférieure à la dalle a atteint un degré de compactage suffisant. [6]

I.2.3.2. Domaines d'utilisation

Le BCR s'est développé selon deux axes bien différents d'utilisation à savoir les barrages et les pavages. La formulation, la technique de mise en œuvre ainsi que le produit final sont très différents.

Les premiers exemples de revêtements en BCR connus furent construits sur des voies à faible trafic. Au Canada, le BCR a pris son essor dans les années 70 pour des revêtements destinés à l'industrie forestière qui désirait des pavages extrêmement résistants et peu coûteux.

Aujourd'hui, cette technologie est toujours en évolution et les pavages de BCR sont utilisés pour une grande variété d'applications: les routes municipales et urbaines, les aéroports, les stationnements pour les camions et automobiles, les aires de triage et d'entreposage de bois, les routes de transport dans l'industrie forestière et minière, les gares intermodales de conteneurs, les aires de stockage de vrac, les aires de transbordement de conteneurs et les aires de compostage.

Les raisons qui expliquent l'emploi croissant du BCR sont : les réductions de coûts qui résultent de la méthode de fabrication, d'une mise en œuvre simple, des exigences réduites en main d'œuvre et des rendements élevés. [7]



Figure.I. 4: Mise en œuvre d'un BCR.

I.2.4. Les BFUP

I.2.4.1. Définition et applications

Le terme BFUP, Bétons Fibrés à Ultra Performances, couvre aujourd'hui une large gamme de matériaux pour des applications structurelles et/ou décoratives. Certains font l'objet de brevets ou de marques déposées : DUCTAL®, BSI®,...etc.

Les BFUP sont toujours définis dans un premier temps par le niveau de résistance mécanique atteint, généralement supérieur à 150 MPa à la compression à 28 jours. Même si des essais sous vide exécutés en laboratoire avancent un potentiel bien plus élevé encore, les applications industrielles les plus nombreuses sont réalisées avec des BFUP de résistance standard. Les produits fabriqués aujourd'hui peuvent être des poteaux, des poutres, des dalles, des poutrelles, des panneaux de façades, des éléments de couverture, des passerelles, des corniches, des éléments pour l'assainissement, du mobilier urbain, du mobilier d'intérieur, des éléments pour les machines-outils, etc. Outre la résistance à la compression, les BFUP se distinguent des bétons traditionnels par bien d'autres propriétés telles que leur résistance à la flexion, aux chocs, à l'abrasion, aux agressions chimiques, au gel, plus généralement leur ductilité, leur tenue dans le temps, ainsi que leurs caractéristiques esthétiques. Les BFUP disposent de formulations élaborées où la sélection des matières premières est essentielle pour l'atteinte des performances souhaitées. Le coût élevé du matériau provient du dosage important en fibres, en ultrafines, en liant et en adjuvants. Les fibres sont introduites pour augmenter la ductilité du matériau, et accroître la résistance. Les ultrafines permettent de réduire la porosité et d'accroître la résistance à la compression et la durabilité. Les adjuvants permettent d'obtenir une rhéologie adéquate pour la mise en œuvre tout en ayant un rapport Eau/Liant (E/L) très faible et peuvent participer à l'accélération du durcissement. Le surcoût lié aux matières premières peut être compensé par la diminution des dimensions et du poids des éléments en BFUP, par des gains de temps sur le chantier résultant d'un assemblage et d'un montage plus rapide de l'ouvrage ainsi que par une diminution des coûts de transport des matériaux et des matériels. L'allègement de l'ouvrage qui en découle permet de réduire la dimension des fondations et des autres éléments porteurs. Enfin, des économies sont réalisées sur le long terme grâce à l'excellente durabilité des BFUP. [8]



Figure.I. 5: Passerelle de Seoul.

II.1. Introduction

Les progrès dans le domaine des adjuvants, et des méthodes de formulations et l'utilisation des ultrafines, ont conduit à une évolution spectaculaire des bétons : des bétons courants de résistance 30 Mpa en compression, la gamme s'est élargie aux bétons à hautes performances. Une rupture technologique est intervenue aux débuts des années quatre-vingt dix avec la mise au point de bétons dont la résistance en compression est de l'ordre de 200 Mpa et de 40 Mpa en traction par flexion. Grâce à cette dernière caractéristique, on peut désormais envisager de s'en passer des armatures passives dans les éléments structurels. Les ultrafines utilisés dans les BFUP sont des fumées de silice de haute puretés qui réagissent avec la chaux issue de l'hydratation du ciment. Elles participent ainsi à la résistance de l'ensemble et ferment le réseau des pores à la diffusion des ions et des gaz.

II.2. Généralités

Les études menées depuis les années 80 sur la formulation et la fabrication des bétons utilisant des additions réactives ainsi que des superplastifiants hauts réducteurs d'eau ont conduit à la mise au point des Bétons à Ultra Hautes Performances (BUHP). Ces bétons présentent des propriétés mécaniques et de durabilité exceptionnelles par rapport aux bétons ordinaires. Cependant, ces bétons ont un comportement fragile aussi bien en compression qu'en traction. Pour y remédier et assurer un comportement ductile, la solution consiste à intégrer des fibres au BUHP qui devient dès lors un Béton Fibré Ultra Performant (BFUP).

Par définition, les BFUP se distinguent des bétons à hautes performances et à très hautes performances par leurs résistances caractéristiques en compression supérieures à 150 MPa à 28 jours, par l'emploi de fibres qui assurent la non fragilité du matériau, par leur fort dosage en liant et leur très faible dosage en eau, et par la sélection particulière des granulats (AFGC,2002) [9].

II.3. Domaines d'applications

Les domaines d'applications du BFUP sont très variés. Le BFUP peut être utilisé seul ou être lié monolithiquement, avec un béton usuel ou des poutres métalliques, pour fonctionner comme une structure mixte. Son emploi sera d'autant plus efficace si plusieurs de ses propriétés particulières (durabilité, résistance à la compression et à la traction) sont exploitées simultanément (fig. II.1).

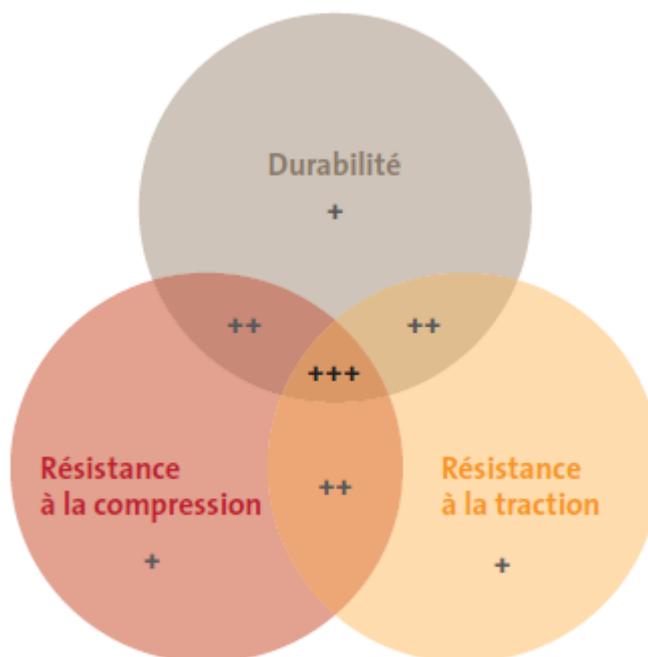


Figure II. 1 : Optimisation de l'emploi du BFUP par l'exploitation simultanée de ses propriétés principales. Degré d'efficacité: + = bon, ++ = très bon, +++ = excellent.

Les principales applications peuvent être classées dans trois domaines : nouvelles constructions, renforcement/réhabilitation de structures et éléments non structurels. La fig. II.2 illustre les sections de poutres de même résistance, conçues avec différents matériaux. L'économie de matériau, rendue possible par l'utilisation d'un BFUP, est clairement mise en évidence.

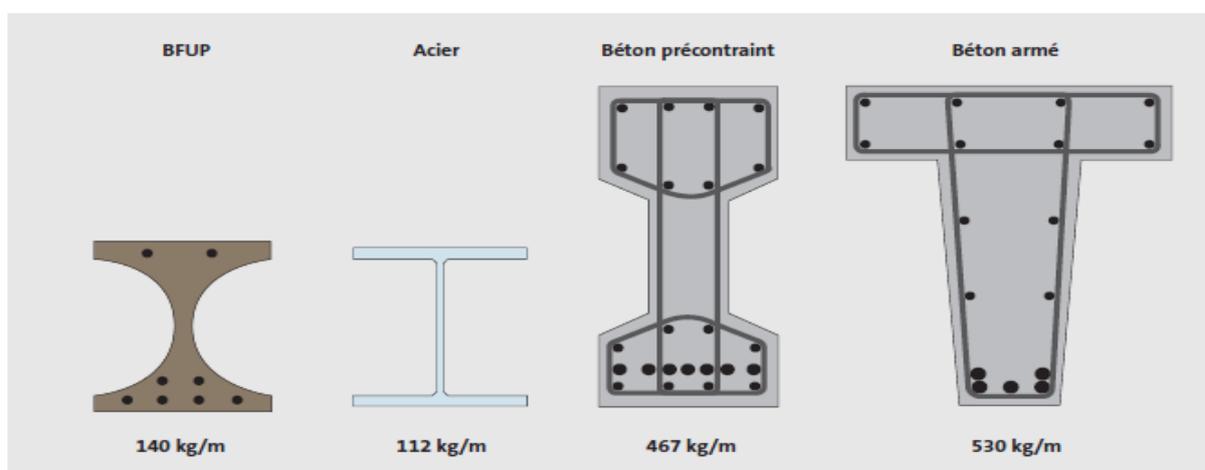


Figure II. 2 : Comparaison entre différents éléments de structure de mêmes résistances conçues avec différents matériaux.

La réduction de section de la structure porteuse permet d’augmenter les volumes exploitables, alors que la réduction de la masse rend possible une diminution de la taille des fondations et des porteurs verticaux. A masses linéaires égales, il serait aussi possible d’augmenter les portées des poutres, donc de réduire le nombre de colonnes. Dans le cas du BFUP, en particulier en cas de poutres précontraintes, il est possible de se passer d’armature passive, ce qui signifie une intervention manuelle de moins. Dans le cas d’une réhabilitation d’un élément en béton armé, la couche de BFUP peut jouer un rôle de protection ou de renforcement (fig.II.3).

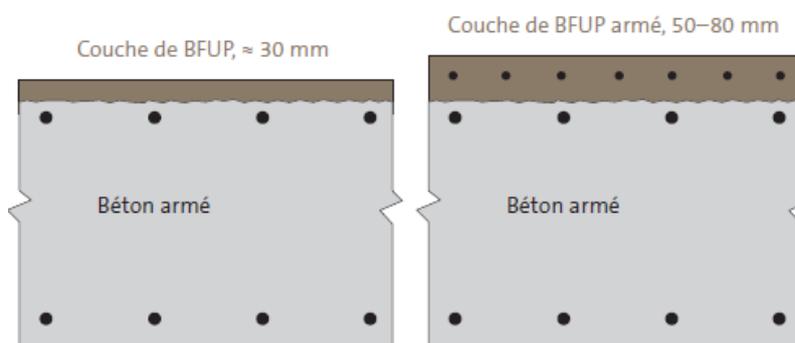


Figure II. 3 : Protection ou renforcement d’un béton armé par une couche de BFUP.

Tableau II. 1. différentes mises en applications des BFUP :

	Nouvelles constructions (préfabriquées ou bétonnées en place)	Renforcement et/ou réhabilitation (éléments mixtes BFUP-béton)	Éléments non structurels
Exemples d'utilisations	<ul style="list-style-type: none"> • Dalles minces • Dalles nervurées • Poutres légères • Éléments de façade architectonique • Coffrage perdu servant de peau aux éléments très exposés (bordures de ponts, STEP) • Têtes de poinçonnement • Têtes d'ancrages • Parois anti-bruits • Pieux battus • Consoles de balcons 	<ul style="list-style-type: none"> • Couches minces appliquées de façon monolithique sur un élément en béton existant afin d'en augmenter sa durabilité, son étanchéité et/ou sa capacité portante (dalle de roulement, colonnes, parapets de ponts) • Éléments localement très sollicités mécaniquement (articulations, joints) • Couches de protection étanches et à haute résistance à l'abrasion pour l'industrie ou les ouvrages hydrauliques • Élément de protection contre les actions dynamiques (chocs, explosions) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilier • Œuvres d'art • Objets design (vases, lampes, plan de travail de cuisines, baignoires) • Caissons de stores
Types d'armature	<ul style="list-style-type: none"> • Fibres métalliques ou synthétiques • Armature passive • Précontrainte 	<ul style="list-style-type: none"> • Fibres métalliques • Armature passive 	<ul style="list-style-type: none"> • Non fibré • Fibres synthétiques ou éventuellement métalliques

II.4. Formulation des BFUP

II.4.1 Principe de formulation

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. Les principes de formulation utilisés pour la fabrication des BHUP sont en fait les mêmes que ceux utilisés pour formuler les BHP et les BTHP. Cependant dans le cas des BHUP. Ces principes de formulation sont résumés dans un document lié au développement du béton de poudres réactivées (BPR) [10] il s'agit de l'amélioration de l'homogénéité du béton. De l'optimisation de la compacité granulaire, de la modification de la microstructure et du développement de la ductilité. L'optimisation du squelette granulaire constitue la phase primordiale 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.

Les principes de base de la formulation des BFUP ou BFUHP ont été étudiés par plusieurs auteurs [11].

Ces principes sont :

- Réduction de la taille des gros grains afin de diminuer l'effet mécanique lié à l'hétérogénéité du matériau (taille maximale de moins de 7 mm selon les recommandations japonaises et inférieure à 2,5 mm pour les recommandations de l'AFGC 2002 [12].
- Augmentation de la quantité de la pâte cimentaire, à savoir, le ciment et les additions pouzzolaniques telles que la fumée de silice [13].

La figure II.4 illustre l'effet physique de la fumée de silice qui réagit comme « les micro-fillers » en augmentant la fluidité du matériau. Ces ultras fines ont un effet pouzzolanique qui réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium (CH), formant des liaisons avec l'hydrate de silicate de calcium (C-S-H). Donc ces charges améliorent les propriétés de la pâte à deux niveaux : diminution de la porosité en réduisant l'espace entre les grains par l'évolution du CH, ainsi qu'une amélioration des propriétés mécaniques de la pâte cimentaire en réagissant avec le CH :

- Optimisation de la compacité du matériau en jouant sur la distribution granulométrique des granulats et le liant ;

- Réduction maximale du rapport eau/liant ;
- Augmentation de la ductilité du matériau, de la capacité de déformation et la résistance à la fissuration avec l'ajout des fibres courtes et longues.

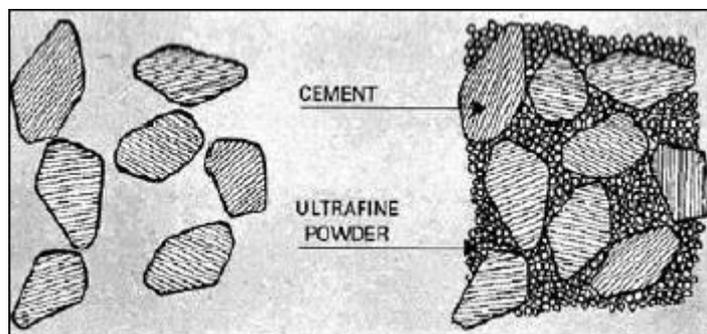


Figure II. 4 : Effet des ultras fines et du ciment sur la compacité du béton [14].

II.4.2. Constituants

La composition des BFUP repose au minimum sur cinq constituants : ciment, fumée de silice, fibres, eau et superplastifiant. Le rapport eau sur ciment (E/C) varie entre 0,15 et 0,25 avec des dosages en fumée de silice allant jusqu'à 30%.

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

- Le ciment (Quantité de ciment comprise entre 700 et 1000 kg/m³).
- Le sable fin (0,063 mm < diamètre max < 2 mm), Granulats de taille réduite et de résistance mécanique élevée,
- La fumée de silice (10 à 30 % du poids de ciment C)
- Le quartz broyé (diamètre max < 20 µm)
- Les fibres métalliques et non métalliques (synthétiques, carbonées, ...etc.) pouvant être courtes ou bien longues de dimensions et formes différentes selon les propriétés recherchés.
- Le superplastifiant haut réducteur d'eau (le dosage varie de 0.5 à 3% du poids de ciment)
- L'eau (rapport E/Liant inférieur à 0.25).

Les compositions typiques d'un béton ordinaire, d'un béton à hautes performances BHP et d'un Béton ultra hautes performances fibré (BFUHP) sont données dans le tableau II.2. Le BFUHP est un béton à granulométrie fine, avec une sélection optimisée de granulats, un haut taux de ciment et de fines (principalement de la fumée de silice), et un rapport eau/liant bas. De

plus, la quantité de superfluidifiant utilisée dans le BFUHP est plus élevée que celle utilisée dans le béton normal ou à haute résistance.

Tableau II. 2. Composition et propriétés de trois bétons différents, béton ordinaire, béton à hautes performances :

	Composants	BO [Kg/m3]	BHP [15] [Kg/m3]	BFUHP [16-17] [Kg/m3]
Matrice	Ciment	≤ 400	410	700-1000
	Gravier	≈ 1000	920	0-200
	Sable	≈ 700	620	1000-2000
	Fume de silice	/	/	200-300
	Superplastifiant	/	5	10-40
	eau	≥ 200	100-150	110-00
	Rapport E/C	≥ 0.35	0.28-0.38	≤ 0.24
	Rapport E/L		≤ 0.38	≤ 0.22
	Fibre [Kg/m3]	/	/	≥ 150
Propriétés	Densité [Kg/m3]	2000-2800	2000-2800	≥ 2500
	Résistance à la compression [MPa]	≤ 60	60-100	≥ 150
	Résistance à la traction [MPa]	≤ 3	≤ 5	≥ 8
	Moduled'élasticité initial [GPa]	≈ 30	≤ 45	50-70
	Energie de rupture [J/m2]	30 - 200	< 150	< 90 sans fibres >10000 avec fibres

II.4.2. 1. Ciment

Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, qui est par définition la résistance à la compression minimale garantie à 28 jours le choix ce fait donc à partir des 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).

Les Bétons Fibrés Ultra Performants (BFUP) possèdent des quantités importantes en ciment et leur masse varie entre 700 et 1000 kg/m³, beaucoup plus élevée que pour des bétons conventionnels qui ont une masse de 300 à 375 kg/m³. Les ciments pour les BFUP doivent avoir une faible teneur en alcalin et C3A permettant ainsi de réduire les besoins en eau, et la chaleur d'hydratation [18].

Afin de créer suffisamment de pâte dans ce type de béton, il est nécessaire de combiner cette importante quantité de ciment avec la fumée de silice pour enrober les fibres de manière satisfaisante. La pâte liante (eau+ciment+fumée de silice) doit être optimisée pour que le mélange ait un comportement auto-plaçant avec un comportement mécanique meilleur.

II.4.2. 2. Les poudres réactives ou ultrafines

II.4.2.2.1 Les pouzzolanes

Le terme pouzzolane a deux sens bien distinct, le premier indique les roches pyroclastiques de structure vitreuse et parfois zéolithique, qu'on trouve au voisinage de la région de Pouzzol ou de Rome en Italie, le second qui est plus large en terme d'origine géologique, composition et de structure, englobe tous les matériaux inorganiques d'origine naturelle ou artificielle qui réagissent puis se solidifient dans l'eau en présence de la chaux ou mélangés avec d'autres matériaux qui peuvent libérer de l'hydroxyde de calcium (clinker du ciment Portland).

Depuis longtemps, l'usage de pouzzolanes a été restreint à l'Italie, où des réserves considérables de pouzzolane furent trouvées et à la Grèce. Dans les autres pays l'intérêt pour ces matériaux est relativement de récente date, il émerge du besoin de réutiliser des déchets de matériaux tels que les cendres volantes ou la fumée de silice. Cette aperçue historique peut expliquer pourquoi tant de pays ont si longtemps décriés les ciments contenant de la pouzzolane, malgré le fait que l'usage de mortier Ca(OH)₂-pouzzolane date de plusieurs

millénaires, plusieurs études ont montrées par la suite que les bétons avec ajout de matériaux pouzzolanique ont montrés d'incroyable résistance mécanique et de bonne résistances au agents agressifs.

- **Les propriétés physiques de la pouzzolane**

Elle est d'aspect rugueux, caverneux, de porosité fermée, sa densité apparente varie de 0.65 à 0.95. La pouzzolane résiste au feu et au choc thermique. Elle fond vers 1140 °C.



Figure II. 5: Pouzzolane rouge de Beni-Saf.

- **Les propriétés chimiques de la pouzzolane**

Elle est constituée de trois oxydes principaux : SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Parfois de la chaux mais pas suffisamment pour donner naissance au sel insoluble de la chaux, de silice d'alumine dont la formation provoque la prise. Seule elle n'a guère de propriétés hydrauliques que lorsqu'elle est mélangé a de la chaux.

II.4.2.2.2 La fumée de silice

C'est une poudre hautement pouzzolanique de très grande finesse, dont la taille des particules est comprise entre 0.05 et 0.1 μm , c'est à-dire 100 fois plus grande que celle du ciment, sa surface spécifique est d'environ 20 000 m^2/kg (selon la méthode d'adsorption d'azote) est elle ne peut être déterminée par la méthode de Blaine à cause de sa finesse très élevée. Il s'agit d'un coproduit, recueilli sur des électro-filtres, du processus de fusion permettant de produire du silicium métal et des alliages de Ferro silicium.

- Les ultrafines incorporées telles que la fumée de silice agissent à trois niveaux :

- Une effet de remplissage (effet filler) par l'augmentation de la compacité du matériau par l'occupation des vides entre les grains de ciment, des fibres et de sable (figure II.6)
- Amélioration de la rhéologie du mélange grâce à la finesse et la forme des grains.
- Formation d'hydrates qui contribue à l'amélioration des propriétés mécanique par activité pouzzolanique.

Grâce à ces trois actions, le BFUP peut avoir une structure très compacte avec une meilleure résistance. Plusieurs auteurs ont étudié le dosage nécessaire en fumée de silice donnant les meilleures performances. Parant 2003 [20], propose d'introduire 25% en fumée de silice, Chan et Chu 2004 [21], montrent qu'effectivement l'énergie nécessaire pour arracher les fibres de la matrice ainsi que la contrainte d'adhérence atteignent les meilleures performances avec des teneurs entre 20 et 30 %.

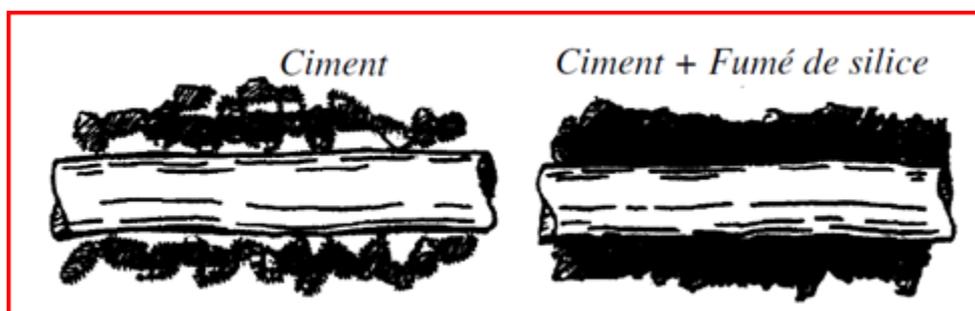


Figure II. 6: Représentation schématique d'une fibre mélangée avec une matrice cimentaire avec et sans l'ajout de la fumée de silice [22].



Figure II. 7 : Poudre de fumée de silice.

II.4.2.2.3 Cendres volantes

Les cendres volantes, sont l'ajout le plus fréquemment utilisé dans le béton. Selon la norme NF 450 c'est un résidu finement divisés de nature vitreuse résultant de la combustion du charbon pulvérisé et évacué de la chambre de combustion d'un four par les gaz qui sont échappent à des températures de l'ordre de 1550 °c. La plupart des cendres volantes sont un sous produit des centrales thermiques.

La dimension des particules de cendres volantes est comprise entre moins de 1µm et plus de 100 µm, avec une dimension caractéristique de moins de 20 µm. La surface spécifique est généralement comprise entre 300 et 500 m²/kg, bien que certaines cendres volantes aient des surfaces spécifiques aussi faibles que 200 m²/kg et aussi élevées que 700 m²/kg.

La cendre volante est surtout constituée 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 des cendres volantes varie de 1,9 à 2,8. Elle est généralement de couleur beige ou grise. Les cendres riches en calcaire (teneur en CaO 10-35 %) avec un effet pouzzolanique fort et celles pauvres en calcaire (CaO < 5 %) avec une activité pouzzolanique faible [23].

II.4.2.2.4 Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte dans le haut fourneau à partir de minerai de fer (les oxydes FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄ en proportions variables), de coke et éventuellement d'un fondant. On le recueille liquide vers 1550 °C au-dessus de la fonte (gravitation de la fonte en fusion).

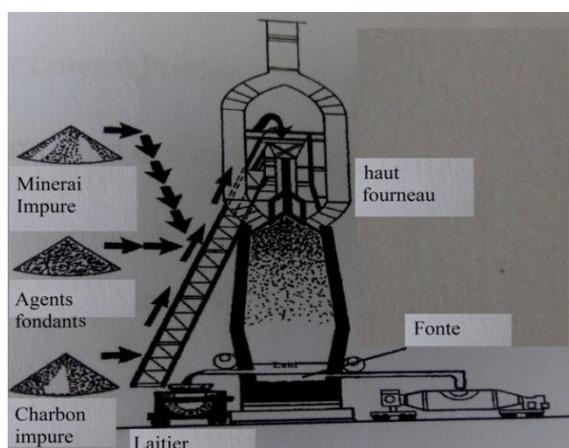


Figure II. 8 : Procédé de production de la fonte.

II.4.2. 3. Le sable

- **Définition**

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre $80\ \mu\text{m}$ et $05\ \mu\text{m}$; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce matériau dont le diamètre maximal est inférieur à $6.3\ \text{mm}$ et dont le passant à $80\ \mu\text{m}$ n'excède pas $30\ \%$ dans le sens le plus courant, on entend par « sable » les éléments de dimension 0 à $5\ \text{mm}$, les fillers non compris. A cette définition se rattachent les sables de concassage ; mais lorsqu'on dit sable, on pense essentiellement aux sables naturels abondants dans de nombreux pays et dont les réserves sont inépuisables. Les sables utilisables sont ceux conformément aux définitions des normes NFP 18-541 ($E_s \geq 75$ si le sable est roulé et $E_s \geq 65$ s'il est broyé). Il peut s'agir d'un sable alluvionnaire, de ballastière ou de concassage 0/d.

- **Utilisation de sable dans les BFUP**

Le sable utilisé doit avoir une nature minéralogique très dure, de classe granulaire serrée et d'un module de Young voisin de celui de la pâte, développant ainsi une bonne adhérence granulat-pâte. En effet on distingue deux catégories de sable : les sables concassés améliorent les résistances mécaniques par des propriétés d'interface supérieures (adhérence) et limitent ainsi la microfissuration. Les sables roulés quant à eux, augmentent la rhéologie du mélange granulaire[24]. La taille moyenne du sable utilisée dans la fabrication des BFUP est inférieure à $1\ \text{mm}$ [25]. Il faut noter que les distributions de la taille des grains de ciment, de la fumée de silice et du sable doivent être optimisées afin d'obtenir une haute compacité et donc une matrice dense avec une très faible perméabilité [26].



Figure II. 9: sable de dune 0/1 mm riche en silice.

II.4.2.4 Adjuvants superplastifiants

- **Définition**

Un adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau est un adjuvant qui, sans modifier la consistance, permet de réduire fortement le rapport E/C, en augmente considérablement l'affaissement (l'étalement).

- **Description des adjuvants superplastifiants**

Les superplastifiants hauts réducteurs d'eau sont des polymères de synthèse fabriqués spécialement pour l'industrie du béton. Ils sont à base de sels de sodium ou de calcium de polynaphtalène sulfoné (PNS), polymère avec des fonctions polycarboxylate polyoxéthylène (PCP), de sel de sodium de poly-mélatamine sulfoné(PMS).

- Polynaphtalène sulfonâtes(PNS) :
- Le PNS est un polymère composé d'un aldéhyde et de naphtalène sulfoné, sont d'une efficacité dispersante très liée à la nature du ciment.
- Polymélatamine sulfonâtes(PMS) :

Le PMS est une polymélatamine sulfonate effectué à partir de la mélatamine, du forma aldéhyde

- Polycarboxylate polyoxéthylène (PCP) :

Le PCP est un polymère dont le mécanisme de dispersion se fait par une répulsion combinée d'effets électrostatiques. Le groupement fonctionnel est formé d'acides métacryliques ou acryliques [27].

II.4.2.4.1 Mécanismes d'action des adjuvants superplastifiants

Lorsque les molécules organiques des superplastifiants sont introduites dans une suspension d'un matériau cimentaire, une grande partie d'entre elles vient se fixer à la surface des particules de ciment (adsorption).

Ces dernières réduisent les forces attractives d'interactions inters particulaires, qui existent entre les atomes des différentes particules.

Les adjuvants superplastifiants, par leur effet physique modifiant les forces inter partuculaires, peuvent intervenir dans les processus chimiques de l'hydratation et notamment de la nucléation et la croissance cristalline.

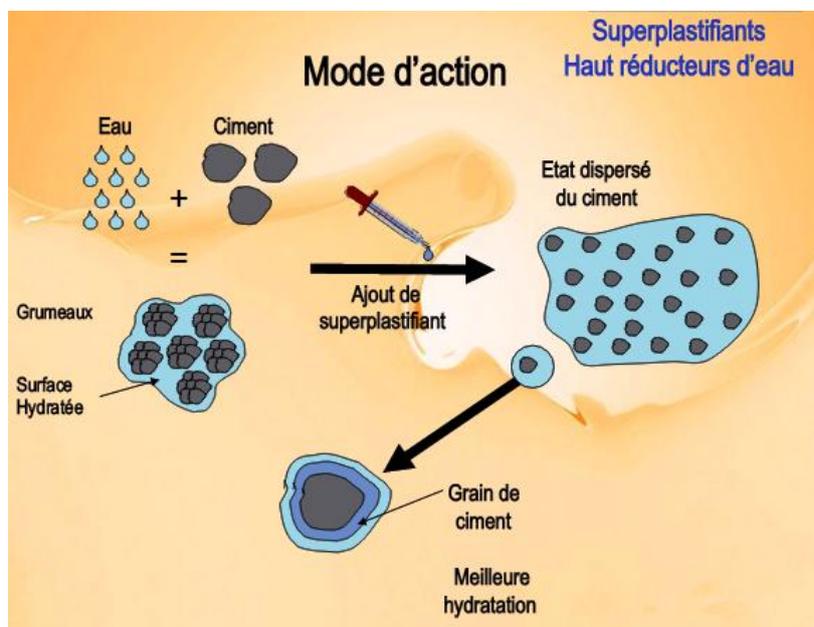


Figure II. 10: Mécanismes d'action des adjuvants superplastifiants.

II.4.2.4.2 Utilisation des superplastifiants dans les BFUP

Les superplastifiants sont des produits nécessaires pour la fabrication des Bétons Fibrés Ultra Performants (BFUP) afin de donner au matériau une bonne rhéologie. C'est d'ailleurs le développement de super plastifiant performant qui a permis la réduction du rapport E/L nécessaire à la fabrication des BFUP. Le super plastifiant doit être choisi en tenant compte de sa compatibilité avec le ciment et de son efficacité. Le dosage et aussi un paramètre important qui varie selon le type de super plastifiant utilisé, la composition de BFUP ainsi que la séquence de malaxage. Généralement les superplastifiants de la troisième génération tels que le polycarboxylate haute réducteur d'eau sont utilisés [28], pour leur fort pouvoir de défloculation. Ils peuvent également réduire les besoins en eau de près de 40% avec une très bonne fluidité qui peut persister jusqu'à 60 minutes sans qu'il y ait ségrégation [29].

II.4.2.5 Les fibres

L'utilisation de fibre dans le béton

L'ajout de fibres dans le béton modifie ses propriétés. Largement utilisées pour assurer la pérennité des ouvrages, certaines sont capables de coudrer les macro fissures (figure II.11). Une pièce en béton armé renforcée à l'aide d'une couche en béton de fibres permettra d'augmenter la résistance au feu (par limitation des ouvertures des fissures et aussi protègent les armatures traditionnelles). Il existe maintenant trois gammes de fibres utilisées pour des applications très différentes : métalliques, macro fibres synthétiques et microfibres polypropylènes.

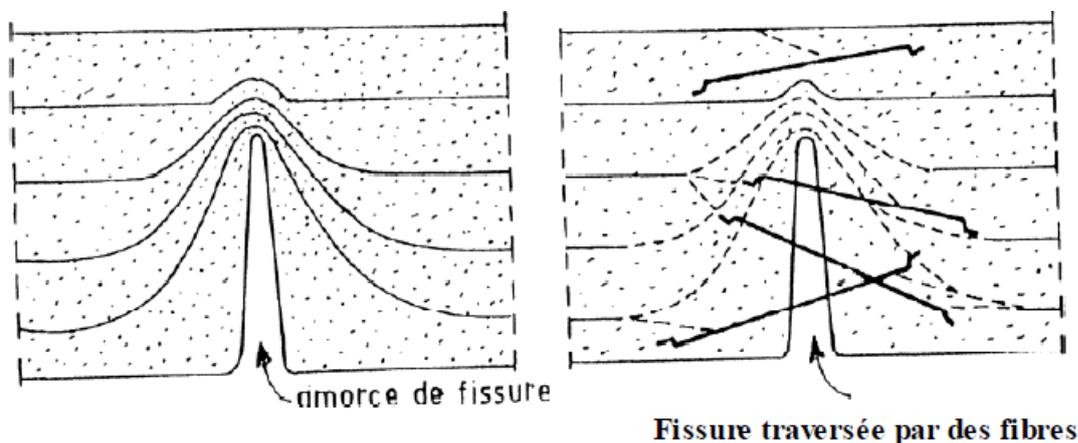


Figure II. 11: Rôle des fibres dans la matrice de béton.

II.4.2.5.1. Les différentes natures des fibres

Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle), leur forme (droite, ondulée, aiguille,...etc), leur dimension (macro ou micro-fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Les principales fibres utilisées sont:

1. Fibres minérales: Elles regroupent plusieurs sortes de fibres (amiante, alumine ...etc), et sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles. Les fibres d'amiante autrefois utilisées pour l'isolation et lignifugeage, se sont aujourd'hui révélées cancérigènes.

2. Fibres végétales: La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis. Les fibres végétales résistent aussi à la plupart des acides organiques mais sont détruites par les acides minéraux forts. Il existe quatre sortes de fibres végétales: les fibres provenant des poils, les fibres du liber, et les fibres extraites des troncs de certaines graminées. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction (fibres de bois).

3. Fibres synthétiques :

Cette famille regroupe plusieurs types de fibres comme le (nylon, polypropylène, polyester ...etc.). Elles sont apparues à la fin du XIX^{ème} siècle sous le nom de rayonne. Elles sont dérivées de la cellulose naturelle. Aujourd'hui, la plupart des fibres synthétiques proviennent de produits dérivés du pétrole et de polymères géantes dont la structure ressemble à celle des matières plastiques. La première fibre plastique commercialisée avec succès, le Nylon, daté de 1938. Depuis, de nombreux synthétiques, dont les fibres acryliques, l'aramide, l'oléfine et le polystyrène sont apparus. Ces fibres ont également été étudiées à des fins industrielles très précises, telles que la fabrication des matériaux d'isolation, tissus pare-balles, les fuselages et ailes d'avion.

4. Fibres artificielles :

Ce type de fibres est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et d'autres. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction.

II.4.2.5.1. Différents types de fibres

a. Fibres de cellulose.

Les fibres de cellulose sont obtenues à partir du bois par différents processus chimiques et mécaniques. Elles étaient utilisées pendant des années comme un additif au ciment d'amiante et non pas comme un renfort. Aujourd'hui, elles sont utilisées principalement pour renforcer les matrices organiques et aussi des matrices cimentaires destinées à la fabrication des plaques minces, des pipes, et d'autres types d'éléments. Leurs propriétés physiques sont changeables selon les modes de fabrication de ce type de fibres. Les diamètres de ces fibres varient de 1 à 4 mm, tandis que leurs longueurs comprises entre 10 à 50 mm, alors que l'éclatement peut être dans les environs de 100. Leurs résistances en traction varient entre 10 et 30 MPa. Elles

sont très efficaces dans l'amélioration de la résistance mécanique d'un composite. Cette amélioration est réalisée essentiellement par le freinage des fissures.

b. Fibres de polypropylènes

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines. Il est fabriqué depuis 1954 pour l'industrie textile. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants: bonne résistance à la traction qui peut atteindre 800 MPa, déformabilité élevée. Ces fibres sont obtenues suivant le processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre des propriétés mécaniques élevées. L'ajout de fibres de polypropylène au mortier et au béton remonte à 1960 mais ce n'est qu'à partir de 1967 qu'apparaissent des réalisations intéressantes notamment en Grande Bretagne. Ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de panneaux décoratifs, ainsi que l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux.

c. Fibres de verre

Ces fibres sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 μm . Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12, et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types : La fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre de verre au borosilicate.

Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes :

- bonne adhérence avec la matrice,
- disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues ...),
- bonne résistance à l'humidité et à la corrosion.
- conductivité thermique relativement faible.

d. Fibres métalliques

Ce type de fibres, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde. On se limite aux fibres d'acier mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion à l'interface entre fibre et matrice. Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre, ce qui les conduit aux nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur diamètre, leur section (ronde, carrée, rectangulaire), leur longueur et leurs modes d'opération. Les diamètres des fibres d'acier varient généralement entre 0.1 et 0.7 mm, avec des longueurs de 10 à 70 mm.

Les fibres métalliques utilisées en dallage industriel sont le plus souvent des fibres tréfilées comportant généralement des fils de 1 mm de diamètre. Les différentes fibres existantes se différencient les unes des autres par le type d'ancrage actif dans la matrice du béton. Il existe des fibres fabriquées avec un ancrage dit déformable, par exemple des fibres à crochets telles que celles commercialisées par la société Bekaert sous la marque "Dramix" ou des fibres ondulées telles que celles commercialisées par la société Trefil Arbed. Cette société fabrique également une fibre commercialisée sous la marque "Twin-set" qui possède un cône indéformable à chacune de ses extrémités. Ce type d'ancrage est beaucoup plus rigide que l'ancrage obtenu par des crochets ou des ondulations.

II.4.2.5.2. Effet des fibres dans une matrice

Dans les premières études, les chercheurs ont essayé, par l'incorporation de fibres dans le béton, d'augmenter ses caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression ou la résistance à la flexion, mais les résultats obtenus n'étaient pas ceux escomptés.



Figure II. 12: Fissuration dans un béton avec et sans fibres.

Il est à noter que le rôle principal des fibres dans un matériau peut-être lié à deux points essentiels:

Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme il est indiqué dans la figure II.12.

La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes voir figure II.13.

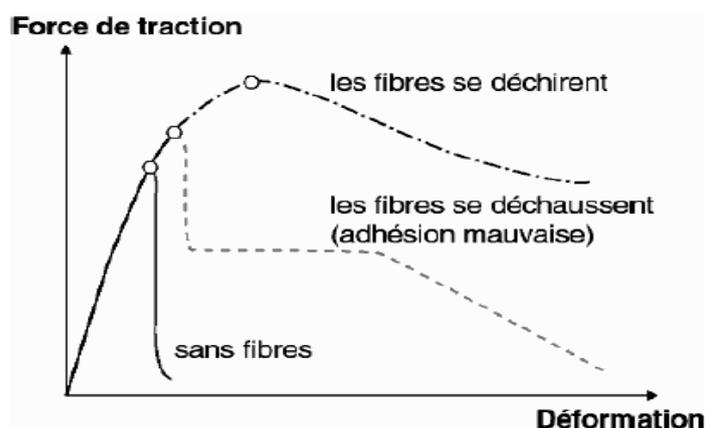


Figure II. 13 : Comportement a la traction du béton fibré.

- **La taille et la rugosité des granulats**

La dimension des granulats est très importante pour avoir un bon béton résistant et une bonne ouvrabilité.

Les B.R.F sont composés, en plus des gros granulats, d'une quantité de fibres, qui en entrant en contact avec ceux-ci tend à figer leur mouvement, fait qui se répercute principalement sur la maniabilité.

Les multiples travaux de recherche montrent que la mise en œuvre des B.F.M. est souvent difficile et a toujours posé des problèmes. Ainsi pour faciliter cette mise en œuvre, la composition du béton ne doit en aucun cas contenir des éléments dont la taille est supérieure au quart de la longueur de la fibre (une dimension maximale d'environ 8 à 15mm), c'est la raison qui fait que les bétons de sable se révèlent compatibles à l'inclusion des fibres d'où l'utilisation de petits granulats (1-7 mm) dans l'élaboration des BFUP.

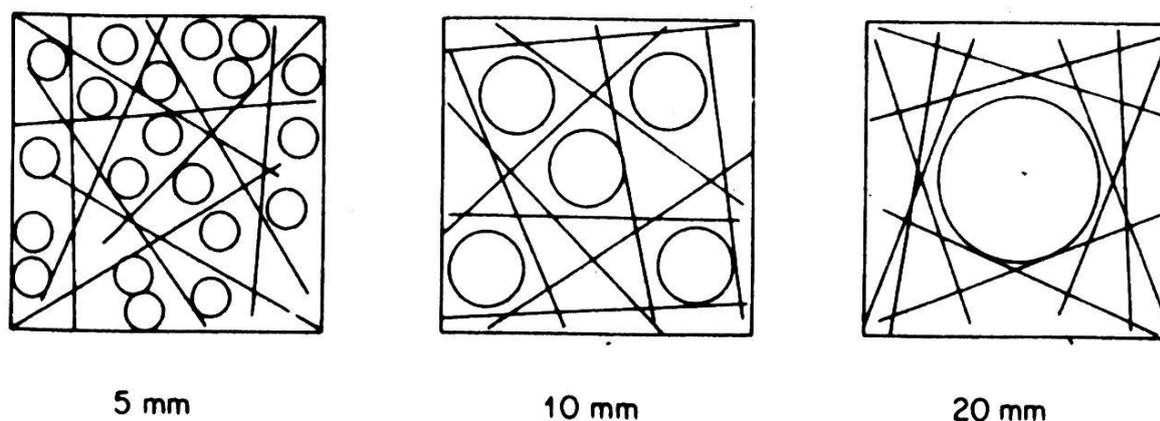


Figure II. 14: Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur d'une fibre.

- **Influence de l'adhérence fibres matrice**

L'adhérence fibres - matrice est un facteur très important vis-à-vis de l'efficacité des fibres dans la matrice. D'après Bartos (1981), l'adhérence entre fibres et matrice est assurée par trois liaisons :

- une liaison élastique.
- une liaison de frottement.
- une liaison créée par un ancrage mécanique dans le cas des fibres non rectilignes (crochets, ondulation dentelles). [30]

Des essais d'arrachement effectués par Eurosteel sur les fibres ondulées (1982) montrent que la résistance d'adhérence dépend de la teneur en ciment dans la matrice. [31]

Tableau II. 3. Le domaine d'application selon le type de fibres [3] :

Domaines d'application privilégiés par type de fibres			
Type de fibres	Dosage courant	Domaine d'application privilégié	Exemples d'application
Fibres métalliques	0,5 à 2 % en volume 40 à 160 kg/m ³	Renfort pour bétons structurels et armature structurelle	–Dallages,sols industriels,planchers, dalles de compression – Éléments préfabriqués –voussoirs de tunnels, poutres,conteneurs, tuyaux – Bétons projetés en travaux souterrains, stabilisation de pente et ouvrages d'assainissement – Pieux de fondation, semelles filantes
Fibres polypropylène	0,5 à 2 % en volume 0,5 à 2 kg/m ³	Limitation de la fissuration liée au retrait Amélioration de la tenue au feu des bétons	– Dallage – Voussoirs de tunnels –Revêtement ouvrages souterrains – Mortiers projetés – Parements esthétiques
Fibres de verre	1 à 2 %	Réalisation d'éléments Préfabriqués très minces	–Parements architectoniques – Panneaux de façade – Éléments décoratifs

III.1. Introduction

La résistance en compression, la durabilité et la faible porosité sont toutes des propriétés recherchées pour la construction d'ouvrages qui vont avoir une durée de vie bien au-delà des 40 à 50 ans de nos structures existantes. Couplés avec des tabliers en béton hautes performances avec armature composite, les ouvrages d'art peuvent facilement atteindre 75 ans. Si toutes les composantes sont en BFUP, la durée de vie sera de plusieurs centaines d'années. Le BFUP s'inscrit donc dans une démarche pour minimiser le temps de construction et réduire les coûts d'entretien à court et à long terme.

La clé du mélange pour un BFUP est l'eau ou plus précisément la très petite quantité d'eau qui est utilisée (ratio eau/ciment +/- 0.2). Pour que ce mélange puisse fonctionner avec si peu d'eau, un adjuvant et une matrice avec de très fines particules sont utilisés. L'optimisation granulométrique du mélange doit être très précise. Les composantes sont sélectionnées avec des dimensions relatives qui permettent aux particules de rouler l'une sur l'autre et créer un produit extrêmement compact avec de minuscules porosités discontinues. Comparés à un béton normal, les constituants du BFUP font en sorte que le comportement du produit final est littéralement à une autre échelle [32].

III.2. Propriétés Rhéologiques

On s'intéressera à l'étude de l'écoulement du béton alors qu'il est encore à l'état frais et maniable. Le BFUP ne nécessite aucune vibration lors de sa mise en place. Son excellente ouvrabilité autorise à la fois des applications en préfabrication et sur chantiers. La consistance, adaptée au mode de mise en place, peut être fluide dans le cas d'un coffrage de géométrie complexe.

Dans la recherche, on utilise un rhéomètre, appareil qui sert à étudier les propriétés rhéologiques des substances, pour évaluer le comportement rhéologique des BUHP.



Figure III. 1 : Rhéomètre AR2000.

Bonneau, 1997 a montré que les BUHP, sont visqueux et très collants, dont les propriétés rhéologiques diminuent dans le temps dès la fin du malaxage.

La composition du mélange, le temps de malaxage, le dosage optimal en superplastifiant et la température affectent le comportement rhéologique des BFUP. Il 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 [26].

III.2.1. Essai de fluidité

Mesure de l'étalement

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 (AFGC) Figure III.2.

En effet, la valeur de l'étalement, donnée par la moyenne de deux mesures du diamètre de la galette de béton, s'avère être plus représentative que celle de l'affaissement dans le cas des bétons se mettant en place par simple gravité (type béton autoplaçant) [54]



Figure III. 2: Essai d'étalement.

Les formules types de BFUP sont généralement de consistance fluide ce qui permet un remplissage aisé des coffrages. La plage d'ouvrabilité est cependant très large : il est possible de réaliser des BFUP d'extrusion ou autoplaçants.

III.2.2. Ségrégation dynamique (l'essai de la boîte en L)

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

13 litres de béton sont mis dans la partie verticale puis on laisse le béton se reposer pendant 1 minute. La trappe est ensuite levée et le béton s'écoule dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. A la fin de l'écoulement, on mesure les hauteurs H_1 , H_2 et le résultat est exprimé en termes de taux de remplissage H_2/H_1 . Figure III.3

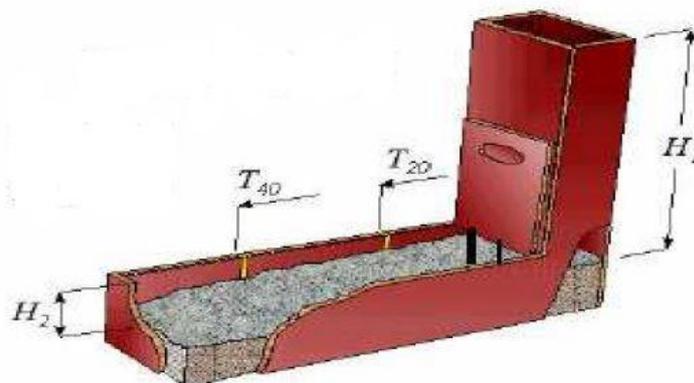


Figure III. 3: Mesure des paramètres après stabilisation.



Figure III. 4: Remplissage du béton dans la boîte en L.

III.2.3. Ségrégation statique

Pour l'étude du phénomène de ségrégation statique, on suppose que le matériau s'est correctement mis en place (absence de ségrégation dynamique) et que seule une ségrégation des gros granulats sous l'effet des forces de pesanteur peut apparaître.

La ségrégation statique n'est pas décelable en surface (sauf si elle s'accompagne de ressuage). Il est donc nécessaire de l'appréhender en amont du coulage. Les essais permettant de mettre en évidence et de mesurer la ségrégation statique sur béton frais seront tout d'abord présentés. Des études portant sur la compréhension des mécanismes du phénomène seront ensuite abordées. Nous verrons qu'elles restent limitées mais qu'elles ouvrent cependant quelques pistes de recherche.

La résistance à la ségrégation est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité in situ du béton. Les bétons peuvent présenter de ségrégation lors et après le coulage. La séparation qui survient après le bétonnage sera plus nuisible dans les hauts éléments, elle peut conduire à des défauts de surface tels que la fissuration.

En l'absence d'expérience pertinente, les conseils généraux suivants sur les classes de résistance à la ségrégation mesurée par l'essai de stabilité au tamis sont donnés: si les classes d'étalement sont hautes et/ou la classe de viscosité est faible, la résistance à la ségrégation devient un paramètre très important. Si aucune de ces situations ne s'applique, il n'est généralement pas nécessaire de spécifier une classe de résistance à la ségrégation.

Tableau III. 1. Classes de résistance à la ségrégation :

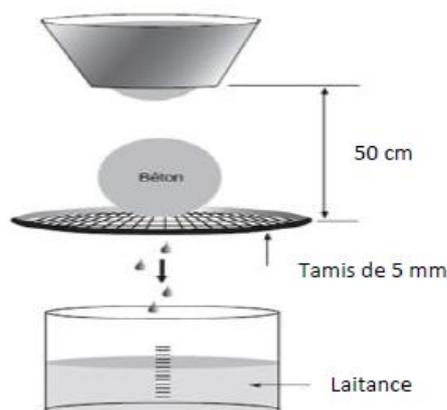
Classe	Résistance à la ségrégation %
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

- SR1 est généralement applicable pour les dalles minces et pour les applications verticales avec une distance d'écoulement de moins de 5 mètres et un intervalle d'écoulement supérieur à 80 mm.

- SR2 est préféré dans des applications verticales si la distance d'écoulement est supérieure à 5 mètres et si l'intervalle d'écoulement supérieur à 80 mm, afin de prendre soin de la ségrégation lors de l'écoulement.

SR2 peut également être utilisé pour des applications verticales avec un intervalle d'écoulement de moins de 80 mm si la hauteur de chute du béton est inférieure à 5 mètres, mais si la hauteur de chute est supérieure à 5 mètres, une valeur cible de SR de moins de 10% est recommandée.

III.2.3.1. Principe de l'essai de stabilité au tamis

**Figure III. 5:** Procédure d'essai de la stabilité au tamis.

Après prélèvement, le béton frais est laissé au repos pendant 15 min et toute remontée d'eau de ressuage est notée. La partie supérieure de l'échantillon ($4,8 \pm 0,2$ Kg) est ensuite versée dans un tamis des ouvertures carrées de 5 mm. Après 2 min, le poids du matériau qui a traversé le tamis est enregistré. Le ratio de ségrégation est alors calculé comme la proportion

de l'échantillon passant à travers le tamis. Le pourcentage de laitance SR est calculé à partir de l'équation suivante et consigné au 1% près :

$$SR = \frac{(mps - mp) \times 100}{mc}$$

Où:

SR : est la laitance en pourcentage;

mps : est la masse du fond de tamis plus masse de la laitance écoulee, en grammes;

mp : est la masse du fond du tamis, en grammes;

mc : est la masse initiale du béton placé sur le tamis, en grammes.

L'appréciation de la ségrégation statique peut être effectuée en se basant sur les résultats de l'essai de stabilité au tamis. Plus le béton est stable « pâte visqueuse et cohésive » plus le risque de la ségrégation statique est moindre [55].

III.3. Mise en œuvre

III.3.1. Pompabilité

La technique de pompage est utilisée depuis des années. Elle permet l'acheminement du béton frais dans le coffrage sans utiliser de benne ni de bande transporteuse. Cette technique est largement utilisée dans le domaine de la construction car elle présente plusieurs avantages [34] :

- Rapidité de mise en œuvre
- Coulage dans des endroits difficiles d'accès
- Coulage sans interruption.

Cependant le pompage du béton est plus complexe que celui de l'eau et il est nécessaire de savoir au préalable si un béton est pompable ou non. Le béton frais présente des propriétés d'écoulement particulières mais de manière générale un béton pompable est un béton qui garde ses propriétés rhéologiques et qui ne ségrège pas tout au long de l'opération [35]. De plus, il est nécessaire d'assurer un approvisionnement continu en béton car il faut limiter les temps d'arrêt afin d'éviter tout risque de blocage.

III.4. Caractéristiques Mécaniques et Physiques

Les BFUP possèdent des propriétés remarquables, aussi bien en termes de performances mécaniques que de durabilité. Ces propriétés sont obtenues grâce à une microstructure très compacte, due à une utilisation d'une grande quantité de liant, de sable fin, d'adjuvant et d'un faible rapport E/C. Nous avons vu auparavant qu'un traitement thermique peut également être appliqué en complément pour accélérer les évolutions des performances mécaniques, ou les accroître par transformation des hydrates afin d'en former de plus résistants.

III.4.1. La résistance à la compression

Une des propriétés exceptionnelles des BFUP est leur résistance caractéristique en compression à 28 jours, généralement supérieure à 150 MPa, et pouvant aller jusqu'à 250 MPa (AFGC, 2013). L'optimisation du squelette granulaire permet de diminuer le volume des vides et par conséquent d'augmenter la résistance en compression. Le traitement thermique permet de modifier la structure des hydrates pour les rendre encore plus performants. L'ajout de fibres peut améliorer la résistance en compression si le dosage volumique est supérieur à 2%. Tout d'abord, nous présentons, sur la figure III.5, le comportement en compression

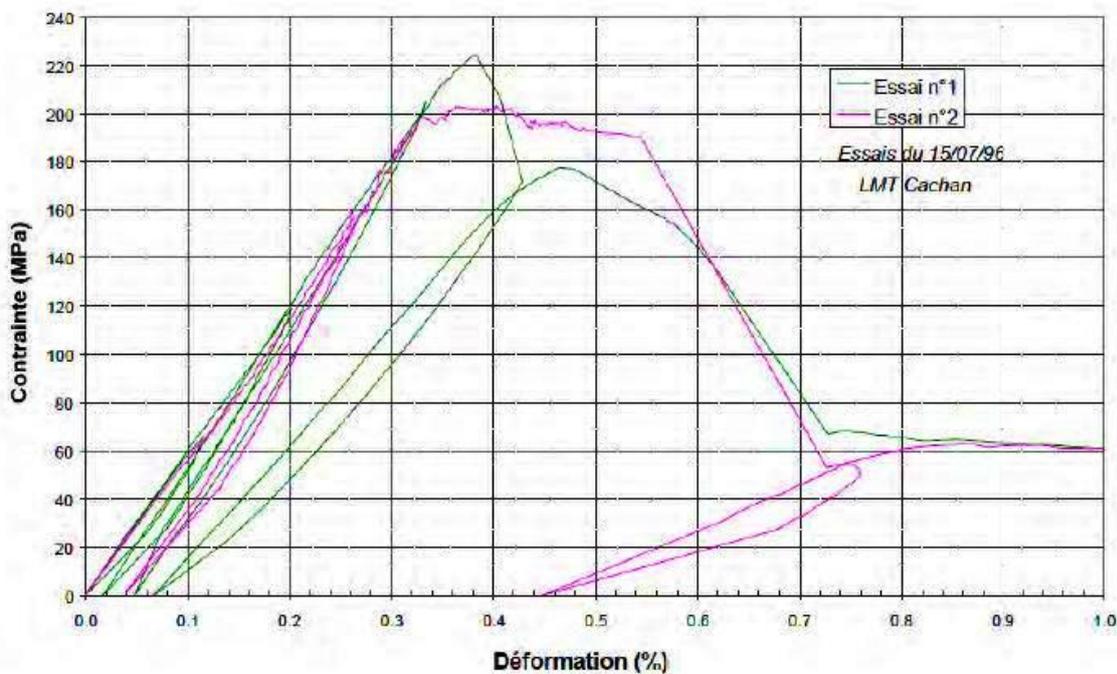


Figure III. 6: Relation «contrainte-déformation» en compression.

Cette figure représente le comportement en compression obtenu à partir des essais en compression sur cylindres de 70 mm de diamètre, et de 140 mm de hauteur. La résistance en compression maximale a atteint une valeur maximale de 200 MPa, le module de Young est de 57 GPa, et la déformation maximale pour le palier plastique est de 0,375%. Le comportement post-pic adoucissant est obtenu grâce à l'incorporation de fibres.

Celui-ci dépend directement de la quantité, du type de fibres et de leur interaction avec la matrice cimentaire.

II.4.1.1 Le rapport entre l'eau d'hydratation du ciment et la résistance à la compression

- **Le rapport E/L**

Les acquis techniques et les progrès récents dans le domaine de la science des matériaux ont contribué de manière fondamentale à la compréhension du comportement mécanique du béton, permettant d'intervenir sur les origines des faiblesses au niveau de la microstructure du matériau. En particulier, les connaissances approfondies sur l'hydratation du béton et sur l'optimisation de la granulométrie ont ouvert le chemin vers un développement poussé des matériaux cimentaires et vers la conception de bétons à hautes et ultra-hautes performances.

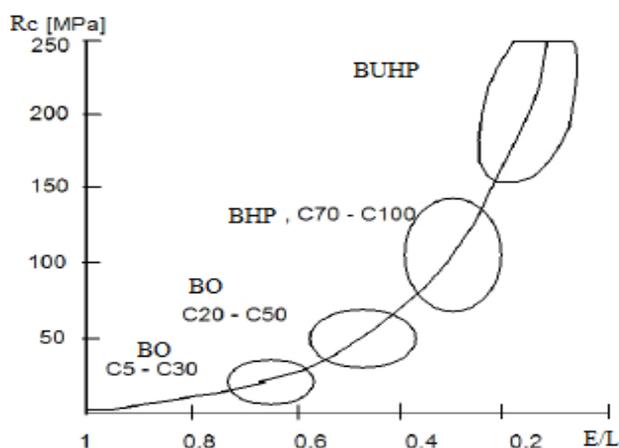


Figure III. 7: Influence du rapport eau/liant sur la résistance à la compression du béton.

- **Le rapport entre la porosité et la résistance à la compression du béton :**

La nature hétérogène du béton influence à la fois sa résistance et sa ductilité. La résistance de béton est fortement réduite par la présence des phases faibles et par la différence de rigidité des composants. La phase la plus faible du béton est constituée par les

pores, dont la quantité et la distribution dépendent principalement du rapport eau-liant (figure III.7) et de la quantité d'air qui est introduite dans le mélange, accidentellement ou intentionnellement, lors du malaxage. La présence des pores favorise la concentration des contraintes. Les pores constituent des endroits préférentiels de propagation des fissures dans le béton sollicité.

Une grande porosité caractérise en particulier la matrice qui se trouve dans la zone en proximité des agrégats, appelée "zone de transition", où les grands cristaux de ciment hydratés se forment. Dans cette zone fragile, des micro-fissures peuvent apparaître à cause des contraintes dues au retrait de la pâte de ciment, empêché par les agrégats. Les variations d'humidité et de température, différentes pour la pâte et pour les agrégats, peuvent également favoriser la fissuration.

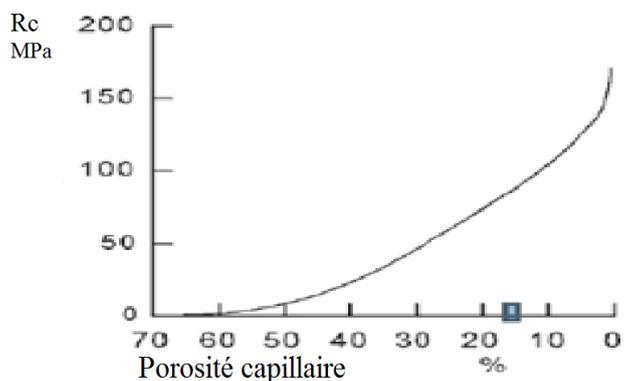


Figure III. 8: Influence de la porosité sur la résistance à la compression du béton.

III.4.1.2 Essai de compression

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uniaxiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée.

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance sera évaluée en utilisant des échantillons en forme de cube ou de cylindre. La vitesse de chargement doit être choisie dans la gamme 0,2 à 1 Mpa/s et être maintenue constante à 10% près selon la norme européenne EN 12394. Les caractéristiques des machines d'essais sont indiquées dans la norme européenne EN 12390.

La conduite de l'essai est la suivante: l'éprouvette, une fois rectifiée doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. La mise en charge doit être effectuée à raison de 0.5 Mpa avec une tolérance de ± 0.2 Mpa pour des éprouvettes de 15x15x15cm. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai.

La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette, elle est donnée par l'équation suivante :

$$R_c = \frac{F}{S}$$

R_c : Résistance à la compression en Mpa (N/mm^2).

F : Charge maximale ou de rupture (N).

S : l'aire de la section de l'éprouvette (mm^2) [27].

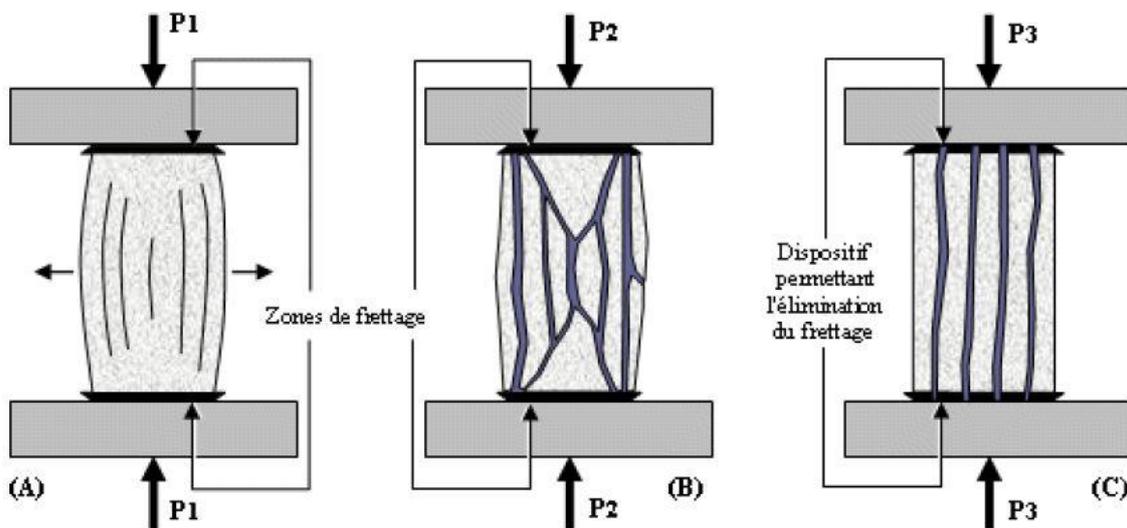


Figure III. 9: Influence de la porosité sur la résistance à la compression du béton.



Figure III. 10: Essai de compression sur des éprouvettes cubiques.

III.4.2. La résistance à la traction

Une caractéristique remarquable des BFUP est leur résistance en traction dont la valeur minimale de 6 MPa d'après la prénorme (PR NF P18-470) est largement supérieure à celle des bétons ordinaires qui est de l'ordre de 3 MPa. Cette propriété est acquise grâce à l'optimisation de la compacité de la matrice et à l'ajout de fibres. L'incorporation de fibres dans la matrice cimentaire permet également d'améliorer fortement le comportement post-fissuration.

Les fibres utilisées sont le plus souvent métalliques. Le dosage et les dimensions de fibres sont optimisés vis-à-vis du comportement en traction recherché et des conditions de mise en œuvre, avec ou sans vibration. Il est également possible de combiner des fibres de dimensions variables afin d'améliorer la résistance à la traction et la ductilité. En effet, les microfibrilles (fibres courtes) retardent le développement des microfissures tandis que les macrofibres (fibres longues) peuvent conférer au matériau une grande ductilité [9].

La Figure III.10, illustre le comportement en traction directe du BFUP en comparaison avec un BRF conventionnel. Dans le cas illustré, il est supposé que le BFUP contient suffisamment de fibres pour présenter un comportement écouissant ($> 2\%$ par volume) et que le BRF contient un volume limité en fibres ($< 1\%$ par volume).

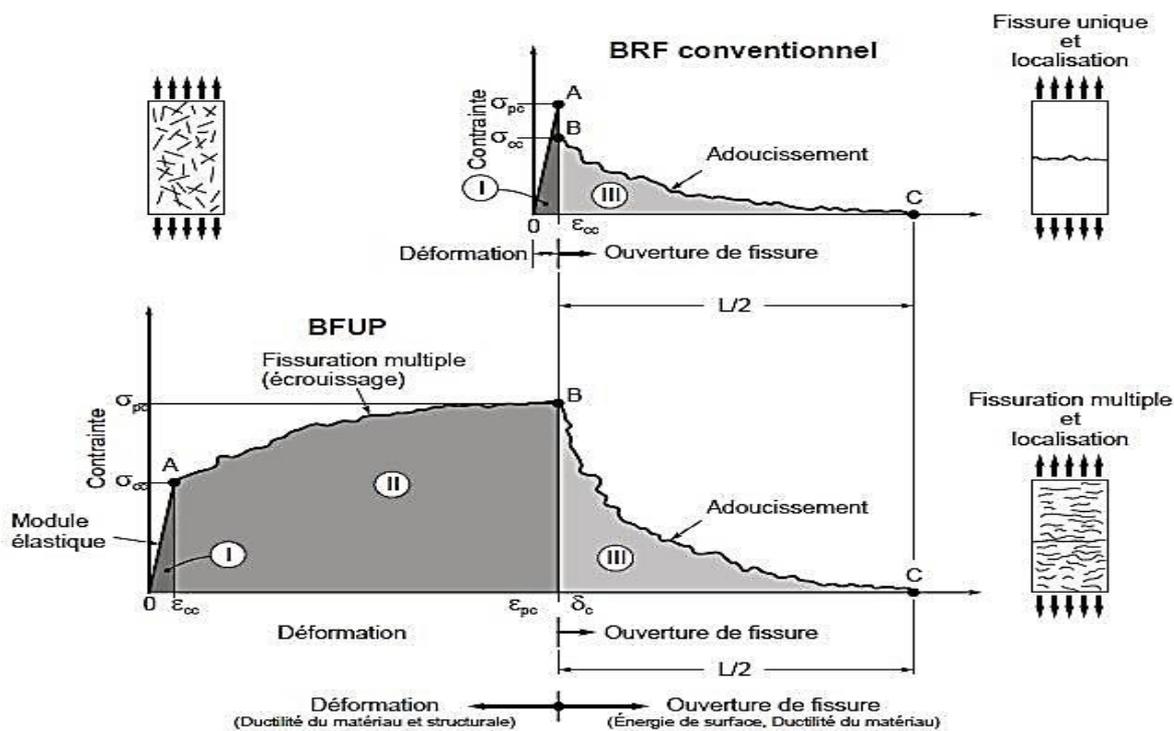


Figure III. 11: Comportement en traction directe.

Une différence majeure entre les deux matériaux, BRF et BFUP, au niveau du comportement en traction, est le patron de fissuration. Dans le cas d'un BRF conventionnel, la fissuration est unique et localisée tandis que pour un BFUP la fissuration est multiple avant de se localiser. La figure ci-dessus, divise le comportement en trois (3) phases distinctes, dont la deuxième n'est pas présente dans le comportement du BRF.

Phase I : Zone élastique où le module élastique gouverne la pente.

Phase II : Écrouissage du matériau en raison du pourcentage élevé de fibres qui engendrent de la multi-fissuration (non présent pour le BRF).

Phase III : Comportement adoucissant suite à la localisation de la fissuration en raison de la retenue engendrée par les fibres au sein de la matrice [36]

III.4.3 La résistance à la flexion

L'application du BFUP à des éléments en flexion résulte de ses propriétés en compression et en traction. Grâce à son comportement ductile en traction, les éléments fléchis minces en BFUHP ont un comportement structural ductile. Par contre les éléments de plus grande hauteur, dans lesquels les effets d'échelle sont prononcés, ont un comportement plus fragile.

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 fibre et un même type de fibres, Richard et al, 1995 montrent 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 [37].

III.4.3.1. Essai de flexion

Les essais les plus courants sont des essais de traction par flexion. Ils s'effectuent en général sur des éprouvettes prismatiques de côté a et de longueur $4a$, reposant sur deux appuis :

Soit sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre).

Soit sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges) [38]



Figure III. 12: Essai de flexion.

III.4.4. Module de Young

Cette caractéristique mécanique est aussi importante que les précédentes car elle conditionne la rigidité des structures. En comparant un béton blanc à des bétons de fibres, on

note une légère augmentation du module avec la teneur en fibres qui peut s'expliquer à l'aide de la loi des mélanges. Quant au béton de fibres optimisé, le sable induit une baisse de module par rapport au béton témoin [39].

III.4.5. Comportement à la fatigue

Le terme fatigue est généralement utilisé pour décrire la déformation et la rupture des matériaux sous chargement cyclique. L'endommagement des matériaux par fatigue provient du caractère cyclique des sollicitations qui leur sont appliquées. Ce dommage peut conduire à la ruine du composant ou de la structure elle-même lorsque son accumulation atteint une valeur critique qui est fonction du matériau. Cette notion d'endommagement par fatigue, même si elle est très ancienne, demeure aujourd'hui un domaine de préoccupation important en fatigue car sa modélisation reste parfois en décalage avec les observations expérimentales. Sans déformation plastique répétée, même de très faible amplitude, il n'y a pas de fatigue. La limite conventionnelle de fatigue à 10^7 cycles correspond à une amplitude de déformation cyclique de l'ordre de 10^{-5} . Une déformation plastique d'une telle amplitude, appliquée une seule fois, ne provoque pas une évolution considérable de la microstructure des matériaux. Par contre sa répétition prolongée entraîne un endommagement cumulatif résultant du mouvement irréversible des dislocations, qui peut conduire au bout du compte à la rupture. L'objectif d'une loi d'endommagement en fatigue est de fournir un outil de prévision de durée de vie pour des structures soumises à des sollicitations variables. Le dimensionnement d'une structure à la fatigue est plus difficile que pour les charges statiques, car les ruptures par fatigue dépendent fortement des contraintes locales [40].

III.4.6. Contrôle non-destructif

III.4.6.1. Contrôle par ultrasons

C'est un essai non destructif très important qui permet de détecter à la fois plusieurs caractéristiques du béton durci telles que: le degré de compacité, le taux de fissuration.

Le principe de la méthode des ultra-sons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton.

Mesure de la vitesse de son:

Trois méthodes peuvent être utilisées pour mesurer la vitesse de son :

- Mesure par la transmission indirecte ou de surface

- Mesure par la transmission semi direct
- Mesure par la transmission directe.

Cette dernière présente la meilleure méthode. Elle consiste à presser les deux têtes de mesure sur deux faces de l'éprouvette, en utilisant une pâte de contact qui facilite la transmission du son. La surface du béton doit être raisonnablement plane et bien nettoyée. Une fois l'appareil mis en marche, on peut lire le temps de propagation en microseconde.

La vitesse de propagation est donnée alors par l'équation suivante [41]:

$$V = d/t$$

V: vitesse de propagation en m/sec

d: distance entre les têtes en m.

t: temps en microseconde

Des travaux effectués montrent qu'il y a une relation directe entre la vitesse de propagation des ondes dans un béton et sa qualité. Le tableau III.1 donne un classement.

Tableau III. 2. La vitesse de propagation des ondes et la qualité du béton [41] :

Vitesse de propagation (m/s)	Qualité du béton
Supérieure à 4575	Excellente
3660 à 4575	Bonne
3050 à 3660	Douteuse
2135 à 3600	Mauvaise
Inférieure à 2135	Très mauvaise



Figure III. 13: Appareil d'ultrasons « Proceq ».

III.4.7. Le Retrait

Dans les BFUP, le retrait endogène de la matrice cimentaire est comme pour les BHP, suite au faible rapport eau/ciment qui conduit à un diamètre des pores réduit. Ce retrait endogène n'est pas gêné par le squelette granulaire, et la formation de microfissures est extrêmement faible.

Neville 1995 [42], 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, 1999 [43] 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. 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.

Loukili, 96 [44], a montré que le retrait endogène devient de nouveau faible pour les (BPR) avec de très faibles rapports E/L (0.15 à 0.09), présentant ainsi une relation inverse entre le retrait endogène et le rapport E/C et qui diffère de la tendance habituelle et couramment observée, voir Figure III.13.

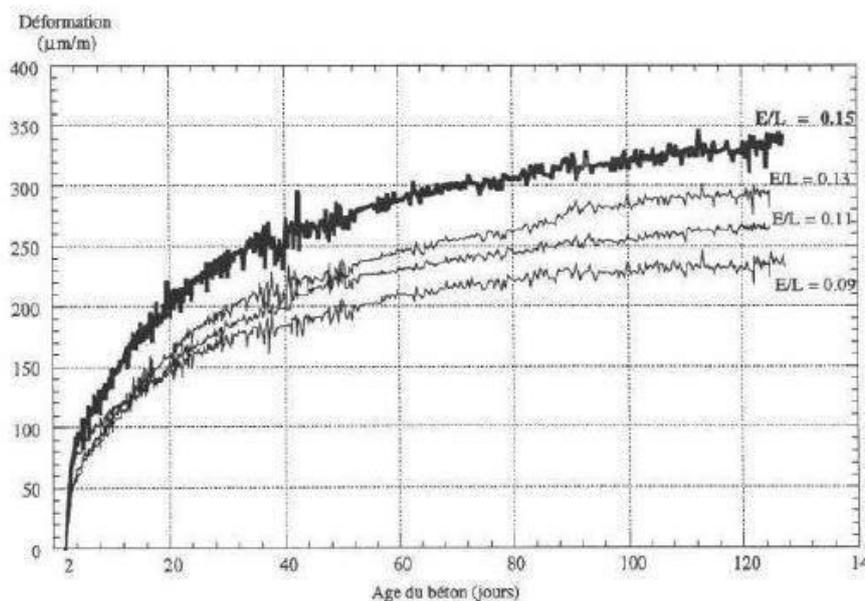


Figure III. 14: Influence du rapport E/L sur le retrait du BPR.

❖ Contrôle de la fissuration de retrait

Selon l'efficacité du type de fibres utilisé, il est possible de mieux contrôler et de diminuer le phénomène de fissuration et d'augmenter les propriétés mécaniques en post-fissuration. Pour optimiser le contrôle de la fissuration, les fibres doivent être distribuées de manière homogène dans le béton tout en ayant un dosage adéquat. L'utilisation de fibres aide donc à diminuer la fissuration causée par le retrait plastique.

Pour le béton durci, le retrait de séchage reste présent, mais les fissures sont mieux contrôlées. Les fissures sont donc plus minces, moins longues et mieux distribuées sur la surface totale de l'ouvrage. Elles peuvent même s'avérer invisibles à l'œil nu [45].

III.4.8. Le fluage

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, et la température.

Les BFUP présentent un fluage (déformation différée sous chargement permanent) plus faible que les bétons traditionnels (surtout avec des formulations à base de fumées de silice). La cinétique de fluage propre est très rapide (le fluage est accéléré et se manifeste dès les

jeunes âges du béton) et se stabilise plus vite. Le fluage de dessiccation est très faible. Le fluage est d'autant plus faible que la résistance en compression est plus élevée.

Alepari et al, 1997 [46] ont mesuré les déformations dues au fluage de BUHP traités à 90°C, d'une résistance de compression maximale de 160 MPa, et chargés à 7 jours. Sous une contrainte de 53 MPa, le fluage spécifique du BUHP est d'environ 35×10^{-6} MPa 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.

Selon Loukili, 96 [44], les bétons à ultra haute performance (CRC et BPR avec fibres) présentent un fluage spécifique deux fois plus grand que celui des bétons à très haute performance malgré leurs faibles rapports E/C. L'auteur attribue ceci au grand volume de pâte (58 % dans le cas du BPR et 48 % dans le cas du CRC contre un volume de 30 % dans le cas des bétons à hautes performances), voir Figure III.14.

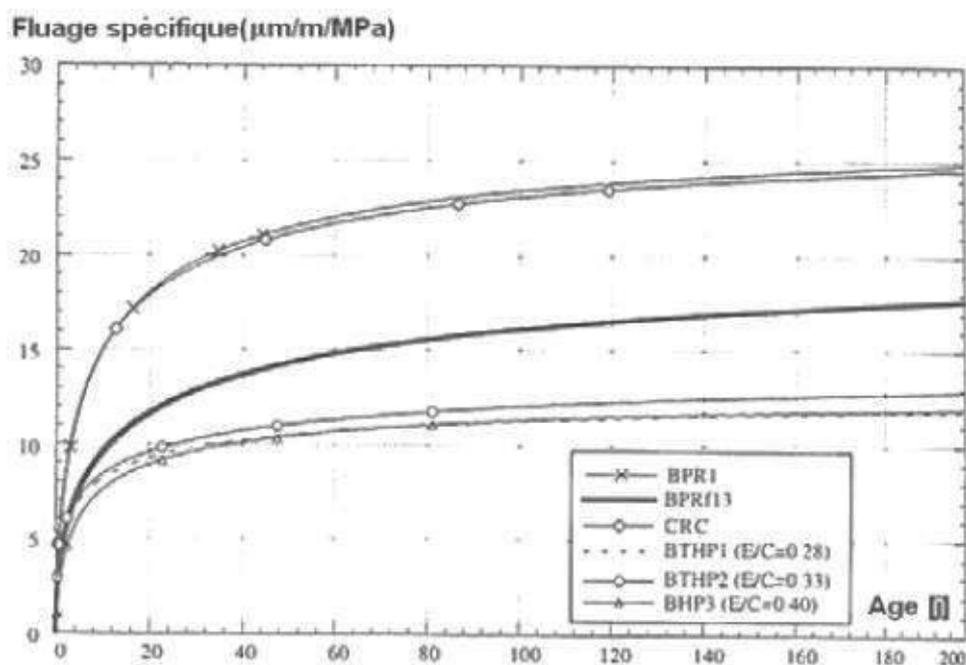


Figure III. 15: Comparaison du fluage spécifique des bétons à ultra hautes performances.

III.4.9. La porosité

La microstructure du BFUP est très dense grâce à la contribution des grains de ciment et de fumée de silice non hydratés au confinement de la structure poreuse « effet de filler actif » qui se traduit à l'échelle macroscopique par une augmentation des performances mécaniques du BFUP.

L'analyse au porosimètre à mercure élaborée par Loukili après 24 heures a montré l'absence de pores capillaires larges «dont le diamètre ≥ 50 nm », et un pic situé à 30 nm, indiquant que la porosité du CRC est principalement constituée à cet âge de pores formés dans les hydrates «dont le diamètre est compris entre 6 et 50 nm ». Pour les échantillons âgés de 7 jours, les mesures ont révélé une translation du pic de 30 nm à 20 nm, attribué à un confinement de la structure poreuse avec l'évolution de la réaction pouzzolanique. Au-delà de 7 jours l'analyse porosimétrique n'a pas décelé un changement de la structure poreuse [43].

Donc les bétons de très hautes performances se caractérisent par une structure poreuse mono-modale (un seul pic) comparativement aux bétons conventionnels caractérisés par une structure poreuse bi-modale, comme l'a montré l'analyse au porosimètre à mercure.

Enfin, les bétons à ultra haute performance sont caractérisés par une porosité totale très basse et non connectée. Par exemple les BPR traités thermiquement à 90°C sont quasi imperméables et peuvent présenter une très grande résistance à la pénétration d'ions de chlorures. Ceci peut être attribué à l'action de la fumée de silice au confinement de la structure poreuse de la matrice et sa contribution à la réaction pouzzolanique. A titre d'exemple la porosité totale du BPR est de 4 ± 1 [26].

La porosité totale d'un BFUP conservé dans l'eau peut être deux à trois fois plus grande que celle d'un BFUP traité thermiquement.

III.4.10. La Ductilité

Grâce aux renforcements de la matrice du BFUP aux fibres, notamment les fibres métalliques, le BFUP se caractérise par une ductilité et une grande capacité de déformation, et peut être exploité avantageusement dans les zones sismiques en permettant une grande déformation dans le cas de sections transversales réduites et une grande énergie d'absorption (comportement adoucissant) [47].

III.5. Caractéristiques Chimiques

III.5.1. Hydratation

Les BFUP sont caractérisés par une hydratation très faible comparativement aux bétons conventionnels qui peuvent atteindre un degré d'hydratation de 50 % en quelques jours, la réaction du ciment et la réaction pouzzolanique sont loin d'être complètes à cause du faible rapport E/L. Il est à noter que l'hydratation est rapide pendant les deux premières semaines [44].

A 28 jours, Loukili et coll. ont obtenu un degré d'hydratation égale à 57.5 % pour un CRC composé de 24 % de fumée de silice, sable fin de taille maximale de 4 mm avec un rapport E/C = 0.2, et estime que 377 kg/m³ de ciment reste non hydraté [43].

Morin a également estimé le degré d'hydratation à partir de la chaleur dégagée (mesures isothermes) d'un BPR avec un rapport E/C=0.21, il a obtenu un degré d'hydratation de 18% après 70 heures [48].

Par contre l'étude de Matte et coll. sur la matrice de BPR, en utilisant le modèle de NIST (modèle microstructural) a montré que 99 % de l'eau est consommée après 40 jours et qu'à partir de cette échéance, le processus d'hydratation s'est stabilisé. Le degré d'hydratation global obtenu avec ce modèle est de l'ordre de 41 % après 200 jours.

L'hydratation peut se poursuivre dans le temps en présence d'une source d'eau externe, tel qu'il a été observé par Matte & Moranville (1999), sur des échantillons conservés dans l'eau dé-ionisée pendant 6 mois, pour lesquels le degré d'hydratation par analyse d'image a atteint 94 [49].

III.5.2. Tenue aux Milieux Agressifs

Les BFUP sont parfaitement adaptés à l'environnement agressif grâce à leur très faible perméabilité (microstructure ultra-compacte), qui leur procure une meilleure résistance à la pénétration d'eau, de chlorures, de gaz et de substances chimiques nocives et donc une meilleure durabilité. Les BFUP peuvent donc être utilisés dans des halles industrielles, centrales nucléaires, conduites d'eau et d'eaux usées, plates-formes aéronautiques et structures militaires [50-51].

III.6. Durabilité

Le BFUP propose une densité telle que sa perméabilité et sa durabilité qui présentent des caractéristiques très supérieures à celles d'un béton ordinaire. A l'échelle microscopique, l'optimisation de l'empilement granulaire confère à la matrice cimentaire une parfaite compacité.

En plus d'une forte résistance à la compression, cette densité induit une porosité connectée nulle. Il est impossible pour tout élément chimique de traverser par capillarité les parois d'un BFUP.

Le BFUP est donc étanche. Il forme une barrière chimique à l'eau, aux embruns et à toutes agressions chimiques. Il est en cela extrêmement durable, sans besoin de maintenance, contrairement à l'acier.

La durée de vie des BFUP est supérieure à 100 ans [52].

Tableau III. 3. Indicateurs de durabilité des différents types de bétons :

Propriétés	Unités	C25/30	BHP	BFUP
porosité capillaire	ml/100g	20-25	12-20	0
porosité à l'eau	%	12-16	9-12	1-6
perméabilité à l'oxygène	10^{-19} m^2	1000-10000	100	<1 (granite)
profondeur de carbonatation	mm après 1 mois	10	2	<0.1
résistance à l'abrasion		4	2.8	1
diffusion des ions chlore	$10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$	2000	200	2
teneur en portlandite	Kg/m^3	76	86	0
résistance au cycle gel-dégel	g/m^2	1000	900	10

Son excellente étanchéité à l'air et à l'eau en font un matériau idéal pour l'éco-conception dans le secteur du bâtiment.

L'étanchéité à l'air et à l'eau permettent d'affiner les façades des bâtiments, mais aussi de réduire la descente de charges et des quantités de matériaux employés.

Cette possible diminution des épaisseurs des voiles de façade est également envisageable de par la possibilité de réduire les enrobages des éventuelles armatures du fait de son excellente durabilité et ductilité [53].

IV. Méthodologie et objectif du travail pratique

Notre étude pratique a pour but : la caractérisation rhéologique, physique et mécanique d'un béton fibré à ultra performances (BFUP) à base de fibres métalliques et déterminer l'effet de la pouzzolane comme substitue de la fumée de silice sur les caractéristiques de notre BFUP afin d'amortir le coût à la production.

Pour ce faire, le plan de travail que nous avons dressé est partagé en trois parties :

PREMIERE PARTIE : Caractérisation physique, chimique et mécanique des constituants de notre BFUP à savoir :

- Le ciment (CEM II/A-L52.5 N de LAFARGE M'sila).
- Le sable : -Le sable de Chelghoum El-Aid (0/3).
- Le sable de Boussaâda (0/1).
- Le gravier de bouzegza (3/8).
- La pouzzolane de Beni-saf.
- La fumée de silice (CONDENSIL S95 DP; SIKA).
- Les fibres métalliques (SIKA METAL FIBRES RL-45/50-BN).
- Le superplastifiant (SIKA VISCOCRETE TEMPO 12).
- L'eau de gâchage.

DEUXIEME PARTIE : Etude rhéologique de la matrice cimentaire.

TROISIEME PARTIE :

- ❖ Formulation des 4 compositions en utilisant la méthode expérimentale:

- ❖ la caractérisation physique et mécanique des différentes compositions et l'interprétation des résultats obtenus, l'effet des ajouts cimentaires et le rôle des fibres métalliques dans le béton.

- ❖ Conclusion générale et perspectives.

PREMIERE PARTIE**IV.1. Caractérisation physique, chimique et mécanique des constituants****IV.1.1. Le ciment CEM II/ A-L 52.5 N :**

Le ciment utilisé pour toutes les compositions est un ciment Portland composé CEM II/ A-L de classe 52.5 provenant de la cimenterie de LAFARGE située à M'sila.

Tableau IV. 1 . caractéristiques physiques du ciment CEM II/ A-L 52.5 N :

Désignations		Moyenne	Unités
Surface spécifique (SSB)		3891	cm ² /g
Masse spécifique		3.17	g/cm
Masse volumique		1050	Kg/m ³
Consistance normale		26	%
Temps de prise	Début de prise	130	Minutes
	Fin de prise	250	Minutes
Retrait à 28 jours		575	µm/m
Expansion « Le Chatelier »		0,30 – 2,50	Mm



Figure.IV. 1 : Détermination de la consistance normale avec l'appareil de Vicat (sonde).



Figure.IV. 2 : détermination du temps de prise avec l'appareil de Vicat (aiguille).

Tableau IV. 2 . La composition chimique du ciment CEM II/ A-L 52.5 N :

Composition	Teneur en %
Silice totale (SiO ₂)	20.55
Oxyde d'alumine (Al ₂ O ₃)	3.86
Oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	3.14
Chaux totale (CaO)	62.3
Magnésie (MgO)	1.52
Anhydride sulfurique (SO ₃)	2.30
Na ₂ O	0.19
K ₂ O	0.68
Perte au feu	20.5
CaO libre	1.388

Tableau IV. 3. Résultats analytiques intermédiaires :

Composition	Teneur en %
Anhydride carbonique(CO ₂)	4.93
Eau de constitution (H ₂ O)	0.12
Insolubles	1.20
Carbonates(CaCO ₃)	11.21

Tableau IV. 4. Composition minéralogique :

Composants	Teneur en %
Silicates tricalciques (C ₃ S)	60.77
Silicates bicalciques(C ₂ S)	13.16
Aluminate tricalcique (C ₃ A)	4.92
Alumino-ferrite tétracalcique(C ₄ AF)	9.55

Tableau IV. 5. Caractéristiques mécaniques du ciment CEM II / A-L 52.5 N :

Résistances (MPa)	Age	
	07 jours	28 jours
Flexion	6.8	7
Compression	34	45

Discussion :

Le ciment en question commercialisé par LAFARGE Algérie sous le nom de « SARIE » est supposé être de classe 52.5 c'est-à-dire que la résistance à la compression minimale garantie à 28 jours devrait être égale ou supérieure à 52.5 MPa. Mais l'essai de convenance a montré que le ciment appartient à une classe de résistance inférieure, c'est un 42.5.

Malgré l'avancée technologique en matière de production de ciment mais les cimenteries en Algérie ne maîtrisent pas encore parfaitement le produit (clinker) à la sortie du four.



Figure.IV. 3 : Essais de flexion et de compression sur mortier.

IV.1.2. Le sable :

Les sables utilisés sont, le sable grossier de Chelghoum El-Aid (0/3) et le sable fin de Boussaâda (0/1). Une série d'analyses permet de déterminer les propriétés physiques et granulométriques des sables.

IV.1.2.1. Le sable de Chelghoum El-Aid (0/3)

Tableau IV. 6. Caractéristiques physiques du sable de Chelghoum El-Aid.

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique apparente	1.51	g/cm ³
Masse volumique absolue	2.7	g/cm ³
Teneur en eau	0.26	%
Equivalent de sable NF EN 933-8	82	%
Absorption	0.7	%



Figure.IV. 4 : Détermination de l'équivalent de sable.

Remarque :

Après l'essai de l'équivalent de sable, on a constaté qu'il s'agit d'un sable très propre ($ES \geq 70$) donc il convient très bien pour la composition de notre BFUP.

Tableau IV. 7. Analyse granulométrique par tamisage du sable de Chelghoum El Aid (0/3) :

Ouverture des tamis	Masses (g)		Teneurs (%)			Mf
	Refus	Refus cumulé	Refus	Refus Cumulé	Tamisât	
5	0	0	0	0	100	3.03
2.5	291.75	291.75	29.175	29.175	70.825	
1.25	233.30	525.05	23.330	52.505	47.495	
0.63	135.80	660.85	13.580	66.085	33.915	
0.315	79.57	740.42	7.957	74.042	25.958	
0.16	81.25	821.67	8.125	82.167	17.833	
Fond tamis	4.75	826.42	0.475	82.642	0	

$$Mf = \frac{\sum \text{Refus des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5}{100}$$

$$Mf = \frac{29.175 + 52.505 + 66.085 + 74.042 + 82.167}{100} = 3.03$$

Remarque:

On remarque que le sable de Chelghoum El-Aid a un module de finesse élevé (3.03), d'où la nécessité d'ajouter un sable correcteur (Sable de Boussaâda).

IV.1.2.2. Le sable de Boussaâda (0/1)**Tableau IV. 8.** Caractéristiques physiques du sable de Boussaâda :

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique apparente	1.45	g/cm ³
Masse volumique absolue	2.64	g/cm ³
Teneur en eau	0.78	%
Equivalent de sable NF EN 933-8	93	%
Absorption	0.25	%

Tableau IV. 9. La composition chimique du sable de Boussaâda (0/1) :

Composition chimique	Teneurs en %
SiO ₂	96.45
Al ₂ O ₃	1.37
K ₂ O	0.736
Na ₂ O	0.12
MgO	0.08
CaO	0.43
Ti ₂ O ₃	0.07
SO ₃	0.15
Fe ₂ O ₃	0.29
P ₂ O ₅	0.009
Perte au feu	0.295

Remarque :

On remarque que ce sable est très siliceux et contient un % important de silice (SiO₂), donc c'est un sable très adéquat pour la confection de tous les types des bétons et spécialement ceux de hautes performances comme les BFUP.

Tableau IV. 100. Analyse granulométrique par tamisage du sable de Boussaâda (0/1) :

Ouverture des tamis	Masses (g)		Teneurs (%)			Mf
	Refus	Refus Cumulé	Refus	Refus Cumulé	Tamisât	
1.25	0	0	0	0	100	1.83
0.63	0.15	0.15	0.015	0.015	99.985	
0.315	23.03	23.18	2.303	2.318	97.682	
0.16	804.34	827.52	80.434	82.752	17.248	
0.063	153.60	981.12	15.360	98.112	1.888	
Fond de tamis	2.93	984.05	0.293	98.405	0	

Remarque :

- Le module de finesse est calculé par la relation suivante :

$$Mf = \frac{\sum \text{Refus des tamis } 0.063, 0.16, 0.315, 0.63}{100}$$

$$Mf = \frac{98.112 + 82.752 + 2.318 + 0.015}{100} = 1.83$$

Correction du sable de Chelghoum El-Aid (0/3) par le sable de Boussaâda (0/1)

la correction du sable se fait par la méthode d'Abrams suivante :

le module de finesse désiré est $Mfx = 2.55$ ($Mf1 = 3.03$ et $Mf2 = 1.83$)

$$S1 = \frac{Mfx - Mf2}{Mf1 - Mf2} \times 100 \%$$

$$S1 = \frac{2.55 - 1.83}{3.03 - 1.83} \times 100 \% = 60 \% \text{ de sable grossier dont le module de finesse est de } 3.03.$$

$$S2 = \frac{Mf1 - Mfx}{Mf1 - Mf2} \times 100 \%$$

$$S2 = \frac{3.03 - 2.55}{3.03 - 1.83} \times 100 \% = 40 \% \text{ de sable fin de module de finesse } 1.83$$

Tableau IV. 11. Pourcentage de tamisât calculé du sable corrigé :

Ouverture des tamis	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	0.063	Fond tamis
Tamisât (%)	100	82.4	68.4	60.2	54.5	17.6	0.7	0

IV.1.3. Les gravillons

La fraction granulaire utilisée est la 3/8 mm de Bouzegza

Tableau IV. 12. Caractéristiques physiques des gravillons (3/8) de Bouzegza :

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique apparente	1.49	g/cm ³
Masse volumique absolue	2.76	g/cm ³
Teneur en eau	1.125	%
Absorption NF EN 1097-6	1.002	%

Caractéristiques mécaniques des gravillons 3/8 de Bouzegza

Du point de vue de la résistance mécanique, une roche peut être caractérisée comme un béton et avec les mêmes aléas, par sa résistance à la compression et à la traction, par son module de Young... etc. Ces caractéristiques ne sont pas déterminables sur un granulat, aussi a-t-on recours à des essais qui tentent d'imiter les sollicitations que subit un granulat dans un ouvrage.

- **Essai Los Angeles selon la norme NF P 18 – 573 1990**

Cet essai estime la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Il se pratique sur les classes granulaires 4/6,3 ou 6,3/10 ou 10/14 comme le micro Deval. On place un échantillon de 5 kg de granulat et 7 à 11 boulets de 417 g dans un tambour dont une génératrice intérieure est munie d'une plaque. Lorsque le tambour tourne, le granulat et les boulets s'accumulent sur la plaque pendant une fraction de tour et retombent ensuite. Le nombre de tours et la vitesse sont précisés par le mode opératoire.

On récupère ensuite le passant P au tamis de 1,6 mm. Le coefficient Los Angeles est:

$$LA = 100 \times \frac{P}{5000}$$

Le coefficient Los Angeles est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon.



Figure.IV. 5 : Machine d'abrasion Los Angeles.

- **Essai micro-Deval selon la norme NF P 18 – 572 1990**

Essai micro-Deval est une variante qui se pratique sur des gravillons 4/6,3 ou 6,3/10 ou 10/14. 500g de gravillon sont placés avec une charge de 2 à 5 kg de billes d'acier de 10 mm de diamètre dans une Jarre cylindrique remplie d'eau. On fait tourner 15 minutes et on récupère le passant au tamis de 2 mm P. Le coefficient micro-Deval est:

$$MD = 100 \times \frac{P}{500}$$

Le coefficient micro-Deval est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon. La corrélation statistique entre coefficients Deval et micro-Deval est : $D \times MD = 80$



Figure.IV. 6 : Machine d'abrasion Micro-Deval.

Tableau IV. 13. Résistances mécaniques de quelques roches utilisées comme granulats :

Nature	Micro-Deval en présence d'eau	Coef. Deval	Coef. Los Angeles
Microgranite	5 à 10	10 à 28	15 à 25
Granite	10 à 15	13 à 22	15 à 20
Diorite	8 à 25	10 à 20	10 à 30
Basalte	5 à 25	14 à 23	18 à 28
calcaire	15 à 80	7 à 15	20 à 80

Tableau IV. 14. Essais de caractérisation mécanique des gravillons (3/8) de Bouzegza :

Caractéristiques	Résultats	Unités
Coefficient Micro-Deval	8.6	%
Coefficient Los Angeles	21.14	%

Remarque :

Les essais Micro-Deval et Los Angeles nous renseignent sur la qualité de la roche mais surtout sur la qualité de concassage. On constate que la fraction 3/8 utilisée a de bonnes caractéristiques mécaniques. De ce fait on a sélectionné ces gravillons pour figurer dans la formulation de BFUP.

Tableau IV. 15. Analyse granulométrique par tamisage des gravillons 3/8 de Bouzegza :

Ouverture des tamis	Masses (g)		Teneurs (%)		
	Refus	Refus Cumulé	Refus	Refus Cumulé	Tamisât
10	0	0	0	0	100
8	24.28	24.28	1.51	1.51	98.49
6.3	426.38	450.66	26.64	28.15	71.85
5	400.30	850.96	25.02	53.17	46.83
2.5	662.49	1513.45	41.40	94.57	5.43
1.25	44.55	1558	2.78	97.35	2.65
Fond tamis	19.14	1577.14	1.19	98.54	0

Analyse granulométrique par tamisage NF EN 933-1
ENR. N° 0160/13

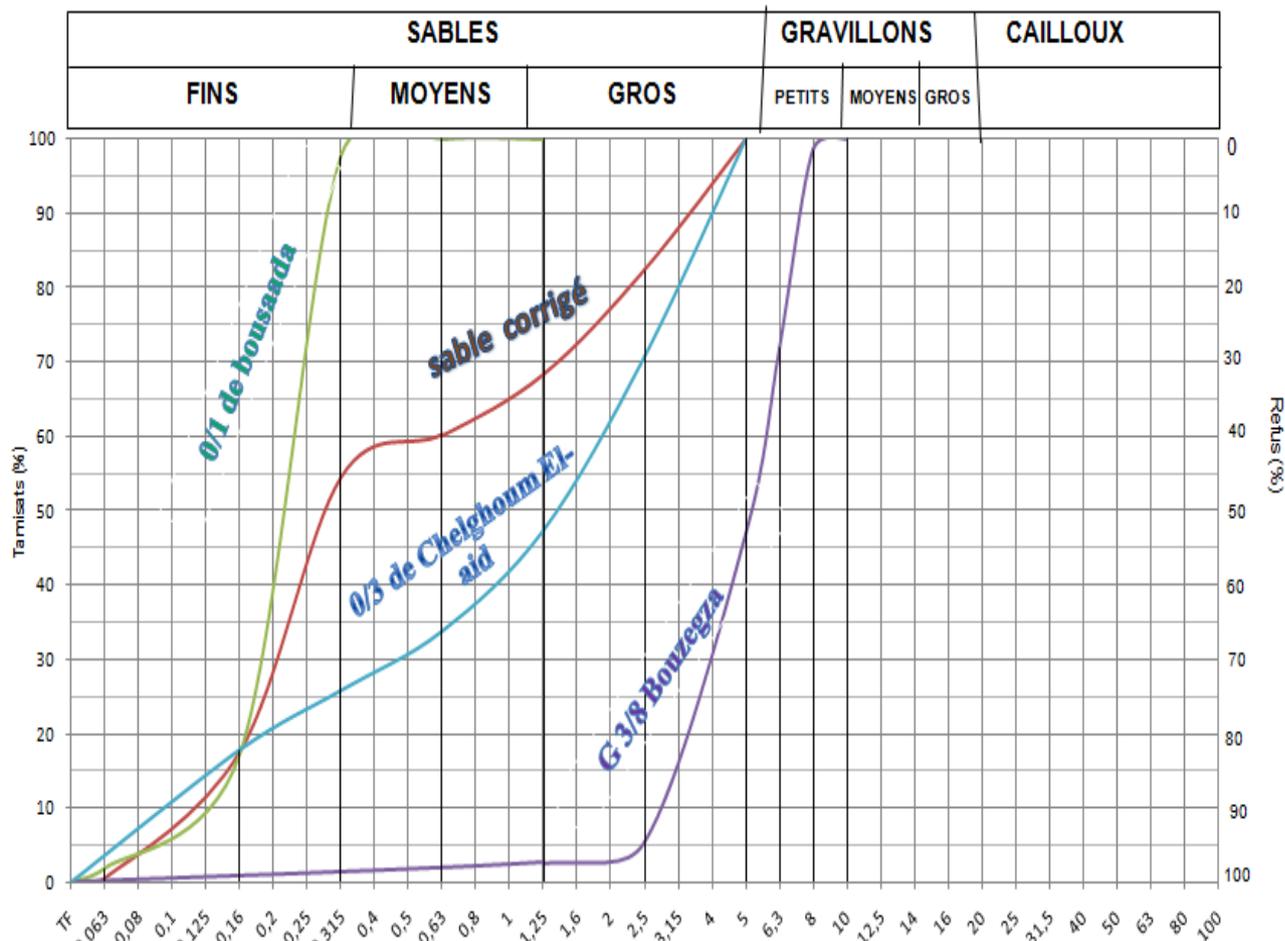


Figure.IV. 7 : Courbe d'analyse granulométrique par tamisage.

IV.1.4. La pouzzolane :

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle de couleur rouge qui provient de la carrière de Beni-Saf située à l'ouest de l'Algérie. Avant de l'utiliser comme ajout pour la confection de notre BFUP, il faut qu'elle soit d'une très grande finesse, pour cela nous l'avons broyé au moyen d'un broyeur à boulets.

Tout d'abord, il faut que les cailloux introduits dans le broyeur soient de petites dimensions, et pour faciliter le broyage, on procède au concassage.

Le type de concasseur utilisé est un concasseur à mâchoire.

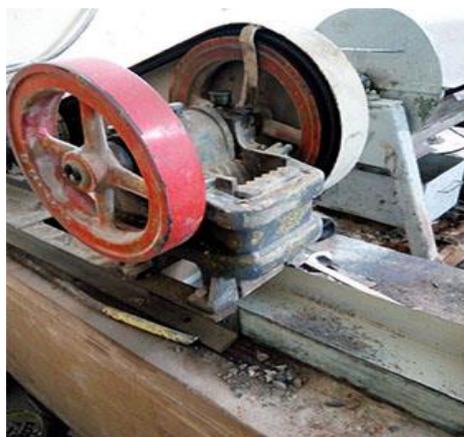


Figure.IV. 8 : Concassage des grands cailloux.

Figure.IV. 9 : Concasseur à mâchoire.

Après le concassage des grands cailloux, on introduit une quantité environ 05 kg dans le broyeur, mais avant de faire ça, il faut que la pouzzolane soit sèche, pour éviter le colmatage de la poudre sur les parois intérieures du broyeur, si elle ne l'est pas on va la sécher à l'aide d'une étuve à une température de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$.



Figure.IV. 10 : Etuve de séchage.

Une fois la pouzzolane complètement sèche, elle est introduite dans le broyeur et on procède au broyage pendant 50 minutes environ.



Figure.IV. 11 : Broyeur à boulets.

Lorsque le broyage est terminé, on récupère la pouzzolane broyée.



Figure.IV. 12 : Pouzzolane naturelle broyée.

L'analyse chimique à été faite au niveau du laboratoire central des travaux publics

Tableau IV. 16. La composition chimique de la pouzzolane :

Composition	Teneurs en %
SiO ₂	55.50
CaCO ₃	34.48
Perte au feu	20.05
R ₂ O ₃ (Fe ou Al)	4.05
Sulfates (CaSO ₄ .2H ₂ O)	Traces
Anhydride carbonique (CO ₂)	15.18

Chlorures (NaCl)	0.58
Eau de constitution (H ₂ O)	4.87

Remarque :

On remarque que la pouzzolane contient un pourcentage important de silice qui pourra être bénéfique pour les résistances mécaniques des bétons, on note aussi que le pourcentage de la perte au feu est relativement élevé (20.05 %), ce qui révèle la présence de matière organique qui pourrait être dangereuse pour le béton si il est exposé à de hautes températures ($\geq 100^{\circ}\text{C}$).

Tableau IV. 17. Caractéristiques physiques de la pouzzolane :

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique absolue	2.66	g /cm ³
Surface spécifique (SSB) NF EN 196-6	8156	cm ² /g

IV.1.5. La fumée de silice**Présentation :**

La fumée de silice utilisée est «CONDENSIL S95 DP » de Sika. C'est une silice ultra fine issue de l'industrie de la fabrication du silicium ou des alliages à base de silicium.

Caractéristiques :

- Couleur : grise
- Conditionnement : Vrac – Big Bags de 1 tonne
- Stockage : dans un local à l'abri de l'humidité
- Conservation : dans son emballage d'origine intact, le produit se conserve 3 ans.

Données techniques (fiche technique donnée par Sika)

Tableau IV. 18. Données techniques de la fumée de silice :

Caractéristiques	Résultats	Unités
Densité apparente	0.65 ± 0.10	/
Densité réelle (hélium)	2.24	/
Teneur en SiO ₂	95 (≥ 92)	%
Teneur en Na ₂ O éq.	0.60 (≤ 1.0)	%
Teneur en SiC	1.50 (≤ 3.0)	%
Teneur en C libre	1.50 (≤ 3.0)	%
Teneur en S total	0.10 (≤ 0.20)	%
Surface spécifique BET	23 (20 à 26)	(m ² /g)
Teneur en oxydes (Fe, Al, Mg, Ca)	1.00 (≤ 1.50)	%
Teneur en Cl-	0.06 (≤ 0.20)	%

❖ **Composition chimique** (analyse chimique donnée par LCTP)

Tableau IV. 19. La composition chimique de la fumée de silice :

Composition	Teneurs en %
SiO ₂	85.66
CaCO ₃	8.62
Perte au feu	4.93
Fe ₂ O ₃ ou Al ₂ O ₃	3.90
CaSO ₄ .2H ₂ O	Traces
CO ₂	3.79
NaCl	0.23
H ₂ O	1.14



Figure.IV. 13 : La fumée de silice.

Conditions d'applications

- **Dosage** : Le dosage habituel est de 5 à 10% du poids du ciment.
- **Mise en œuvre** : La fumée de silice CONDENSIL S95 DP doit être introduite avec le ciment.

Afin de tirer toutes les performances de la fumée de silice CONDENSIL S95 DP, il est indispensable de défloculer complètement les microparticules de silice. Pour cela, la fumée de silice CONDENSIL S95 DP doit être systématiquement associée avec un superplastifiant/haut réducteur d'eau de type SIKA VISCOCRETE.

- **Précautions d'emploi** : La fumée de silice CONDENSIL S95 DP étant un produit pulvérulent, l'emploi d'un masque est préconisé lors de son utilisation.

IV.1.6. Les fibres métalliques

Présentation :

Les fibres métalliques utilisées SIKA[®] METAL FIBRES RL-45/50-BN, sont fabriqués à partir de fil d'acier tréfilé. Dont la fabrication est certifié ISO 9001. Elles sont libres non encollées.



Figure.IV. 14 : Les fibres métalliques.

Caractéristiques :

Les principales caractéristiques dimensionnelles et physiques sont les suivantes :

Nature	Fil clair d'acier tréfilé sans revêtement
Longueur (mm)	50
Diamètre (mm)	1.05
Nombre de fibres par kg	2800
Type d'ancrage	fibre avec 2 crochets aux extrémités
Masse volumique absolue (g/cm^3)	7.8

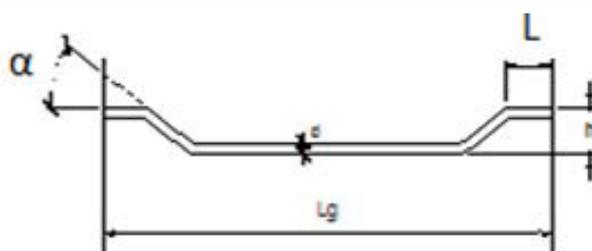


Figure.IV. 15 : Schéma d'une fibre métallique.

- Facteur d'élanement : $48 = L/d = 50/1.05$
- Angle du crochet : $\alpha \geq 20^\circ$
- Résistance à la traction du fil : 1000 MPa

Conservation : Protéger les palettes de la pluie.

Précautions d'emploi : Lors de l'ouverture des sacs ou la manipulation des sacs ouverts, il est conseillé de porter des gants.

IV.1.7. Le superplastifiant

Le superplastifiant utilisé SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

Domaines d'application :

- Fabrication de bétons plastiques à autoplacants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplacants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

Caractères généraux :

- longue rhéologie (>2h),
- robustesse à la ségrégation,
- qualité de parement.

Caractéristiques techniques :

- Aspect et couleur : Liquide brun clair
- Densité : $1,06 \pm 0,01$
- PH : 6 ± 1
- Teneur en Na_2O eq. : $\leq 1\%$
- Extrait sec : $30,2 \pm 1,3 \%$
- Teneurs en ions Cl^- : $\leq 0.1 \%$

Dosage : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Mise en œuvre : SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

IV.1.8. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour la confection de notre BFUP est l'eau potable du LCTP (Hussein-dey, ALGER).

DEUXIEME PARTIE :**IV.2. Etude rhéologique de la pâte de ciment :**

La caractérisation rhéologique de la matrice cimentaire et la détermination du point de saturation en superplastifiant est faite à l'aide d'un rhéomètre au niveau de l'unité de recherche UR-MPE, de la FSI de Boumerdès.



Figure.IV. 16 : Rhéomètre AR2000.

Détermination du point de saturation (Sika Tempo 12 - CEM II 52.5) :

Les BFUP se caractérisent par un faible rapport E/C ce qui va causer une grande perte de maniabilité de la pâte liante, et influera par conséquent sur l'ouvrabilité du béton. D'autre part, les BFUP sont mis en œuvre avec une consistance fluide ($\text{slump} > 20 \text{ cm}$), c'est pour cela que l'ajout d'un adjuvant superplastifiant est nécessaire.

La détermination du point de saturation du superplastifiant a pour objectif de trouver le juste dosage qui permettra de fournir le meilleur rendement en terme de fluidification de la matrice cimentaire avec un pourcentage minimale de l'adjuvant, au-delà duquel le rajout d'adjuvants supplémentaire n'aura plus d'effet fluidifiant.

But de l'essai :

Cet essai consiste à voir l'influence de polycarboxylates (Tempo 12) sur le comportement rhéologique de la pâte de ciment

IV.2.1 Préparation des mélanges :

Partant du fait que la plage d'utilisation du superplastifiant recommandée par le fabricant varie de 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées, nous avons préparé deux mélanges.

La composition de ces différentes pâtes est donnée dans le tableau suivant :

Tableau IV. 20. Composition de la pâte de ciment :

Désignation	Mélange -1- 10 % Pz	Mélange -2- 10 % FS
Eau (ml)	35.00	35.00
Ciment (g)	100.00	100.00
Fumée de silice (g)	/	10
Pouzzolane (g)	10	/
Superplastifiant (%)	0.5 1.0 1.5 2 2.5 3	0.5 1.0 1.5 2 2.5 3



Figure.IV. 17 : Préparation des mélanges.

Les résultats sont exprimés dans les figures suivantes :

Mélange 1 :

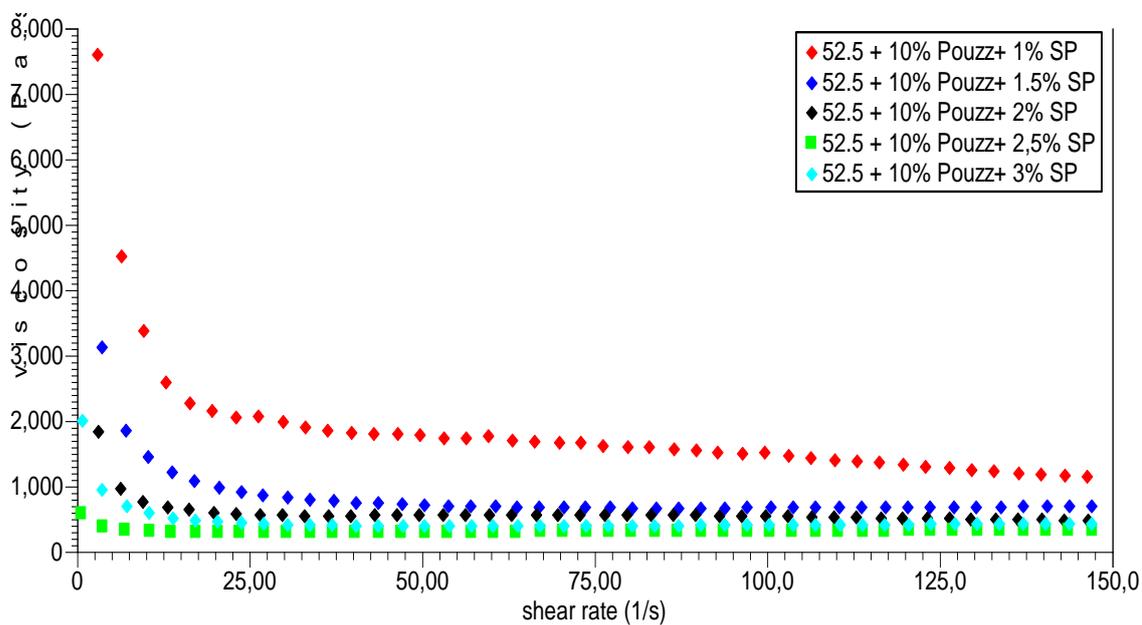


Figure.IV. 18 : La variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement à différentes teneurs de superplastifiant (Tempo12) avec 10 % de pouzzolane.

Discussion et interprétation des résultats :

On remarque que plus le pourcentage de superplastifiant augmente plus la viscosité diminue jusqu'au point de saturation où le superplastifiant n'a aucun effet sur la viscosité. D'après le graphe, la viscosité de la pâte (C+Pz+SP) commence à se stabiliser à partir de (2.5%). Cette performance rhéologique est obtenue grâce à la longueur de la chaîne principale ainsi que son greffage par des chaînes latérales non absorbantes et qui se prolongent dans la solution lorsque le polymère s'adsorbe (polycarboxylates).

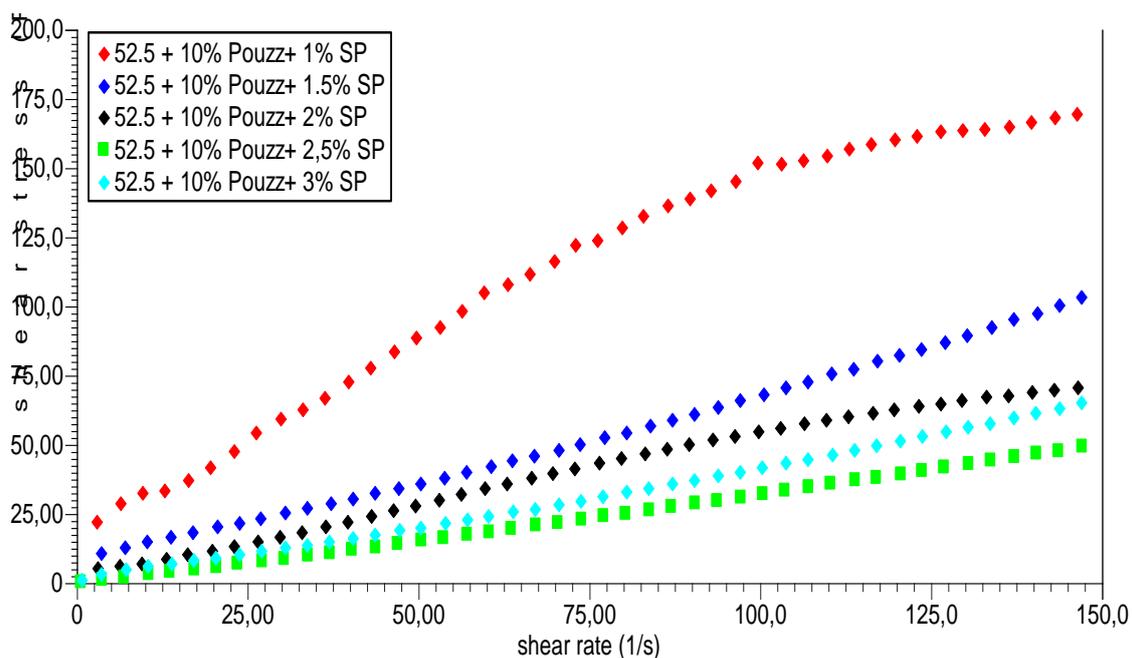


Figure.IV. 19 : La variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement à différentes teneurs en super plastifiant (Tempo12) avec 10 % de pouzzolane.

Interprétation des résultats :

D'après cette figure nous avons constaté une augmentation de l'écoulement de la pâte en fonction du pourcentage de superplastifiant, ceci s'explique par l'effet défloculant du polycarboxylate qui enrobe les grains de ciments et les éloigne les uns des autres.

Mélange 2 :

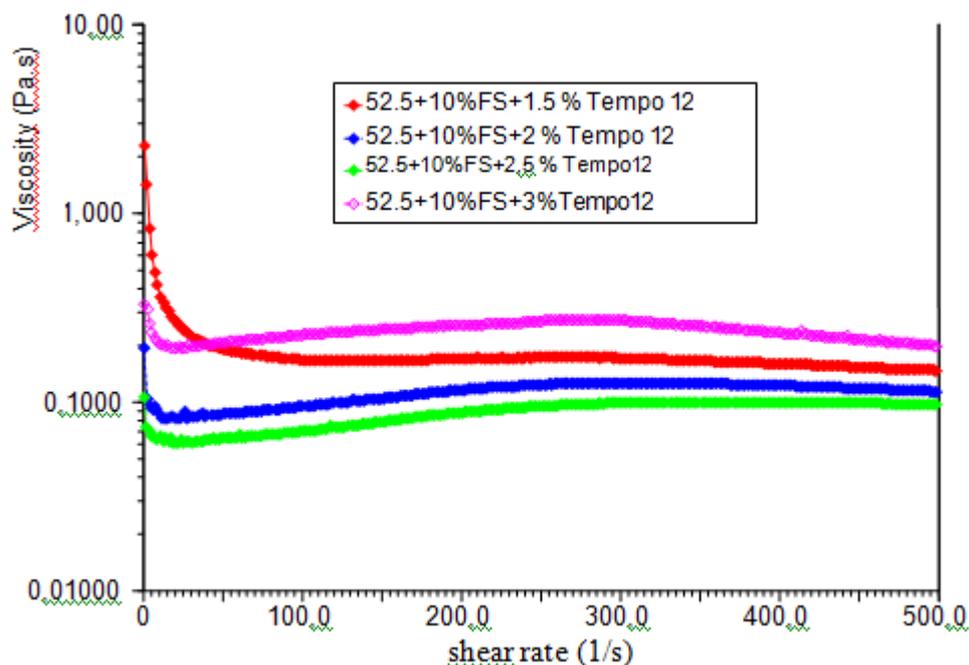


Figure.IV. 20 : La variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement à différentes teneurs en superplastifiant (Tempo12) avec 10 % de fumée de silice.

Discussion et interprétation des résultats :

On remarque que plus le pourcentage de superplastifiant augmente, plus la viscosité diminue jusqu'au point de saturation où le superplastifiant n'a aucun effet sur la viscosité.

D'après le graphe la viscosité de la pâte (C+10%Fs+Sp) se stabilise avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement, par cette stabilité on peut dire que la pâte est saturée par une teneur de 2.5 % et on prend ce dosage comme point de saturation de cet adjuvant.

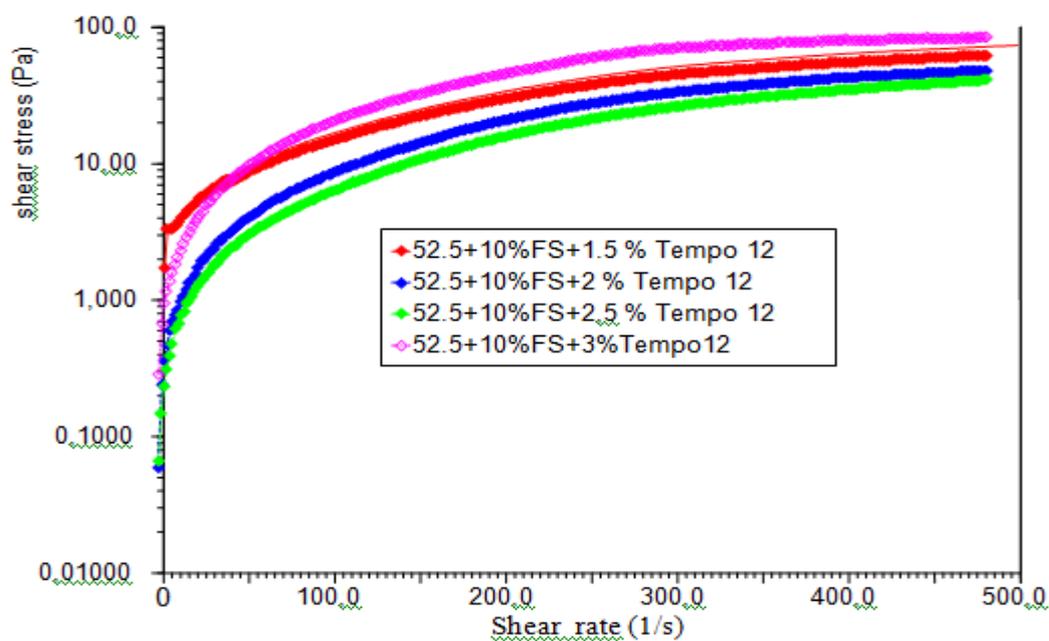


Figure.IV. 21 : Evolution de la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement à différentes teneurs en superplastifiant (Tempo 12) avec 10 % de fumée de silice.

Interprétation des résultats :

D'après cette figure on voit que plus la teneur en superplastifiant augmente, plus le seuil de cisaillement diminue jusqu'au point de saturation.

Le dosage en superplastifiant de 2.5% entraîne une diminution importante du seuil qui favorise l'écoulement de la pâte.

TROISIEME PARTIE :**IV.3. Formulation des compositions :**

Dans cette partie, on va procéder à l'élaboration de notre BFUP en caractérisant chaque composition à l'état frais et à l'état durci.

La formulation des BFUP n'est pas basée sur une méthode de formulation connue comme celles des bétons ordinaires, elle est basée sur l'expérimentation et le respect du principe de la formulation cité dans le chapitre II de la partie théorique.

La mise au point de cette formulation du BFUP consiste à déterminer la quantité de chaque ingrédient de manière à répondre aux trois principes essentiels qui sont :

1. La diminution de la porosité avec l'incorporation des ultrafines
2. Optimisation du squelette granulaire
3. Un faible rapport E/C

IV.3.1. Préparation des moules :

Les moules prismatiques et cubiques ont été fabriqués au laboratoire central des travaux publics en utilisant un bois traité qui n'absorbe pas beaucoup d'eau.

Les moules prismatiques ont des dimensions de 70 x 70 x 280 mm, et les cubiques ont des dimensions de 70 x 70 x 70 mm. Pour la fabrication des moules cubiques on a utilisé des moules prismatiques et on les a séparé avec des carreaux en bois fixés à l'aide d'agrafes afin de faciliter le démoulage, la figure IV.22 montre la fabrication de ces moules.



Figure.IV. 22 : Fabrication des moules cubiques.

IV.3.2. Formulation des différents bétons :

Dans notre travail, on a opté pour la méthode expérimentale suivante pour formuler nos compositions :

Tableau IV. 21. Composition des mélanges :

	BP	BFS	BP+F	BFS+F
Ciment (Kg/m ³)	1000	1000	1000	1000
Sable (Kg/m ³)	800	800	800	800
Gravier 3/8 (Kg/m ³)	400	400	400	400
Addition (Kg/m ³)	100	100	100	100
Eau (Kg / m ³)	240	240	240	240
E/C	0.24	0.24	0.24	0.24
E/L	0.22	0.22	0.22	0.22
Superplastifiant% (PPC)	2.5	2.5	2.5	2.5
Fibres métalliques(% Vol)	/	/	1.9	1.9

Nomenclature :

PPC : Par poids du ciment.

BP : Béton ultra hautes performances avec 10 % d'addition de pouzzolane.

BFS : Béton ultra hautes performances avec 10 % d'addition de fumée de silice.

BP+F : Béton fibré ultra hautes performances avec 10 % d'addition de pouzzolane + Fibres métalliques.

BFS+F : Béton fibré ultra hautes performances avec 10 % d'addition de fumée de silice + Fibres métalliques.

IV.3.3. Confection des éprouvettes :

Pour la confection des gâchés, nous avons utilisé plusieurs équipement et fournitures courants afin d'avoir un composant bien homogène (malaxeur, balance, récipient, spatules, truelles, huiles de coffrage..)

IV.3.3. La procédure de malaxage :

Le malaxage se déroule en quatre étapes :

Etape 1 : On commence par un mélange à sec afin de garantir une répartition plus ou moins homogène des différents constituants.

Etape 2 : On verse $2/3$ de l'eau de gâchage pendant 3 minutes avec un malaxeur toujours en marche.

Etape 3 : On ajoute progressivement le $1/3$ d'eau restant, mélangé avec le superplastifiant afin d'assurer une bonne dispersion de l'adjuvant, et on laisse tourner pendant 5 minutes.

Etape 4 : la dernière étape consiste à ajouter les fibres, cette opération se fait manuellement et d'une manière progressive afin d'éviter la formation d'oursins

Tableau IV. 22. Procédure de malaxage :

Ingrédient	Temps (min)
Prémix	1
Eau	3
Superplastifiant	5
Fibres	3
Total	12

Le malaxage a été effectué suivant les indications données par Eiffage dans le tableau IV.22 la précision de dosage des ingrédients ainsi que la puissance de malaxage sont deux paramètres essentiels pour l'obtention de propriétés rhéologiques et mécaniques désirées.



Figure.IV. 23 : Malaxeur.



Figure.IV. 24 : Mélange à sec.

IV.3.4. Caractérisation des différentes compositions

- À l'état frais :

La plupart des formulations des bétons fluides sont conçues actuellement de manière empirique et cependant on doit concilier deux caractéristiques a priori contradictoires la fluidité et la ségrégation. Par conséquent ces bétons doivent satisfaire plusieurs tests qui sont recommandés par l'AFGC, qui permettent de caractériser les principales propriétés du béton à l'état frais comme il est indiqué dans le tableau suivant :

Tableau IV. 23. caractéristiques des bétons fluides à l'etat frais :

Caractéristiques	Méthode d'essai (s)
Fluidité	<i>Etalement au cône d'Abrams</i>
Viscosité (évaluée par le taux d'écoulement)	<i>L'essai d'étalement ou Ecoulement en V-Funnel</i>
Capacité de remplissage	<i>Boite en L</i>
Ségrégation statique	<i>Stabilité au tamis</i>

IV.3.4.1. Mesure de l'affaissement selon la norme NF EN 12350-2, 2012 :

Dans la pratique industrielle, les mesures d'affaissement au cône d'Abrams, ou d'écoulement dans la boîte en L, sont utilisées pour caractériser le comportement des bétons fluides à la sortie du malaxeur. Ces essais ne permettent cependant pas de rendre compte de manière complète et précise de la rhéologie du béton à l'état frais.



Figure.IV. 25 : Mesure de l'affaissement avec cône d'Abrams.

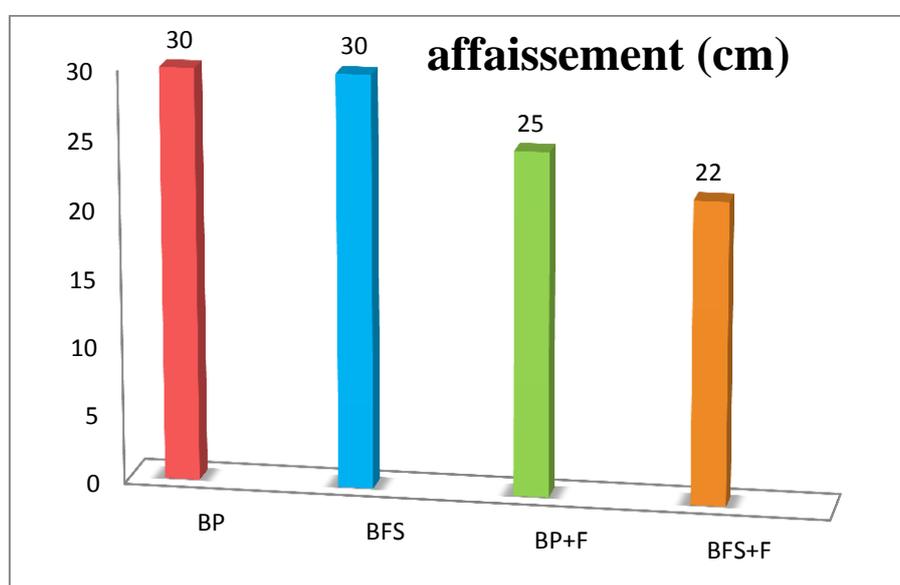


Figure.IV. 26 : Histogramme de mesure de l'affaissement.

Discussion et interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenus on peut constater que :

- L'affaissement des bétons sans fibres est total à cause de l'effet fluidifiant de l'adjuvant et l'absence de fibres qui influent sur les caractéristiques physiques (maniabilité et ouvrabilité) du béton. On parle alors d'étalement.
- Les bétons fibrés : le béton avec de la fumée de silice, présente un affaissement inférieur à celui avec de la pouzzolane d'une part à cause de la présence de fibres qui influent considérablement sur la fluidité du béton, d'autre part cela est due à la très grande finesse de la fumée de silice qui a un grand besoin en eau de part sa grande surface spécifique.

- Avec un affaissement ≥ 22 cm nos bétons sont de classe S5 « très fluide » selon la norme NF EN 206-1 qui définit cinq classes de consistance.

Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams – norme NF EN 206-1		
Classe	Consistance du béton	Affaissement (en mm) au cône d'Abrams
S1	Ferme	10 - 40
S2	Plastique	50 - 90
S3	Très plastique	100 - 150
S4	Fluide	160 - 210
S5	Très fluide	≥ 220

- les BFUP présentent un comportement rhéologique de type Binghamien et que les propriétés rhéologiques diminuent dans le temps dès la fin de malaxage. On a également observé le caractère thixotropique de ce matériau qui traduit le fait que si, après un long temps de repos, une vitesse de cisaillement est brusquement appliquée puis maintenue fixe, la viscosité apparente du matériau décroît avec la durée de l'écoulement, et le matériau retrouve son état initial.

IV.3.4.2. Essai de fluidité :

- Mesure de l'étalement au cône d'Abrams



Figure.IV. 27 : Cône d'Abrams.

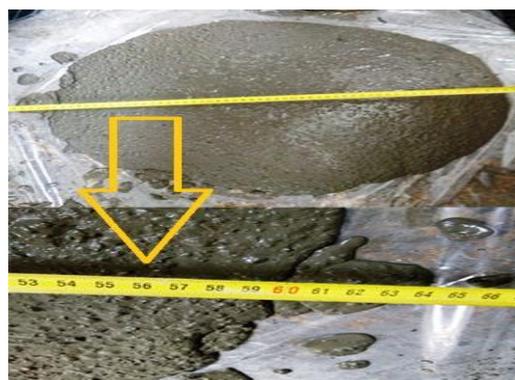


Figure.IV. 28 : Mesure de l'étalement.

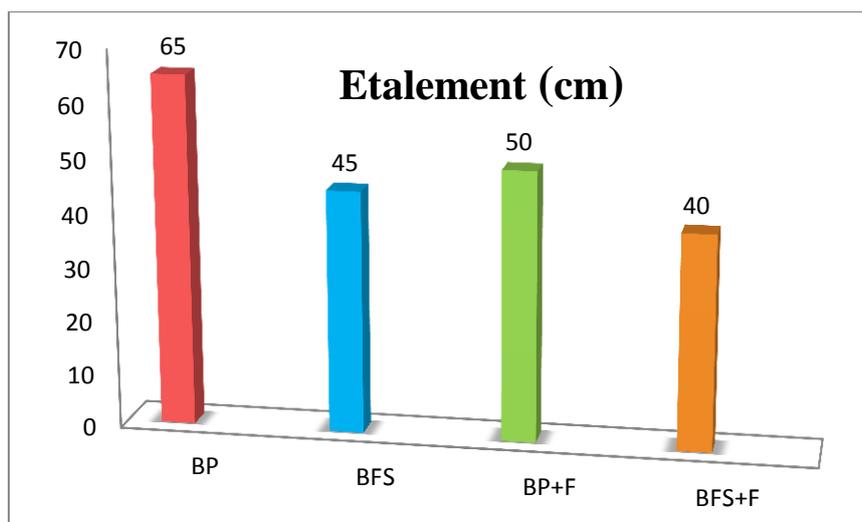


Figure.IV. 29 : Histogramme représentant l'étalement des différents bétons.

Discussion et interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenus on peut constater que :

- L'étalement obtenu avec la pouzzolane naturelle comme addition est nettement plus supérieur à celui obtenu avec la fumée de silice, cela s'explique par la surface développée par les grains de fumée de silice qui est au moins 25 fois supérieur à celle développée par les grains de pouzzolane, donc on a une meilleure lubrification de la poudre dans le cas de la pouzzolane.
- l'ajout de fibres réduit considérablement la capacité des bétons à s'écouler en milieu non confiné.

IV.3.4.3. Essais de ségrégation statique

- **Mesure de la stabilité au tamis :**

La stabilité au tamis se calcule par la relation suivante :

$$\text{Stabilité au tamis} = \frac{\text{Masse du passant au tamis 5 mm}}{\text{Masse initiale}} \times 100\%$$

Tableau IV. 24. Résultats de mesure de la stabilité au tamis :

	BP	BFS	BP+F	BFS+F
Stabilité au tamis (%)	4.3	3.6	3.1	2

Interprétation des résultats :

D'après la littérature et les résultats obtenus, on conclut que les bétons étudiés présentent une très bonne résistance à la ségrégation statique grâce à la pâte liante visqueuse et cohésive.

IV.3.4.4. Conservation des éprouvettes :

Les moules (cubiques et prismatiques) remplis de béton marqués et placés jusqu'au moment du démoulage, dans un endroit humide à une température de $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Le démoulage entre 20 à 24 heures après la mise en moule, les éprouvettes sont conservées dans la chambre humide jusqu'au moment de l'essai à $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Elles sont sorties de la chambre humide au moins 15 minutes avant l'essai.

L'âge des éprouvettes, à partir du moment de malaxage jusqu'au début de l'essai de résistance mécanique, est : à 3 jours, 7 jours et à 28 jours.



Figure.IV. 30 : Conservation des éprouvettes.

- À l'état durci :

IV.3.4.5. Suivi du poids

La figure suivante montre la variation de la masse des différents types de béton à différentes échéances.

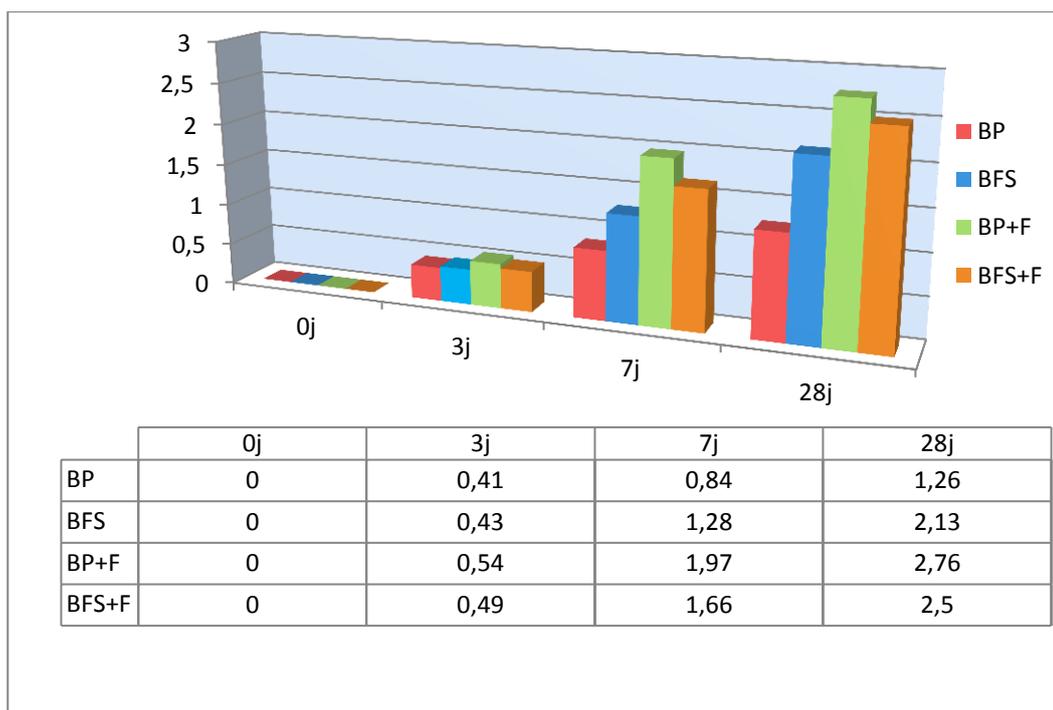


Figure.IV. 31 : La variation de la masse volumique des différents bétons en %.

Discussion et interprétation des résultats :

D'après la figure on remarque que la masse volumique augmente au cours du temps.

Cette densification s'explique par le phénomène d'hydratation des silicates de calcium présents dans le ciment pour former des hydrosilicates de calcium.

On a aussi remarqué que le gain de masse pour les bétons avec fibres métalliques est nettement supérieur à celui des bétons non-fibrés.

A travers les résultats on peut dire que les bétons avec fibres métalliques ont plus d'aptitude à absorber l'eau donc à gagner en masse que les autres bétons, cela est due aux fibres qui facilite la pénétration de l'eau dans les éprouvettes, à cause de leurs orientations.

IV.3.4.6. Contrôle non destructif par ultrasons

Pour déterminer la vitesse longitudinale, on a utilisé l'appareil (proceq) **Figure .IV. 32**.

Avant de commencer le contrôle de nos éprouvettes l'appareil d'ultrasons doit être étalonné avec l'étalon montré ci-dessous.



Figure.IV. 33 : Étalonnage de l'appareil. **Figure.IV. 34 :** Appareil de contrôle à ultrasons.

Tableau IV. 25. Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons :

	BP	BFS	BP+F	BFS+F
Vitesse (m/s)	4636	4600	4580	4660

Discussion et interprétation des résultats :

A partir de ces mesures on peut affirmer que les bétons étudiés font partie d'une classe supérieure sur le plan de la qualité de par leur grande compacité et l'absence de fissures, de plus, les mesures prises à différents points révèlent qu'il y a une bonne répartition des agrégats.

IV.3.4.7. Module de Young E_d :

$$E_d = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \cdot \rho \cdot V^2$$

ν : Coefficient de Poisson.

ρ : Masse volumique kg/m^3 .

V : Vitesse de propagation de l'onde m/s .

Tableau IV. 26. Valeur du module d'élasticité dynamique des différents bétons :

	BP	BFS	BP+F	BFS+F
E_d (GPa)	46.6	45.5	49	48

Discussion et interprétation des résultats :

La caractérisation mécanique par le module de Young est aussi importante car elle conditionne la rigidité des structures. En comparant les bétons sans fibres à des bétons fibrés, on note une augmentation du module. À titre d'exemple le BP possède un module d'élasticité de 46,6 GPa, alors que pour le BP+ F Métallique ce module est de l'ordre de 49 GPa.

En général, pour augmenter la résistance du béton, il faut diminuer la porosité de la matrice et donc diminuer le rapport E/C. Un rapport E/C inférieur à 0,25 correspond en général avec les ciments courants, au domaine des BFUP.

IV.3.4.8. Résistance à la compression (Norme NF P18-407)

Les essais de compression sont effectués sur des éprouvettes cubiques 70 x 70 x 70 mm, sur un bâti de compression de type Toni Technique piloté par ordinateur équipé du logiciel Test Expert V7.11, et doté d'un capteur de force de 3000 KN. Celle-ci est reliée à une machine d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané de la force en fonction du temps. La vitesse de chargement est de 6 kN/ s.

On a calculé la résistance à la compression par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F}{S}$$

R_c : Résistance à la compression (MPa).

F : La force appliquée (N).

S : Surface d'éprouvette (mm²).



Figure.IV. 35 : Essai de compression.

Tableau IV. 27. Résistances à la rupture en compression (R_c) :

	BP	BFS	BP+F	BFS+F
Rc à 3 jours (MPa)	76.24	73.75	68.80	64.01
Rc à 7 jours (MPa)	85.27	77.91	79.46	77.91
Rc à 28 jours (MPa)	87.53	82.01	95.69	106.02

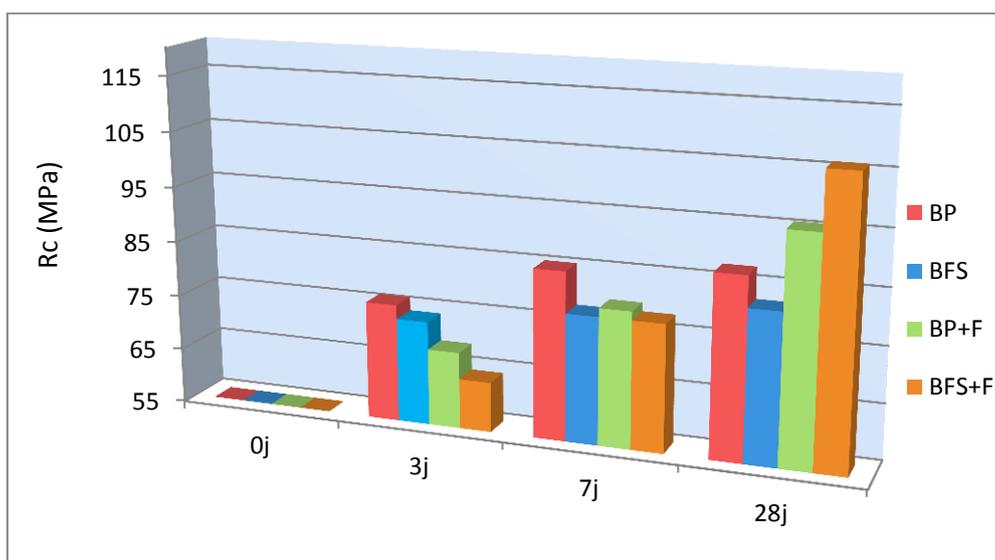


Figure.IV. 36 : Histogramme représentant l'évolution des résistances à la compression des différentes formulations.



Figure.IV. 37 : Effet de l'ajout de fibres métalliques sur la détrition sous compression des BUHP.

Discussion et interprétation des résultats :

On remarque :

- De très bonnes performances à jeune âge.
- Une augmentation des résistances entre 3 et 28 jours, pour tous les bétons. cela est due à l'hydratation de la pâte liante et la formation de cristaux qui se densifient au cours du temps et ainsi participent à l'augmentation des résistances.
- Les résistances apportées par l'addition de pouzzolane se révèlent être meilleures que celles apportées par ajout de fumée de silice à différentes échéances.
- L'ajout de fibres métalliques diminue la résistance à 3 et 7 jours, mais à 28 jours on note une évolution de 10 % de la résistance des bétons fibrés avec ajout de pouzzolane par rapport au même béton sans fibres, et une évolution de 30% de la résistance des bétons fibrés avec ajout de fumée de silice par rapport au même béton sans fibres.
- À 28 jours le BFS+F dépasse le BP+F même si l'ajout de pouzzolane a donné de meilleurs résultats sans fibres, cela s'explique par une moins bonne adhérence entre la pâte et les fibres par rapport à celle avec ajout de fumée de silice. Néanmoins les résultats restent assez satisfaisants.

IV.3.4.9. Résistance à la flexion (Norme NF EN 12390-5)

Les essais de traction par flexion sont effectués sur des éprouvettes prismatiques 70 x 70 x 280 mm sur la machine TONY TECHNIQUE 100KN pilotée par ordinateur.



Figure.IV. 38 : Essai de flexion sur des éprouvettes prismatiques.

On a calculé la résistance à la flexion par la formule suivante :

$$R_f = \frac{3F.L}{2b.h^2}$$

R_f : Résistance à la traction par flexion (MPa).

F : Force appliquée (N).

L : Longueur entre les appuis (mm).

b : Largeur d'éprouvette (mm).

h : Hauteur d'éprouvette (mm).

Tableau IV. 28. Résistances à la flexion (R_f) :

	BP	BFS	BP+F	BFS+F
R _f à 7 jours (MPa)	9.5	9.18	13.56	17.07
R _f à 28 jours (MPa)	10.16	9.29	14.70	16.53

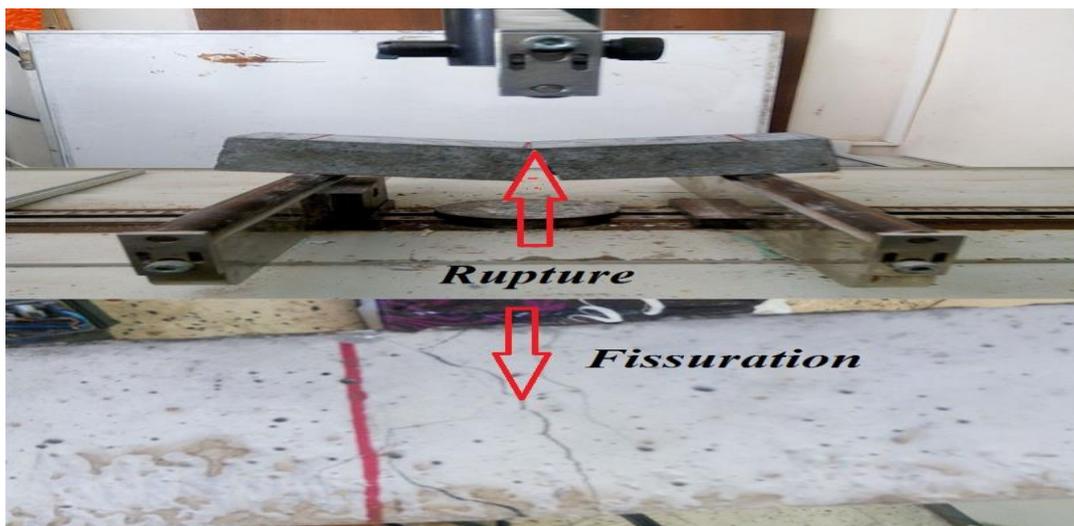


Figure.IV. 39 : Influence de l'ajout de fibres métalliques sur le comportement des BUHP en traction par flexion.

Discussion et interprétation

D'après les résultats de l'essai on remarque :

- Le béton sans fibres à un comportement fragile, on distingue bien la rupture franche caractéristique des bétons.
- L'ajout de fibres métalliques augmente la résistance à la traction par flexion et la transmission des sollicitations via matrice vers les fibres métalliques confère au béton un comportement ductile.
- La présence de fibres dans le béton freine la fissuration, après application d'une charge maximale et empêche ainsi le scindement des éprouvettes grâce à leur haute résistance à la traction et la bonne adhérence fibre-matrice.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était consacré à apporter une contribution aux nombreuses recherches menées visant à réduire le coût de fabrications des BFUP afin d'envisager une industrialisation du produit. Nous nous sommes axés sur la substitution de l'un des composants principaux des bétons ultra performants par un autre moins coûteux et plus abondant. Ainsi que sur la caractérisation physico-mécanique des BFUP élaborés.

A la lumière des résultats obtenus, on est arrivé à soustraire les points suivants :

- Les fibres métalliques diminuent l'ouvrabilité du béton lors de sa mise en œuvre.
- Les essais classiques de consistance des bétons effectués sur chantier, tel que l'affaissement au cône ne suffisent pas pour caractériser le comportement des BFUP à l'état frais.
- Le BFUP avec addition de pouzzolane naturelle bien broyée est plus fluide que celui avec addition de fumée de silice, donc meilleur et plus facile à mettre en place.
- Le fort dosage en ciment dans les BFUP nous donne une pâte liante visqueuse et cohésive qui confère aux bétons une bonne stabilité, résistance à la ségrégation et au ressuage.
- Les BFUP ont un caractère rhéologique thixotrope, ce qui pourrait causer des problèmes dans le coulage en multicouches (discontinuité de l'interface entre deux couches de béton).
- Les BUHP avec ajout de fibres métalliques ont plus d'aptitude à absorber l'eau donc à gagner en masse par rapport aux bétons non fibrés, + 2.5% pour ceux avec addition de fumée de silice et + 2.76% avec addition de pouzzolane naturelle.
- Une bonne configuration granulaire permet d'avoir une bonne compacité, notamment par le choix de granulats de petites dimensions.
- Les bétons confectionnés présentent des résistances exceptionnelles à la compression à jeune âge qui varie entre 64 et 76 MPa à 3 jours seulement.
- L'addition de pouzzolane naturelle nous donne de meilleures performances mécaniques que ce soit en compression ou en traction par flexion à 28 jours.
- L'adhésion entre fibre et matrice est d'autant meilleur que la finesse des additions est plus grande.

Conclusion générale

- Les fibres métalliques de grande taille supérieure à 20 mm et de diamètre supérieur à 0.5 mm ne sont pas recommandées pour la confection des BFUP.

Enfin, on conclue en disant qu'il y a des avantages et des gains à utiliser la pouzzolane, tant sur les propriétés du produit que sur le coût de production.

Perspectives et recommandations :

D'après les résultats obtenus de cette investigation expérimentale on recommande :

- L'utilisation d'un ciment de classe supérieur CEM I 52.5, afin d'avoir des résistances plus élevées.
- Travailler avec une finesse plus poussée supérieur 8100 cm²/g avec utilisation d'agents de mouture afin d'augmenter la réactivité de l'addition et l'adhésion fibres-matrice.
- Augmenter le pourcentage de l'addition à 20 % voir 30 % pour augmenter la compacité du béton.
- Faire varier les dimensions et la nature des fibres.
- Utiliser de la lignine d'origine végétale comme fluidifiant naturel afin de réduire le coût.
- Travailler avec du quartz Broyé de finesse $\leq 20 \mu\text{m}$.
- Procéder au traitement thermique et réduire le dosage en ciment pour les éléments de structures.
- Faire une optimisation de la formulation des BFUP et des éléments constitutifs.
- L'utilisation d'autres additions actifs tel que le métakaolin, cendres volantes, laitier ...etc ou inertes comme le calcaire bien broyé.

Références bibliographiques

- [1] ISMAIL, M. « avec la cicatrisation dans les fissures pour prolonger la durée de service des infrastructures » (ponts, centrales nucléaires). Thèse de doctorat INSA, 2006.
- [2] MALIER, Y. « les bétons à hautes performances -caractérisation, durabilité, applications ». Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, France, 1992.
- [3] COLLECTION TECHNIQUE CIM-BÉTON, « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre » chapitre 3 ; Tome II., Ecole Française du Béton, pp : 96-109.
- [4] SAFI, B. « les betons a hautes performances bhp ». Chapitre 4, FSI, UMBB, 2012.
- [5] BOUALEM, ABDI. « La durabilité des bétons autoplaçants destinés à la réparation des infrastructures ». Mémoire de maîtrise des sciences appliquées, spécialité : génie civil, université de Sherbrooke (Québec), Canada, Novembre 2005.
- [6] Association Internationale Permanente des Congrès de la Route (AIPCR). « Emploi du béton compacté dans les chaussées ». 1993.
- [7] TAREK AGAL. Développement d'un Catalogue de Dimensionnement Structural des Chaussées Pour la Ville de MONTRÉAL, école de technologie supérieure université du Québec, MONTRÉAL, LE 12 AOÛT 2005.
- [8] PHILIPPE FRANCISCO. Déformations différées des bétons fibrés à ultra hautes performances soumis à un traitement thermique. Autre. Ecole normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2012.
- [9] Elsa Nguyen Phuong Amanjean. Développement de bétons fibrés ultra performants pour la réalisation d'éléments de structures préfabriqués. Matériaux composites et construction. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2015.
- [10] C.Alonso, et al. «Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar».1047–55. 2000].
- [11] U. Chinje melo, et N. Billong, « Activité pouzzolanique des déchets de briques et tuiles ». African Journal of Science and Technology (AJST) Science and Engineering Series Vol. 5, No. 1, pp. 92 - 100. June, 2004.
- [12] [S .Brault. « Modélisation du comportement à la lixiviation à long Terme de déchets stabilisés à l'aide de liants hydrauliques ». Thèse de doctorat, université paris 6. France, 2001.

Références bibliographiques

- [13] E.Badogiannis, G. Kakali, , G. Dimopoulou, , E.Chaniotakis, , Tsivilis, S. « Metakaolin as a main cement constituent: exploitation of poor Greek kaolins ». *Cement & Concrete Composites* 27, 197–203. 2005.
- [14] L.A.P. Oliveira, S. Jalali, J. M. Fernandes and E. Torres. « The use of metakaolin to produce the eco-efficient concrete ». *Materials and structures* 38, 403-410, April 2005.
- [15] S. BONNET. « Matériaux cimentaires à haute déformabilité par incorporation de granulats issus du broyage de pneus usagés ». Thèse de doctorat à l'université de Toulouse III – PAUL SABATIER janvier 2004.
- [16] D.Chahidi Elouzani. « Caractérisation physico chimique et valorisation en bâtiment et travaux public des cendres issues de l'incinération des boues de papèterie ». Thèse de l'institut nationale des sciences Lyon N° d'ordre 2005-ISSAL-0086.
- [17] O. Rodríguez, M. Frías and MI. Sánchez de Rojas. « Influence of the calcined paper sludge on the development of hydration heat in blended cement mortars». *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*; Vol. 92 (3): 865–871, 2008.
- [18] W.Aquino, D. A Lange, J.Olek, «The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of alkali-silica reaction products ». *Cement Concrete Comp*; vol. 23 (6): pp. 485-493, 2001.
- [19] MASSAZZA, Franco. *Pozzolana and pozzolanic cements*. *Lea's chemistry of cement and concrete*, 1998, vol. 4, p. 471-635.
- [20] E.Guneyisi,; M. Gesoglu,; K. Mermerdas, K. *Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin*. *Materials and Structures*; vol. 41: pp. 937-949, 2008.
- [21] Safi. B, Benmounah. A, Saidi. M. *Rheology and zeta potential of cement pastes containing calcined silt and ground granulated blast-furnace slag*. *Matériaux de Construction* 2011; Vol. 61 (303): 353-370.
- [22] B .Safi, I. Yurtdas, A. Li *Use of silt of dams as a supplementary cementitious material in self-compacting mortars: effect on physical and mechanical properties. 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO SGEM Bulgaria, (2012)*.
- [23] ADAM. M. NEUVILLE. *Propriétés des bétons* Eyrolles Paris, 2000.

Références bibliographiques

- [24] E.Guneyisi,; M. Gesoglu,; K. Mermerdas, K. *Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin*. Materials and Structures; vol. 41: pp. 937-949, 2008.
- [25] U. Chinje melo, et N. Billong, « *Activité pouzzolanique des déchets de briques et tuiles* ». African Journal of Science and Technology (AJST) Science and Engineering Series Vol. 5, No. 1, pp. 92 - 100. June, 2004.
- [26] O.Bonneau, M.Lachemi, E.Dallaire, J.Dugat, Aitcin P.-C., "*Mechanical properties and durability of two industrial reactive powders concretes*". ACI Materials journal, p. 286-290, july-august 1997.
- [27] Y. RAHMANI. Etude de l'influence des différents types d'adjuvants sur le comportement mécanique du béton ordinaire en statique et dynamique par flexion, UMBB Boumerdes, 2015.
- [28] P. Richard, MH.Cheyrezy , *Composition of reactive powder concretes*. Cement Concrete Res; 25(7):1501–11, 1995.
- [29] Poon CS, Lam L, Kou SC, Wong YL, Wong R. *Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high performance cement pastes*. Cement Concrete Res 2001; 31:1301–6.
- [30] Poon CS, Lam L, Kou SC, Wong YL, Wong R. *Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high performance cement pastes*. Cement Concrete Res 2001; 31:1301–6.
- [31] N.MAKHLOUF, caractérisation en statique du comportement en traction direct du béton armé de fibres en copeaux, Université Mouloud MAMMERI Tizi-Ouzou, Novembre 2010.
- [32] Gaston Doiron, M.Eng, P.Eng., Béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) et les ouvrages d'art en Amérique du Nord,Lafarge Canada Inc.Ductal, Toronto, Ontario.
- [33] N. BOUHAMOU et al, Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplaçant a l'état frais, Afrique science ISSN 1813-548X, 2008.
- [34] Syndicat national du pompage du béton, « La promotion du pompage du béton » [CD] 2JMédia-Janvier 2012.
- [35] JACOBSEN S., HAVARD MORK J., FOON LEE S. et al. « Pumping of concrete and mortar-State of the art», Coin project report 5-2008, coin 2008.

Références bibliographiques

- [36] MAXIME GASCON, Étude du Comportement de Connecteurs de Cisaillement dans du Béton Fibré à Ultra Hautes Performances Pour la Construction de Poutres Mixtes de Ponts, Université de Montréal, Avril 2016.
- [37] Walid. Djouadi, Caractéristiques physico-mécaniques des BFUP de poudre de verre, Université M'hamedBougaraBoumerdes, Boumerdes, 2014.
- [38] Touhami, Tahenni., « fissuration en béton avec référence particulière au béton à haute performance ». Thèse Magister USTHB, Alger 2006.
- [39] Pascal Casanova, Bétons renforcés de fibres métalliques : du matériau à la structure. Etude expérimentale et analyse du comportement de poutres soumises à la flexion et à l'effort tranchant. Matériaux. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995.
- [40] M^{me} KHELOUI Fatma née TAOUCHE, Modélisation du comportement à la fatigue d'éléments de construction en béton de fibres, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Tizi-Ouzou, 2012.
- [41] Yacine CHERAIT. Zahredinne NAFA, "Eléments de matériaux de construction et essais" Université 08 Mai 1945 GUELMA. Edition OPU.
- [42] Neville A.M., Properties of concrete. Fourth Edition, England: Longman Edition, 1995, p 844.
- [43] Loukili A., Khelidj A., Richard P., Hydration Kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete. Cement and Concrete Research 29, 1999, p. 577-584.
- [44] Loukili A., Etude du retrait et du fluage de bétons à ultra-hautes performances. Thèse de l'école centrale de Nantes, 15 novembre 1996.
- [45] Association béton Québec, guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton, janvier 2005.
- [46] Alpari S., Coppolla R., Troli R., Alpari M., Mechanical properties of modified reactive powder concrete. Proceedings, 5th CANMET/ACI international conference on superplasticizer and otherchemical admixtures in concrete, SP-173, Rome, Italy, 1997, p. 1-21.
- [47] Aicha KAMEN, comportement au jeune âge et différé d'un BFUP écrouissant sous les effets thermomécaniques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse 2007.

Références bibliographiques

- [48] Morin V., Cohen-Tenoudji F., Feylessoufi A., Richard P., Evolution of the capillary network in a reactive powder concrete during hydration process, *Cement and Concrete Research*, vol. 32, pp 1907-1914, 2002.
- [49] Matte V., Moranville M., Adenot F., Richet C., Torrenti J-M., Simulated microstructure and transport properties of ultra-high performance cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 12, pp 1947-1954, 2000.
- [50] Reinhardt H. W., Jooss M., Permeability and diffusivity of high performance concrete with and without cracks, *ICACS 2003*, pp 17-21, Xuzhou, Chine, 2003.
- [51] Rossi P., Development of new cement composite material for construction, *Innovations and Developments In Concrete Materials And Construction*, Proceedings of the International Conference, University of Dundee, Ed. by R. K. Dhir, P. C.Hewlett, L. J. Csetenyi, pp 17-29, Dundee, Scotland, 2002.
- [52] VERNET C., Enseignements tirés des recherches sur les BFUP, Journées d'étude « durabilité des ouvrages en béton », 2002.
- [53] AFGC, SETRA, Bétons fibrés à ultra-hautes performances. SETRA, AFGC, France 2000.
- [54] Jacques RESPLENDINO, 2006. Les Bétons Fibrés Ultra Performants BFUP. Perspectives offertes vis-à-vis de la pérennité et la maintenance des ouvrages, Toulouse 2006.
- [55] BENAICHA Mouhcine, Formulation des différents bétons (BAP, BHP et BFUP) à haute teneur en additions minérales : Optimisation pour améliorer le coulage, la résistance au jeune âge et la durabilité des bétons. Université Abdelmalek Essaâdi Faculté des Sciences et Techniques Tanger, 2013.