

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Août 1955-Skikda  
Faculté de Technologie  
Département : Génie Civil  
Ref: D012125027D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة  
كلية التكنولوجيا  
قسم الهندسة المدنية  
المرجع : D012125027D

## THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT LMD

### En Génie civil

Option : **Matériaux en génie civil**

---

# Contribution à l'étude d'un BFUP à base des ajouts

---

Présentée par :

**BOULKENAFET Bilal**

Soutenue publiquement le **02/07/2025**,

Devant le jury composé de :

Pr. BOUABAZ Mohamed	Professeur	Université de Skikda	Président
Pr. HEBHOUB Houria	Professeur	Université de Skikda	Rapporteur
Dr. ABDELOUAHED Assia	MCA	Université de Skikda	Co-rapporteur
Dr. DERABLA Riad	MCA	Université de Skikda	Examineur
Dr. KECHKAR Chiraz	MCA	Université de Guelma	Examineur
Dr. KHALDI Nacera	MCA	Université de Guelma	Examineur

## Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, le Très Haut, le Tout-Puissant, qui m'a guidé, soutenu et accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail de thèse. Sans Sa volonté, rien de tout cela n'aurait été possible.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Habhoub Houria et au Docteur Abd Elouahed Assia pour leur encadrement bienveillant, leur expertise et leur engagement indéfectible. Leur confiance, leurs conseils avisés et leur disponibilité ont été des piliers essentiels dans l'aboutissement de cette recherche. Je leur suis infiniment reconnaissant pour leur soutien académique et humain, qui m'a permis de grandir tant sur le plan intellectuel que personnel.

Mes remerciements vont également aux enseignants du département de Génie Civil de l'Université de Skikda pour leur soutien et leurs précieux conseils tout au long de mon parcours. Leurs enseignements ont constitué une base solide pour la réalisation de ce travail.

Un grand merci aux responsables, ingénieurs et techniciens du Laboratoire CHEC, notamment à ,Mr Seddiki Adlene, Mr Bouneb Sobhi, et Mr Aoudj Adel pour leur assistance technique, leur professionnalisme et leur accueil chaleureux. Leur générosité et leur dévouement ont grandement facilité la réalisation des essais expérimentaux.

Je remercie également mes chères collègues de LNHC et mes amies pour leur soutien constant, leurs encouragements et leur bienveillance. Nos échanges fructueux et leur amitié ont été une source de motivation et d'inspiration tout au long de cette aventure scientifique.

Enfin, mes pensées les plus profondes vont à ma famille, ma véritable source de force et d'amour. À mes chers parents, qui ont toujours cru en moi et m'ont inculqué les valeurs de travail et de persévérance. Leur soutien inconditionnel et leurs prières ont été une bénédiction. À mes frères, Nabil et Haydar, et à mes sœurs, Sabrina, Amina et Rahma, pour leur amour fraternel et leur présence réconfortante. Leur bienveillance a été un réconfort précieux dans les moments de doute.

Un merci tout particulier à mon épouse, ma compagne de vie, dont l'amour, la patience et le soutien indéfectible ont été une source inépuisable de force et de sérénité. Elle a su me comprendre et m'encourager dans les moments les plus exigeants. À mes enfants adorés, Mohamed Djaoued, Fadi et Mazen, qui ont illuminé ma vie de leur joie et de leur innocence. Leur présence a été ma plus grande motivation, et je leur dédie ce travail avec tout mon amour.

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail, j'exprime ma sincère reconnaissance et ma profonde gratitude. Ce travail est le fruit d'un effort collectif, et je n'oublierai jamais ceux qui m'ont aidé à le réaliser.

# *Dédicaces*

*À mon épouse :*

*"Merci d'être présente à mes côtés et d'apporter de la sérénité à ma vie."*

*"Ton soutien et ta présence sont essentiels pour moi."*

*"Ces mots te sont dédiés en signe de reconnaissance. "*

*A mes parents :*

*"Merci pour l'éducation et les valeurs transmises."*

*"Votre soutien a toujours été important pour moi."*

*"Je vous exprime ici ma reconnaissance. "*

*A mes enfants :*

*"À Mohamed Djaoued, Mazen et Fadi, votre présence est précieuse dans ma vie."*

*"Je vous souhaite un bel avenir et vous encourage dans vos projets."*

*"Je vous exprime mon soutien et mes encouragements."*

*À mes frères :*

*"À Nabil et Haydar, merci pour votre présence et votre soutien."*

*"Votre proximité a toujours eu une importance particulière pour moi."*

*"Ces mots vous sont adressés en signe de reconnaissance."*

*À mes sœurs :*

*"À Sabrina, Amina et Rahma, votre présence est appréciée."*

*"Merci pour votre soutien et votre écoute."*

*"Je vous adresse ces mots avec considération."*

*À ma famille et mes amis :*

*"Merci à tous pour votre présence et votre soutien."*

*"Je vous adresse ces mots en témoignage de ma reconnaissance."*

*"Votre rôle dans ma vie est apprécié."*

## Résumé

La valorisation des déchets et la protection de l'environnement et la production de BFUP à faible coût représentent une orientation pour les chercheurs. La fumée de silice constitue le composant de base des bétons fibrés ultra performant (BFUP), cependant ce matériau est très coûteux et sa production reste limitée par la capacité de quelques industries. Ce travail, qui s'inscrit dans ce contexte a pour objectif de valoriser les déchets de verre, de céramique et de granite entant que fillers recyclés, utilisés en substitution partielle de la fumée de silice dans la composition du BFUP. L'étude commence par la recherche d'une formulation à base des matériaux locaux, puis consiste à remplacer 10% et 20% des fumés de silice de cette formulation par des fillers recyclés. Les essais réalisés sur les différents mélanges comprennent la mesure de la densité, ouvrabilité et air occlus à l'état frais, résistance en compression et en traction par flexion, scléromètre et ultrason sur des bétons non traités, ainsi les performances en compression et en traction par flexion sur des bétons traités thermiquement à 90°C. Les paramètres de durabilité évalués incluent l'absorption d'eau par immersion et par capillarité, la porosité accessible à l'eau ainsi que la pénétration des ions des chlorures. Les résultats montrent que les fillers recyclés de céramiques ainsi que 20% de fillers recyclés de granite permettent d'obtenir résistances en compression acceptables, de plus, l'ajout des fillers recyclés augmente la résistance en traction par flexion du BFUP tandis que le traitement thermique améliore les performances mécaniques. Enfin les fillers recyclés influent également sur les paramètres de durabilité.

**Mots clés :** BFUP, fillers recyclés de verres, fillers recyclés de céramiques, fillers recyclés de granites, traitement thermique, caractérisations, formulations, performances mécaniques, durabilités.

## Abstract

The valorization of waste, environmental protection and the production of low-cost Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC) represent a key focus for researchers. Silica fume is the fundamental component of UHPFRC; however, this material is very expensive, and its production remains limited by the capacity of only a few industries. This study, conducted within this context, aims to valorize waste glass, ceramic, and granite as recycled fillers, used to partially substitute silica fume in UHPFRC composition. The research begins by developing a mix design based on locally available materials, followed by replacing 10% and 20% of the silica fume in this formulation with recycled fillers. The tests performed on the different mixtures include measuring density, workability, and air content in the fresh state, as well as compressive strength, flexural tensile strength, sclerometer, and ultrasonic tests on untreated concrete. Additionally, the study evaluates compressive and flexural tensile performance on heat-treated concrete at 90°C. The durability parameters assessed include water absorption by immersion and capillarity, water-accessible porosity, and chloride ion penetration. The results show that recycled ceramic fillers, as well as 20% recycled granite fillers, provide acceptable compressive strength. Moreover, the addition of recycled fillers enhances the flexural tensile strength of UHPFRC, while heat treatment improves mechanical performance. Finally, the recycled fillers also influence durability parameters.

**Keywords:** UHPFRC, recycled glass fillers, recycled ceramic fillers, recycled granite fillers, heat treatment, characterization, mix design, mechanical performance, durability.

## ملخص

يعتبر تثمين نفايات وحماية البيئة وإنتاج الخرسانة الليفية الفائقة الأداء (BFUP) بتكلفة منخفضة وجهة للباحثين. يُعد رماد السليكا المكون الأساسي للخرسانة الفائقة الأداء المُسلحة بالألياف، إلا أن هذه المادة باهظة الثمن، كما أن إنتاجها محدود بقدرة بعض الصناعات فقط. هذه الدراسة، التي تأتي في هذا الإطار، تهدف إلى استغلال نفايات الزجاج والسيراميك والجرانيت كمادة مألثة معاد تدويرها، واستخدامها كبديل جزئي لرماد السليكا في تركيب الخرسانة الفائقة الأداء. تبدأ الدراسة بالبحث عن تركيب يعتمد على المواد المحلية، ثم استبدال 10% و20% من رماد السليكا في هذا التركيب بمواد مألثة معاد تدويرها. تضمنت الاختبارات التي أجريت على الخلطات المختلفة قياس الكثافة والقابلية للتشغيل والهواء المحبوس في الحالة الطازجة، ومقاومة الضغط والشد بالانحناء، واختبار الصلادة والموجات فوق الصوتية على خرسانة غير معالجة، بالإضافة إلى أداء الضغط والشد بالانحناء على خرسانة معالجة حرارياً عند 90°م. وشملت معايير المتانة التي تم تقييمها: امتصاص الماء بالغمر والشعيرية، والمسامية المتاحة للماء، وكذلك اختراق أيونات الكلوريد. أظهرت النتائج أن المواد المألثة المعاد تدويرها من السيراميك، وكذلك 20% من حبيبات الجرانيت المعاد تدويرها، تتيح الحصول على مقاومة مقبولة للضغط. علاوة على ذلك، فإن إضافة المواد المألثة المعاد تدويرها يزيد من مقاومة الشد بالانحناء للخرسانة الفائقة الأداء، في حين أن المعالجة الحرارية تعزز الأداء الميكانيكي. أخيراً، تؤثر المواد المألثة المعاد تدويرها أيضاً على معايير المتانة.

الكلمات المفتاحية:

BFUP، مواد مألثة معاد تدويرها من الزجاج، مواد مألثة معاد تدويرها من السيراميك، مواد مألثة معاد تدويرها من الجرانيت، المعالجة الحرارية، التوصيف، التركيبات، الأداء الميكانيكي، المتانة.

## Sommaire

Résumé	i
Abstract	ii
ملخص	iii
Sommaire	iv
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Introduction générale	2

## Chapitre I: Recherche bibliographique

I.1. Introduction	5
I.2. Béton fibré à ultrahaute performance (BFUP)	5
I.2.1. Introduction	5
I.2.2. Composition des BFUP	5
I.2.2.1. Ciment	5
I.2.2.2. Fumée de silice	6
I.2.2.3. Sables fins	6
I.2.2.4. Super plastifiants	6
I.2.2.5. Fibres métalliques ou synthétiques	6
I.2.3. Propriétés des BFUP	7
I.2.3.1. Propriétés à l'état frais	7
I.2.3.2. Propriétés à l'état durci	7
I.2.4. Classification des BFUP	9
I.2.4.1. Classification selon les types de fibres	9
I.2.4.2. Classes d'exposition	9
I.2.4.3. Classes de résistance aux transferts	9
I.2.4.4. Classes de consistance	10
I.2.4.5. Classification selon la dimension des granulats	10
I.2.4.6. Classes de traitement thermique	10
I.2.4.7. Classes de résistance à la compression	10
I.2.4.8. Classes de masse volumique	10
I.2.4.9. Classes de comportement en traction	10
I.2.4.10. Classes liées à l'abrasion hydraulique	11
I.2.5. Formulation	11
I.2.6. Fabrication et mise en œuvre des BFUP	12
I.2.6.1. Fabrication	12
I.2.6.2. Mise en œuvre	13
I.2.6.2.1. Contrôles avant le coulage	14
I.2.6.2.2. Transport du BFUP	15
I.2.6.2.3. Mise en place du BFUP	15
I.2.6.2.4. Cure du BFUP	15
I.2.7. Usages et applications	16
I.3. Valorisation des déchets dans les BFUP	19
I.3.1. Déchets de verres	20
I.3.2. Déchets de céramiques	21
I.3.3. Déchets de granite	22
I.3.4. Utilisation des déchets comme ajout dans la formulation des BFUP	23

I.4. Conclusion	24
<b>Chapitre II: Caractérisation des matériaux et mise au point de la formulation</b>	
II.1. Introduction	25
II.2. Formulation des BFUP	25
II.2.1. Choix de la formulation	25
II.2.1.1 Etude préliminaire	26
II.2.1.2. Choix des composants	31
II.2.1.3. Adoption de la formulation F4	35
II.3. Caractérisations des matériaux élaborés	37
II.3.1. Comparaison entre les différentes caractéristiques des matériaux	38
II.4. Conclusion	39
<b>Chapitre III : Programme expérimental et méthodologie d'essais</b>	
III.1. Introduction	41
III.2. Programme expérimental	41
III.2.1. Composition des mélanges	41
III.2.2. Formulation des mélanges	42
III.2.3. Fabrication des mélanges	43
III.3. Méthodologie et procédé de traitement thermique	46
III.3.1. Essai sur BFUP à l'état frais	46
III.3.1.1. Etalement au mini cône	46
III.3.1.2. Air occlus	47
III.3.1.3. Densité	47
III.3.2. Essai sur BFUP a l'état durci	48
III.3.2.1. Essai de compression	48
III.3.2.2. Essai de traction par flexion	49
III.3.2.3. Essai au scléromètre	49
III.3.2.4. Essai d'ultrason	50
III.3.2.5. Essai d'absorption par immersion	51
III.3.2.6. Essai d'absorption capillaire	51
III.3.2.7 Porosité accessible à l'eau	52
III.3.2.8. Essai pénétration de chlorures	53
III.4. Protocole de traitement thermique	54
III.5. Conclusion	54
<b>Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats</b>	
IV.1. Introduction	56
IV.2. À l'état frais	56
IV.2.1. Densité	56
IV.2.2. Ouvrabilité	57
IV.2.3. Air occlus	58
IV.3. À l'état durci	58
IV.3.1. Résistance à la compression	58
IV.3.2. Résistance à la traction par flexion	60
IV.3.3. Influence de la température de traitement sur la résistance en compression	61
IV.3.4. Influence de la température de traitement sur la résistance en traction par flexion	62

---

IV.3.5. Indice sclérométrique	63
IV.3.6. Vitesse ultrasonique	64
IV.4. Durabilité	65
IV.4.1. Absorption d'eau par immersion	65
IV.4.2. Porosité accessible à l'eau	65
IV.4.3. Absorption d'eau par capillarité	66
IV.4.4. Pénétration des ions de chlorures	67
IV.5. Conclusion	67
<b>Conclusions générales</b>	<b>70</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>73</b>

---

## Liste des figures

Figure I.1: Exemple de ciment et fumé de silice utilisés dans un BFUP	6
Figure I.2: Fibres métalliques utilisé dans un BFUP (TECHNI.CH, 2012)	7
Figure I.3: Malaxeurs planétaires	12
Figure I.4: Malaxeur à double arbre	12
Figure I.5: Exemple de mise en place d'un BFUP	14
Figure I.6: Pont de la république Montpellier	17
Figure I.7: Musée des civilisations de l'Europe et de la méditerranée, Marseille	18
Figure I.8: Projet tiny house au Danemark	18
Figure I.9: Déchets de verres	20
Figure I.9: Déchets de Céramiques	21
Figure I.10: Déchets de granites	22
Figure II.1: Bétonnière	27
Figure II.2: Malaxeur a béton à axe vertical	29
Figure II.3: Etalement au cône d'Abrams	30
Figure II.4: Etalement pour les deux formulations	30
Figure II.5: Résistance en compression	31
Figure II.6: Résistance en traction par flexion	31
Figure II.7: Sable de dune	32
Figure II.8: Courbe granulométrique du sable de dune	32
Figure II.9: CEM II/A-L 52.5N (M'Sila)	33
Figure II.10: Fumée de silice	33
Figure II.11: Fibres de polypropylène	34
Figure II.12: Malaxeur <b>HJW-60</b>	36
Figure II.13: Déchets de verre, céramique et granite	37
Figure II.14: Fillers recyclées	37
Figure III.1: Malaxeur à axe horizontal	43
Figure III.2: BFUP après malaxage	44
Figure III.3: Moules	44
Figure III.4: Remplissage des moules	45
Figure III.5: Conservation des moules remplis par le béton	45
Figure III.6: Décoffrage des éprouvettes	46
Figure III.7: Essai d'étalement au mini cône	46
Figure III.8: Essai de l'air occlus	47
Figure III.9: Mesure de la densité	48
Figure III.10: Essai de compression	48
Figure III.11: Essai de traction par flexion	49
Figure III.12: Essai au scléromètre	50
Figure III.13: Essai d'ultrason	50
Figure III.14: Essai d'absorption par immersion	51
Figure III. 15: Essai d'absorption capillaire	52
Figure III. 16: Mesure de la masse (essai porosité accessible à l'eau)	52
Figure III. 17: Essai pénétration des ions des chlorures	53
Figure III. 18: Étuve utilisée pour le traitement thermique	54
Figure IV.1: Variation de la densité en fonction du taux et type des fillers recyclés	56
Figure IV.2: Variation de l'ouvrabilité en fonction du taux et type des fillers recyclés	57
Figure IV.3: Variation de la teneur en air occlus en fonction du taux et type des fillers Recyclés	58

Figure IV.4: Variation de la résistance à la compression en fonction du taux et type des fillers recyclés	59
Figure IV.5: Variation de la résistance en traction par flexion en fonction du taux et types des fillers recyclés.	61
Figure IV.6: Résistance en compression a 28jours sur éprouvettes traité thermiquement	62
Figure IV.7: Résistance en traction par flexion à 28jours sur éprouvettes traité thermiquement	63
Figure IV.8: Variation de l'indice sclérométrique on fonction du taux et types des fillers recyclés	63
Figure IV.9: Variation de la vitesse ultrasonique on fonction du taux et types des fillers recyclés	64
Figure IV.10: Variation de l'absorption d'eau par immersion en fonction du taux et types des fillers recyclés	65
Figure IV.11: Variation de porosité accessible à l'eau en fonction du taux et types des fillers recyclés	66
Figure IV.12: Effet du taux et type de fillers recyclés sur la variation de l'absorption capillaire en fonction du temps	66
Figure IV.13: Variation de la profondeur de pénétration des ions des chlorures à l'âge 28jours en fonction du taux et type de fillers recyclés	67

**Liste des tableaux**

Tableau I.1: Résultats des résistances mécaniques obtenus par des chercheurs (2010 – 2020)	8
Tableau I.2: Variantes des formulations des BFUP entre 2010-2020 obtenus par des chercheurs	11
Tableau II.1: Compositions des deux formulations et prix des matériaux	26
Tableau II.2: Coût de composition <b>1m<sup>3</sup></b> des deux formulations	26
Tableau II.3: Formulations <b>F1</b> de mélange	27
Tableau II.4: Résultat des essais de caractérisation du BFUP de la formulation <b>F1</b>	28
Tableau II.5: Composition des mélanges des deux formulations choisis ( <b>F2</b> et <b>F3</b> )	29
Tableau II.6: Propriétés du sable <b>SD</b>	32
Tableau II.7: Propriétés de ciment et fumée de silice	34
Tableau II.8: Propriétés du super plastifiant	35
Tableau II.9: Composition chimique de l'eau	35
Tableau II.10: Composition des mélanges de la formulation <b>F4</b> choisie	35
Tableau II.11: Résultat des essais de caractérisation du BFUP de la formulation <b>F4</b>	36
Tableau II.12: Propriétés des fillers recyclés	37
Tableau III.1: Différentes compositions utilisées dans l'étude	42
Tableau III.2: Composition des mélanges	43

# **Introduction Générale**

---

---

## Introduction générale

Le BFUP est le béton le plus utilisé dans l'avenir, il présente des caractéristiques physiques et mécaniques et de durabilité exceptionnelles, il est utilisé avec des éléments préfabriqués permet de minimiser les impacts de la construction d'ouvrages d'art sur la circulation ; offre une durée de vie accrue et réduit les coûts d'entretien (**Doiron, 2009**).

Leur formulation fait appel à des matériaux spécifiques, fibres métalliques ou organiques, adjuvants super-plastifiants et des compositions granulaires spécifiques (ultrafines, fillers et sable) qui permettent d'obtenir une compacité maximale (**Guiraud, 2018**).

A l'heure actuelle, il n'existe pas de méthode générale de formulation des BFUP, mais plutôt des principes (**Amanjean, 2015**). Mais d'après la littérature il existe plusieurs formulations des BFUP commerciaux spécifiques pour chaque pays et développées par des entreprises tel que, les différents produits de la gamme Ductal® développés par Lafarge ; le BSI® développé par Eiffage ; le BCV® développé par Vinci ; le CEMTEC® développé par l'IFSTTAR (**Amanjean, 2015**) employés pour des ouvrages exceptionnels. Tous ces formulations se composent principalement par de fumée de silice comme ultrafine, cependant ce matériau est indisponible, très coûteux, très demandé et leur disponibilité est limitée par la capacité de production des industries du silicium, ce qui constitue un frein majeur à son utilisation à grande échelle (**Amanjean, 2015** et **Tafraoui, 2009**).

On outre le remplacement partiel ou total des ultrafines par d'autres additions et en particulier les ajouts recyclés, rend les formulations peu coûteuses et écologiques et limite l'utilisation des fumées de silice. Ces additions ont pour fonction par effet filler, elles comblent les vides entre les grains de ciment, les fibres et le sable ; elles améliorent la rhéologie du mélange et enfin, elles forment des produits d'hydratation par leur effet pozzoulanique (**Amanjean, 2015**).

L'objectif de ce travail est de trouvé une formulation spécifique a base des matériaux locaux, ensuite de remplacer partiellement la fumée de silice de cette formulation par des ajouts recyclés de déchet de verre, déchets de céramique et déchets de granite avec des taux de 10 et 20%, dont le but est de diminué le coût de ce type de béton d'une part et de préserver l'environnement d'autre part.

La réutilisation des déchets comme les déchets de verre, céramique et granite dans la formulation des BFUP permet de :

- Produire un nouveau matériau écologique et économique,
- Trouver d'autres sources des matériaux de construction et limiter les sites de stockage,
- Préserver l'environnement par la réutilisation des déchets.

Ce travail est organisé en quatre chapitres :

**Le premier chapitre**, recherche bibliographique sur les bétons fibrés a ultra-hautes performances, l'objectif de ce chapitre est de présenté une banque de donnée sur ce matériau, en particulier les matériaux qui entre dans leur composition à savoir, le ciment, le sable, l'adjuvant, fumée de silice et les fibres. Nous présentons également les principales caractéristiques a l'état frais et durci, leur formulation, les techniques de fabrication et mise en œuvre et leur domaine d'utilisation, ont mis le point sur quelques travaux antérieurs qui

réutilisent et valorisent les déchets comme granulats fin ou comme ajout dans la formulation des BFUP et en particulier les déchets de verres, céramiques et granites.

**Le deuxième chapitre** ; caractérisation des matériaux et mise au point de la formulation, dans ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble des matériaux utilisés dans ce travail à savoir les matériaux de bases (ciment, fumée de silice, sable, adjuvant, fibres de polypropylène et eau) et les matériaux élaborés (fillers recyclés de verre, céramique et granite).

Nous avons également présenté l'étude de mise au point de la formulation, comprenant la sélection des matériaux utilisés et identifiées la formulation de référence la plus prometteuse.

**Le troisième chapitre** décrit le programme expérimental, la formulation de référence et les différentes formulations retenues, ainsi que les paramètres fixes et variables de l'étude, les méthodes de fabrication des mélanges et une description détaillée sur l'ensemble des essais réalisés sur ces différentes formulations à l'état frais (densité, ouvrabilité et teneur en air occlus) et durci (résistances en compression et en traction par flexion avant et après traitement thermique, les essais non destructifs, et les essais de durabilité, absorption capillaire et par immersion, porosité accessible à l'eau et pénétration des ions des chlorures).

Dans **le quatrième chapitre** nous avons étudié l'effet du taux et type des fillers recyclés sur les propriétés des bétons fibrés à ultra-hautes performances. Une analyse complète de l'ensemble des résultats obtenus sous formes, d'histogrammes et de graphes qui nous permettent d'expliquer clairement les phénomènes constatés.

Cette étude est terminée par des conclusions générales englobent les principaux résultats obtenus et recommandations pour orienter des travaux futurs.

# **CHAPITRE I**

---

## *Recherche Bibliographique*

## I. Recherche bibliographique

### I.1. Introduction

Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP) sont des matériaux à matrice cimentaire, renforcés par des fibres et offrant des résistances en compression et en traction exceptionnelles, ces matériaux extrêmement fermes et compacts. L'objectif de ce chapitre est de présenter une banque de données sur ces matériaux, en particulier les matériaux qui entrent dans leur composition à savoir, le ciment, le sable, l'adjuvant, fumée de silice et les fibres. On présente également les principales caractéristiques à l'état frais et durci, leur formulation, les techniques de fabrication et mise en œuvre et leur domaine d'utilisation.

Dans ce chapitre ont mis le point sur quelques travaux antérieurs qui réutilisent et valorisent les déchets comme granulats fins ou comme ajout dans la formulation des BFUP et en particulier les déchets de verres, céramiques et granites.

### I.2. Béton fibré à ultrahaute performance (BFUP)

#### I.2.1. Introduction

Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP) ont émergé dans les années 1990 en réponse à une demande croissante pour des matériaux de construction alliant une résistance mécanique exceptionnelle et durabilité accrue. Selon les travaux de **Richard et Cheyrezy (1995)**, le concept de BFUP repose sur une matrice cimentaire particulièrement dense, enrichie en fibres de renforcement. Ce mariage de composants permet d'améliorer de manière significative les propriétés mécaniques et la ténacité de ce type de béton. Les recherches antérieures sur les bétons à haute performance (BHP) et les bétons fibrés (BF) ont également contribué au développement des BFUP, prouvant leur efficacité dans l'amélioration des caractéristiques mécaniques et de la durabilité des ouvrages en béton (**Wille et al., 2011**). Cette avancée technologique a permis de concevoir des bétons capables de faire face à des conditions extrêmes tout en réduisant les besoins d'entretien et en allongeant la durée de vie des infrastructures (**Rossi, 2013**).

#### I.2.2. Composition des BFUP

Les BFUP se distinguent par une formulation soigneusement optimisée qui associe des matériaux spécifiques, assurant ainsi des performances mécaniques et une durabilité remarquable. La formulation se fonde sur une matrice cimentaire à haute densité et faible porosité, ce qui permet de renforcer la résistance aux agressions environnementales et mécaniques (**Richard et Cheyrezy, 1995**).

##### I.2.2.1. Ciment

Le ciment agit en tant que principal liant assurant la résistance mécanique du béton, composé majoritairement de silicates de calcium hydrauliques, il forme une pâte solide lorsqu'il est mélangé avec de l'eau. Dans les BFUP, un dosage optimal de ciment renforce la compacité et diminue la porosité, réduisant ainsi l'absorption capillaire et augmentant la durabilité. L'utilisation de ciment Portland de classe CEM I 52.5 est courante, car elle améliore les résistances initiales et finales, augmentant ainsi les performances mécaniques (**Richard et Cheyrezy, 1995**).

### I.2.2.2. Fumée de silice

La fumée de silice, un sous-produit de la production de silicium, est une poudre ultrafine riche en dioxyde de silicium amorphe. Son ajout au BFUP contribue à réduire la porosité et à améliorer la compacité grâce à la réaction pozzoulanique avec l'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment. Selon **Wille et al. (2011)**, sa proportion habituelle varie entre 5% et 25% de la masse du liant. Toutefois, un dosage excessif peut entraîner un retrait autogène accru et des contraintes internes, rendant nécessaire un ajustement pour optimiser la formulation. La figure I.1 montre un exemple de ciment et de fumée de silice utilisés dans la rénovation d'un ouvrage d'Art (**TECHNI.CH, 2012**).



Figure I.1: Exemple de ciment et fumée de silice utilisés dans un BFUP

### I.2.2.3. Sables fins

Les granulats fins, souvent de type siliceux, jouent un rôle clé dans la composition des BFUP. Leur granulométrie est soigneusement contrôlée pour optimiser la compacité et réduire la demande en eau. L'intégration de sables ultrafins minimise également les vides capillaires, renforçant ainsi la durabilité face aux agressions chimiques et climatiques (**Wille et al. 2011**).

### I.2.2.4. Super plastifiants

Les super plastifiants sont des adjuvants qui améliorent la maniabilité des BFUP sans augmenter le rapport eau/liant. Ils interviennent en dispersant les particules de ciment, ce qui réduit la viscosité du mélange et optimise son auto-compactibilité (**Aïtcin, 2000**). Grâce à une utilisation raisonnée des super plastifiants à base de poly-carboxylates, il est possible de diminuer la quantité d'eau nécessaire de 20% à 40%, tout en garantissant une bonne fluidité, ce qui est crucial pour assurer l'homogénéité du mélange.

### I.2.2.5. Fibres métalliques ou synthétiques

Les fibres, qu'elles soient métalliques ou synthétiques, sont essentielles dans les BFUP. Elles améliorent de manière significative la résistance à la traction, la ténacité et la prévention des fissures. Les fibres métalliques, comme celles en acier, augmentent la ductilité et la résistance post-fissuration, tandis que les fibres synthétiques, telles que le polypropylène ou le PVA, sont utilisées pour limiter les fissures dues au retrait plastique et pour renforcer la durabilité

face aux cycles de gel/dégel ainsi qu'aux agressions chimiques (Wille et al., 2011). La figure I.2, est un exemple de fibres métalliques utilisé dans un BFUP (TECHNI.CH, 2012).

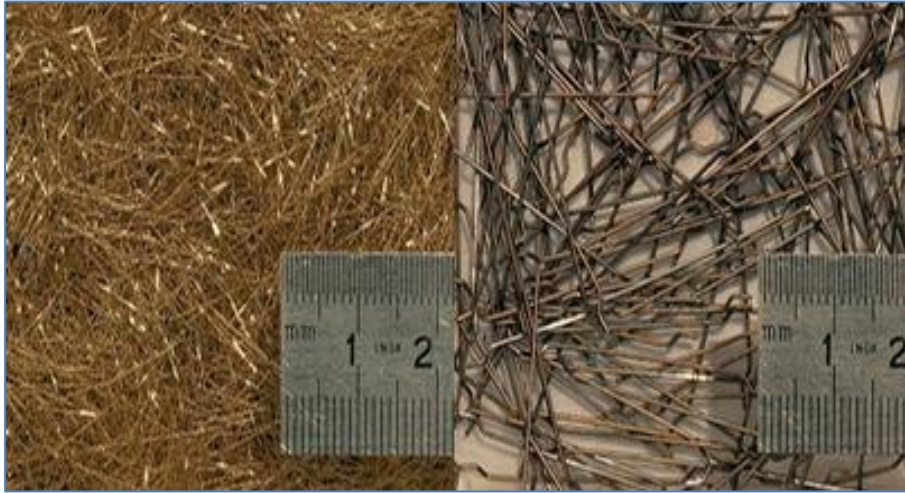


Figure I.2: Fibres métalliques utilisées dans un BFUP (TECHNI.CH, 2012)

### I.2.3. Propriétés des BFUP

Les BFUP se distinguent par des propriétés mécaniques et physiques remarquables découlant de leur formulation spécifique et de l'intégration de fibres de renforcement, ce qui leur confère une résistance et une durabilité accrues.

#### I.2.3.1. Propriétés à l'état frais

Les BFUP sont des bétons auto-plaçant très maniables, leur étalement au mini cône selon ASTM (ASTM C230/230M) est comprise entre 230 mm et 270 mm. Les BFUP possèdent une fluidité élevée et une rhéologie adaptée, permettant une mise en œuvre sans vibration, facilitant ainsi leur application sur les chantiers. Conformément à la norme EN 206-9, leur ouvrabilité est généralement supérieure à 650 mm par cône d'Abrams, garantissant une parfaite réalisation dans des coffrages complexes (Wille et al., 2011).

#### I.2.3.2. Propriétés à l'état durci

##### a. Résistance à la compression élevée

Les BFUP affichent une résistance à la compression largement supérieure à celle des bétons conventionnels, atteignant généralement plus de 150 MPa et pouvant même culminer à 250 MPa selon la formulation de Wille et al., (2011). Cette performance résulte principalement d'une microstructure dense, produite grâce à un faible rapport eau/ciment et à l'emploi d'adjuvants super plastifiants, ainsi que d'ajouts minéraux comme la fumée de silice (Richard et Cheyrezy, 1995).

##### b. Résistance à la traction par flexion

La présence de fibres dans les BFUP renforce leur résistance à la traction par flexion, une caractéristique cruciale pour les structures soumises à des charges dynamiques (Wille et al., 2011). Un dosage optimal de fibres métalliques se situe généralement entre 2 et 3% du volume total du béton, assurant ainsi un parfait équilibre des performances mécaniques.

### c. Durabilité améliorée

La faible porosité des BFUP limite la pénétration des agents agressifs, tels que les chlorures et les sulfates, ce qui améliore leur durabilité dans des environnements sévères. Des essais ont révélé que l'absorption capillaire des BFUP est diminuée de 70% par rapport aux bétons conventionnels, grâce à une microstructure dense (Wille et al., 2011).

Le tableau I.1 présente les résultats des résistances en compressions et en traction des bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP) fondés sur diverses recherches menées entre 2010 et 2020. Les performances varient selon le mélange, le type de fibres et les conditions d'essai.

Tableau I.1: Résultats des résistances mécaniques obtenus par des chercheurs (2010 – 2020)

Année	Auteur/ Source	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)	Type de fibres utilisées	Observations
2010	Richard et al.	150 - 200	8 - 12	Fibres métalliques	Forte densité du béton, influence de la cure thermique sur la résistance en compression.
2011	Rossi et al.	180 - 220	9 - 13	Fibres métalliques + polymères	Résistance améliorée en traction grâce à l'utilisation combinée de fibres métalliques et polymères.
2013	Acker et al.	200 - 250	10 - 14	Fibres d'acier	Résistance très élevée en compression avec une excellente ductilité.
2015	Yoo et Banthia	170 - 240	10 - 15	Fibres hybrides	Bonne performance sous charges cycliques, influence des fibres hybrides sur la ténacité.
2016	Chanvillard et al.	180 - 230	9 - 14	Fibres métalliques courtes	Résistance accrue sous sollicitations rapides (impact et fatigue).
2017	Kang et Yoon.	200 - 240	11 - 16	Fibres métalliques à haute teneur	Excellente performance en traction directe avec fibres longues.
2018	Wille et Naaman.	220 - 260	12 - 18	Fibres d'acier	Utilisation d'une matrice cimentaire densifiée, influence des fibres à haute performance.
2019	Dancygier et Katz	190 - 250	10 - 16	Fibres métalliques et verre	Bonne durabilité, amélioration du comportement post-fissuration avec les fibres en verre.
2020	Pyo et Kim	230 - 270	13 - 17	Fibres d'acier à ultra haute résistance	Résistance maximale en traction observée avec un béton optimisé à base de microfibrilles.

Selon les études mentionnées sur le tableau I.1.

- La résistance en compression du BFUP varie de 150 à 270 MPa,
- L'amélioration de la résistance à la traction est fortement influencée par la présence de fibres métalliques et hybrides, atteignant jusqu'à 18 MPa,
- Les fibres métalliques les plus utilisées pour améliorer la résistance à la traction et la ductilité du béton,
- L'ajout de fibres hybrides (métalliques et polymères ou verre) permet d'améliorer la ductilité et la résistance post-fissuration.

#### **I.2.4. Classification des BFUP**

Les bétons fibrés à ultra haute performance (BFUP) peuvent être classés selon plusieurs critères, notamment leurs performances mécaniques et leur durabilité.

##### **I.2.4.1. Classification selon les types de fibres**

Les BFUP se distinguent par la nature des fibres qu'ils contiennent :

- **Type M** : Composé de fibres métalliques, telles que l'acier ou l'innox.
- **Type A** : Comprend des fibres organiques et autres matériaux comme le PVA, le verre ou le polypropylène.

Il est à noter que seuls les BFUP de Type M bénéficient d'une couverture par la norme NF P 18-710 relative au dimensionnement.

##### **I.2.4.2. Classes d'exposition**

Les BFUP doivent répondre à des exigences spécifiques en fonction des classes d'exposition définies dans la norme NF EN 206/CN. Ces classes prennent en compte les différentes actions environnementales sur chaque partie d'ouvrage en BFUP et déterminent la durée d'utilisation de projet tout en imposant des critères de durabilité. Chaque exigence présente des seuils de base ainsi que des seuils améliorés pour garantir une durabilité adaptée.

##### **I.2.4.3. Classes de résistance aux transferts**

Pour assurer la qualité des BFUP, trois seuils de base dans la gestion des transferts doivent être respectés :

- Porosité à l'eau : À 90 jours, elle doit être inférieure ou égale à 9% (norme NF P 18-549),
- Coefficient de diffusion des ions chlorures : À 90 jours, il doit être inférieur ou égal à  $0.5 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s (normes XP P 18-462 et NF P 18-470),
- Perméabilité apparente aux gaz : À 90 jours, elle doit être inférieure ou égale à  $9 \times 10^{-19}$  m<sup>2</sup> (normes XP P 18-463 et NF P 18-470).

Bien que désignés comme « seuils de base », ces critères placent les BFUP parmi les matériaux cimentaires offrant une durabilité très élevée, notamment pour les classes d'exposition XC, XS, XD et XF. D'autres seuils ont également été établis pour caractériser des BFUP avec des performances supérieures, répondant ainsi aux conditions d'environnement plus exigeantes :

- Dp+: Porosité  $\leq 6\%$
- Dc+: Coefficient de diffusion des chlorures  $\leq 0.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
- Dg+: Perméabilité apparente  $\leq 1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$

#### **I.2.4.4. Classes de consistance**

La norme a défini trois classes de consistance pour les BFUP :

- Ca : BFUP auto plaçant, pouvant être mis en œuvre sans vibration ni aide mécanique.
- Cv : BFUP visqueux, pouvant être mis en œuvre sans vibration, mais nécessitant une aide mécanique pour l'écoulement.
- Ct : BFUP à seuil, qui peut s'écouler sous un cisaillement dynamique tout en maintenant une pente au repos.

#### **I.2.4.5. Classification selon la dimension des granulats**

La classification des BFUP basée sur la taille des granulats s'effectue selon la dimension nominale supérieure du plus gros granulat ( $D_{sup}$ ), qui doit être inférieure ou égale à 10mm, conformément à la norme NF EN 12620+A1.

#### **I.2.4.6. Classes de traitement thermique**

Les BFUP sont classés selon le traitement thermique auquel ils sont soumis :

- STT: Sans Traitement Thermique.
- TT1: Éléments soumis à un étuvage pour accélérer le début de prise.
- TT2: Éléments traités à température élevée quelques heures après la prise.
- TT1+2: Éléments bénéficiant des deux traitements de manière successive.

#### **I.2.4.7. Classes de résistance à la compression**

Les BFUP sont classés en six catégories selon leur résistance en compression, mesurée à 28 jours sur des cylindres de dimensions 110 mm / 220mm.

#### **I.2.4.8. Classes de masse volumique**

Les BFUP présentent une masse volumique variable, comprise entre 2200 et 2800 kg/m<sup>3</sup>.

#### **I.2.4.9. Classes de comportement en traction**

Pour les BFUP, deux conditions minimales doivent être respectées :

- La limite d'élasticité en traction à 28 jours doit être supérieure à 6.0 MPa.
- Le comportement en flexion après fissuration doit se conformer à une relation spécifique.

Les BFUP peuvent être classés selon les besoins du projet :

- T1: Comportement adoucissant en traction directe.
- T2: Comportement peu écrouissant.
- T3: Comportement très écrouissant.

### I.2.4.10. Classes liées à l'abrasion hydraulique

Les BFUP peuvent être exposés à divers types d'abrasion. Pour l'abrasion mécanique, les classes XM1, XM2, et XM3 sont définies dans l'Euro-code 2-1-1. Concernant l'abrasion hydraulique, la norme NF P 18-710 détermine que les BFUP doivent répondre à différentes classes de résistance :

- Classe RM1: Matériau résistant à l'abrasion hydraulique (indice d'abrasion entre 1 et 1.5),
- Classe RM2: Matériau très résistant (indice d'abrasion entre 0.7 et 1),
- Classe RM3: Matériau ultrarésistant (Indice d'abrasion < 0.7).

Cette classification détaillée permet d'assurer que les BFUP répondent aux exigences spécifiques des projets tout en garantissant leur durabilité et leur performance dans divers environnements.

### I.2.5. Formulation

La formulation des BFUP représente un défi technique majeur qui nécessite une approche intégrée et en conformité avec les normes en vigueur. L'objectif est d'atteindre des performances optimales tout en satisfaisant aux exigences spécifiques en matière de durabilité et de maniabilité. Plusieurs éléments clés caractérisent ce défi : la garantie d'une résistance mécanique élevée, l'assurance d'une durabilité accrue et l'optimisation de la maniabilité des matériaux. Ces propriétés sont essentielles pour permettre l'utilisation des BFUP dans des applications cruciales, telles que les infrastructures de transport, les bâtiments architecturaux et les ouvrages de sécurité.

Pour illustrer les évolutions dans ce domaine, le tableau I.2 récapitule des compositions de BFUP adoptées dans différentes recherches conduites entre 2010 et 2020. Ce tableau inclut les proportions des principaux composants ainsi que les adjuvants utilisés, offrant un aperçu des avancées et variations dans les formulations de ces matériaux novateurs.

Tableau I.2: Variantes des formulations des BFUP entre 2010-2020 obtenus par des chercheurs

Année	Auteur/Source	Ciment	Fumée de silice	Sable de quartz	Eau	Super plastifiant	Fibres métalliques
		kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%
2010	Richard et al.	900	250	1050	150	30	2.50%
2011	Rossi et al.	850	220	1020	140	28	2.00%
2013	Acker et al.	880	240	1080	155	32	2.20%
2015	Yoo et Banthia	900	230	1060	145	30	2.50%
2016	Chanvillard et al.	870	225	1070	148	31	2.30%
2017	Kang et Yoon	920	260	1100	150	33	2.80%
2018	Wille et Naaman	890	250	1050	140	29	2.50%
2019	Dancygier et Katz	860	210	1030	135	27	2.00%
2020	Pyo et Kim	930	270	1120	155	34	3.00%

Analysant les proportions et les dosages adoptés dans ces recherches nous fait conclure :

- Le rapport Eau/Ciment (E/C) varie entre 0.14 et 0.17, assurant une forte compacité et des résistances élevées,
- Le dosage en ciment varie entre 850 et 930 kg/m<sup>3</sup>, avec de la fumée de silice (210-270 kg/m<sup>3</sup>) pour améliorer la compacité,
- Le sable de quartz a un dosage élevé (1020-1120 kg/m<sup>3</sup>) pour optimiser la résistance mécanique,
- Super-plastifiant entre 27 et 34 kg/m<sup>3</sup>, permettant de maintenir une bonne ouvrabilité malgré le faible rapport E/C,
- Dosage en fibres métalliques de 2% à 3%, influençant directement la résistance en traction et la ductilité.

## I.2.6. Fabrication et mise en œuvre des BFUP

### I.2.6.1. Fabrication

Le malaxage des bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) est une étape cruciale qui détermine leur homogénéité, leur rhéologie et leurs performances mécaniques. Contrairement aux bétons traditionnels, les BFUP nécessitent une attention particulière lors du malaxage en raison de leur faible rapport eau/ciment et de la présence de particules ultrafines ainsi que de fibres. Pour garantir une répartition homogène des composants, la fabrication des BFUP exige :

#### a. Équipements de malaxage adaptés

Les BFUP requièrent des malaxeurs à haute énergie tels que :

- Malaxeurs planétaires (figure I.3), ces malaxeurs sont excellents pour un malaxage intensif et homogène, spécialement adaptés aux mélanges à haute viscosité (**Tutek et al., 2019**).
- Malaxeurs à double arbre (figure I.4), Ils favorisent une homogénéisation efficace des fibres et réduisent le temps de malaxage (**Hajar et al., 2021**).
- Malaxeurs à vitesse variable, utilisés principalement en laboratoire, ils permettent d'optimiser la rhéologie du mélange (**Nguyen et al., 2014**).



Figure I.3: Malaxeurs planétaires



Figure I.4: Malaxeur à double arbre

## **b. Un processus de malaxage**

Le malaxage s'articule autour d'une séquence méticuleuse pour garantir une répartition uniforme des composants et éviter l'agglomération des fibres.

### **-Pré-mélange des composants secs**

Le ciment, la fumée de silice et le sable fin sont mélangés à sec pendant environ 1 à 2 minutes. Cette étape vise à assurer une distribution homogène des particules fines (**De Larrard et Sedran, 2002**). En procédant ainsi, on favorise la dispersion des fines et on diminue le risque d'agglomération lors de l'ajout de l'eau.

### **-Ajout progressif de l'eau et du super plastifiant**

L'eau est incorporée par étapes, ce qui optimise l'hydratation du ciment et prévient la formation de grumeaux (**Aïtcin, 2000**). Le super plastifiant est également ajouté progressivement pour fluidifier le mélange, améliorer son ouvrabilité et limiter l'exsudation.

### **-Incorporation des fibres**

Les fibres, qu'elles soient métalliques ou synthétiques, doivent être ajoutées à la fin du malaxage, souvent en petites quantités. Cela empêche leur regroupement (**Graybeal, 2011**). À ce stade, il est recommandé d'utiliser une vitesse de malaxage modérée pour éviter les enchevêtrements de fibres et assurer leur bonne dispersion dans la matrice cimentaire.

### **-Malaxage prolongé et affinement du mélange**

Après l'ajout des fibres, le mélange est maintenu en malaxage pendant 10 à 15 minutes pour garantir une dispersion optimale et obtenir une rhéologie adaptée à la mise en œuvre (**Perry et al., 2018**). Un malaxage adéquat améliore également la compacité du béton et contribue à ses performances mécaniques à long terme, un malaxage insuffisant peut mener à une ségrégation des fines et une mauvaise répartition des fibres, entraînant ainsi une diminution des performances mécaniques (**Ferrari et al., 2017**). En revanche, un malaxage excessif peut provoquer une surchauffe du mélange et nuire à l'efficacité des adjuvants, ce qui nécessite des ajustements dans la formulation (**Schmidt et Fehling, 2005**).

Le malaxage des BFUP est une étape déterminante dans leur préparation, nécessitant un équipement de pointe et un processus rigoureux. En respectant ces bonnes pratiques, on optimise la dispersion des fibres et des particules fines, ce qui garantit des performances mécaniques supérieures et une durabilité accrue.

## **I.2.6.2. Mise en œuvre**

La mise en œuvre des bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) se distingue nettement de celle des bétons traditionnels, en raison de leurs caractéristiques particulières et des exigences spécifiques liées à leur formulation et leur application. Un suivi rigoureux est essentiel pour assurer une qualité optimale, une longévité accrue et des performances mécaniques maximales de ce matériau.

### I.2.6.2.1. Contrôles avant le coulage

Avant de commencer le coulage du BFUP, un certain nombre de vérifications doivent être effectuées pour garantir la qualité du produit.

#### a. Évaluation de la rhéologie et de la consistance

-Essai d'étalement, grâce à un cône d'affaissement modifié, cet essai permet de déterminer la fluidité du mélange. Pour garantir de bonnes performances, le BFUP doit être capable de se placer de lui-même sans vibration.

-Viscosité et stabilité, utiliser un rhéomètre pour surveiller la viscosité est essentiel afin d'éviter la séparation des composants et des fibres, ce qui est courant dans les mélanges de haute performance.

#### b. Vérification de l'homogénéité

-Inspection visuelle, cela implique de s'assurer que les fibres sont bien réparties dans le mélange, ce qui est crucial pour ses performances mécaniques.

-Analyse granulométrique, réaliser des tests en laboratoire pour vérifier la distribution des tailles de granulat permet d'assurer une bonne compacité et une cohésion du mélange.

#### c. Évaluation de la résistance initiale

Essais de compression, avant la mise en œuvre, il est recommandé de procéder à des essais sur des échantillons pour confirmer leur capacité à supporter des charges dans des conditions réelles.

La figure I.5 montre un exemple de mise en place d'un BFUP utilisés dans la rénovation d'un ouvrage d'Art (TECHNI.CH, 2012).



Figure I.5: Exemple de mise en place d'un BFUP

### **I.2.6.2.2. Transport du BFUP**

Le transport du BFUP nécessite une attention particulière pour minimiser le risque de ségrégation.

- Utilisation de camions malaxeurs à vitesse lente, ces camions permettent de réduire le risque de séparation des fibres pendant le transport,
- Respect des délais de transport, Il est conseillé de couler le béton dans les 90 minutes suivant le malaxage pour garantir une mise en œuvre de qualité,
- Ré mélange si nécessaire, un ré mélange sur site peut être effectué pour rétablir l'homogénéité avant le coulage.

### **I.2.6.2.3. Mise en place du BFUP**

Les BFUP, qui présentent une fluidité importante, facilitent leur mise en œuvre.

#### **a. Techniques de coulage**

- Coffrages étanches, Il est indispensable d'utiliser des coffrages conçus pour éviter toute fuite de laitance pendant le coulage.
- Coulage continu, cette technique évite les reprises de bétonnage, garantissant ainsi une finition uniforme.
- Absence de vibration, comme ces bétons sont auto-compactant, il n'est pas nécessaire d'utiliser des vibrateurs, ce qui simplifie le processus.

#### **b. Surveillance de la mise en œuvre**

- Contrôle de la température et du temps de prise, un suivi attentif de ces paramètres est crucial pour obtenir un durcissement homogène.
- Vérification des bulles d'air, s'assurer qu'aucune bulle d'air n'est présente est primordial pour préserver l'intégrité du béton, car cela peut compromettre sa résistance.

### **I.6.6.2.4. Cure du BFUP**

La cure est une étape nécessaire pour garantir que le béton atteigne sa résistance optimale et pour éviter les fissures. Une bonne cure est essentielle pour assurer la longévité du béton et sa résistance aux agressions extérieures. Durant les dernières années le processus de cure a été développé et appliqué en plusieurs méthodes.

#### **a. Cure humide traditionnel**

Cette méthode consiste à maintenir le béton humide pendant 48 à 72 heures pour prévenir un dessèchement précoce.

#### **b. Cure thermique**

##### **b.1. Principe général du traitement thermique**

Le traitement thermique est une méthode de cure accélérée visant à améliorer les propriétés

mécaniques et la durabilité des bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP). Il repose sur l'élévation contrôlée de la température, permettant d'intensifier les réactions d'hydratation du ciment et des additions minérales réactives comme la fumée de silice. Ce procédé est essentiel pour les BFUP, qui présentent un rapport eau/liant très faible ( $< 0,2$ ) et une formulation dense, peu réactive à température ambiante. Un traitement appliqué **avant la prise** peut provoquer ségrégation, retrait plastique ou fissuration. En revanche, lorsqu'il est réalisé **après la prise initiale** (entre 4 et 10 heures après le gâchage), il devient bénéfique pour densifier la matrice et améliorer les performances mécaniques.

## b.2. Principaux procédés de traitement thermique

### b.2.1. Traitement à la vapeur saturée

Ce procédé consiste à exposer les échantillons à une température contrôlée dans une enceinte fermée avec une humidité constante. Il favorise une hydratation homogène et prévient le dessèchement, mais nécessite des installations spécifiques (autoclaves ou chambres climatiques).

### b.2.2. Cure en eau chaude

Moins fréquente, cette méthode immerge les éprouvettes dans de l'eau chauffée. Elle garantit une température uniforme et une saturation constante, mais sa mise en œuvre reste complexe et coûteuse.

### b.2.3. Traitement thermique à sec (en étuve)

C'est le procédé le plus accessible en industrie. Réalisé sans humidité ajoutée, il nécessite impérativement une **cure humide préalable** pour éviter le dessèchement. Lorsqu'il est appliqué correctement, il favorise la formation de C-S-H, augmente la compacité, et permet d'atteindre des résistances élevées. Le cycle optimal comprend une montée progressive en température (10–20 °C/h), un palier de 24 à 48 h à 90 °C, puis un refroidissement lent, évitant tout choc thermique.

## I.2.7. Usages et applications

Les BFUP sont principalement utilisés dans la construction d'infrastructures essentielles, telles que les ponts, les tunnels et les structures maritimes. Grâce à leur longévité accrue et à leurs faibles besoins d'entretien, ces matériaux offrent des avantages considérables (**Wille et al., 2011**).

### a. Ponts et passerelles

L'utilisation des bétons fibres ultra performants (BFUP) dans la construction de ponts et passerelles marque une avancée majeure en matière de durabilité et d'optimisation des coûts d'entretien. Grâce à leur résistance exceptionnelle aux intempéries, aux agressions chimiques et au vieillissement, ces matériaux innovants permettent de réduire les frais de maintenance de 30 à 50%. Un exemple notable est le pont de la République à Montpellier (figure I.6), conçu avec des BFUP pour renforcer sa longévité et minimiser les interventions de maintenance. Cette technologie offre une meilleure protection contre la corrosion, un problème fréquent des infrastructures en béton classique.

Au-delà des économies financières, les BFUP contribuent également à réduire l'empreinte écologique des infrastructures en limitant les besoins en matériaux et en interventions. Leur adoption dans la construction moderne représente ainsi une solution durable, combinant performance structurelle et impact environnemental réduit.



Figure I.6: Pont de la république Montpellier

### b. Ouvrages de sécurité

Les BFUP sont également utilisés pour concevoir des structures anti-explosion et des dispositifs de blindage renforcés, augmentant ainsi la sécurité des infrastructures sensibles. Des études ont montré une amélioration de 40% de la capacité de dissipation d'énergie par rapport aux bétons conventionnels (Rossi, 2013).

### c. Façades et éléments architecturaux

Les propriétés uniques des BFUP permettent de créer des structures à la fois légères et esthétiques. Des projets emblématiques, comme la façade du musée des civilisations de l'Europe et de la méditerranée (figure I.7) à Marseille, illustrent ce potentiel.



Figure I.7: Musée des civilisations de l'Europe et de la méditerranée, Marseille

#### a. Application en structures en béton imprimé 3D

Les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) marquent une avancée significative dans le domaine du béton imprimé, alliant durabilité et innovations architecturales. Le projet Yhnova, axé sur l'innovation dans le secteur de la construction, vise à démontrer le potentiel de l'impression 3D avec du BFUP à travers la création d'un habitat à la fois écologique et durable, ainsi le délai de réalisation peut également être réduit de moitié (exemple projet tiny house au Danemark (figure I.8)).



Figure I.8: Projet tiny house au Danemark

### I.3. Valorisation des déchets dans les BFUP

Les déchets provenant du secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) comprennent une grande variété de matériaux, tels que les gravats, le béton, le bois, les métaux, les plastiques et les déchets d'emballage. Une gestion efficace de ces déchets est essentielle pour en réduire l'impact environnemental. Dans cette optique, la valorisation des déchets apparaît comme une solution bénéfique.

Les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) se prêtent particulièrement à l'intégration de matériaux recyclés, préservant ainsi leurs propriétés mécaniques tout en répondant aux exigences de durabilité. Des méthodes innovantes, telles que la substitution de des composants de BFUP et en particulier la fumée de silice par des matières recyclées comme la poudre de verre, le granite et les céramiques, montrent un réel potentiel. Non seulement elles permettent de diminuer la quantité de déchets envoyés en décharge, mais elles garantissent également des performances optimales en termes de résistance et de durabilité. Cela pourrait permettre d'atteindre un taux de valorisation de 100%, témoignant d'une évolution vers des pratiques de construction plus durables et respectueuses de l'environnement.

Divers matériaux ont été intégrés dans la formulation des BFUP, parmi ces matériaux existent:

-**Métakaolin**, ce matériau améliore la résistance à la compression en renforçant la microstructure du béton. Des études indiquent qu'un remplacement de 10% à 20% du ciment par du métakaolin peut augmenter la résistance à la compression de 10% à 30% (**Wille et al., 2011**).

-**Cendres volantes**, ces sous-produits issus de la combustion du charbon réduisent le retrait autogène et améliorent la rhéologie du mélange. Leur incorporation à hauteur de 10% à 30% pourrait diminuer le retrait autogène de 50 % (**Wille et al., 2011**).

-**Nano-silice**, ces particules favorisent l'hydratation du ciment et augmentent la compacité.

-**Fillers calcaires et poudre de quartz**, utilisé dans une formulation d'un BFUP. La formulation montre l'effet bénéfique de l'utilisation de ces matériaux sur la résistance en compression (150 et 250 N/mm<sup>2</sup>) et en traction (supérieur à 7 N/mm<sup>2</sup>). Cette formulation est appliquée dans la rénovation d'un ouvrage d'art sur la route reliant Aigle aux Diablerets, sur le secteur Ormont-Dessous / Ormont- Dessus (**TECHNI.CH, 2012**) dont le but de remplacer une étanchéité traditionnelle et améliorer la résistance de la structure à la compression et d'augmenter la résistance en traction.

### I.3.1. Déchets de verres

Les déchets de verre (figure I.8) et les résidus associés proviennent principalement des usages domestiques, industriels et artisanaux, notamment à travers les bouteilles, vitrages, emballages et objets décoratifs. En Algérie, une étude estime qu'ils constituent environ 4% des déchets solides urbains (ASJP, 2021). Ce matériau, non biodégradable, peut rester dans l'environnement indéfiniment s'il n'est pas correctement recyclé ou réutilisé. Son accumulation favorise la pollution et engendre des résidus difficiles à éliminer. Une gestion responsable du verre est donc essentielle pour limiter son impact environnemental et promouvoir une économie circulaire.



Figure I.9: Déchets de verres

En Algérie, on estime que la production annuelle de déchets ménagers atteint environ 13 millions de tonnes, dont près de 520 000 tonnes correspondent au verre (ASJP, 2021). Malgré ses propriétés favorables au recyclage, moins de 7% de ces déchets sont actuellement récupérés et recyclés (El Watan, 2023). Le défi principal réside dans l'absence d'installations de tri sélectif et de systèmes de recyclage efficaces. L'accumulation de déchets de verre dans les décharges entraîne divers problèmes environnementaux, notamment des risques de blessures, une pollution visuelle et la contamination des sols.

Un bon management des déchets de verre permet de réduire l'extraction de matières premières, de diminuer la consommation d'énergie et de limiter les émissions de gaz à effet de serre associés à la production de verre neuf (Vitamedz, 2023). Le recyclage du verre contribue également à la mise en place d'une économie circulaire et crée des emplois, comme l'ont montré certaines initiatives locales qui génèrent des revenus significatifs grâce à la vente de verre recyclé (El Watan, 2023).

L'intégration des déchets de verre dans les matériaux utilisés pour les travaux publics représente une solution novatrice pour valoriser ce type de déchet. Plusieurs études ont révélé que l'ajout de verre recyclé dans la production de béton et d'enrobés bitumineux améliore certaines caractéristiques des matériaux, telles que leur durabilité et leur résistance mécanique (ASJP, 2021). Par exemple, utiliser de la poudre de verre comme additif dans le béton aide à diminuer sa porosité et renforce sa résistance face aux agressions chimiques ainsi qu'aux cycles de gel et de dégel. En outre, l'incorporation de granulats de verre dans les chaussées

améliore le comportement des enrobés, notamment en ce qui concerne leur résistance au fluage et à l'usure (**Vitamedz, 2023**).

La gestion des déchets de verre en Algérie constitue un défi important en raison du faible taux de recyclage et du manque d'infrastructures appropriées. Cependant, l'utilisation de verre recyclé dans le secteur des travaux publics est une piste prometteuse pour valoriser ce déchet tout en atténuant son impact environnemental et en renforçant la durabilité des infrastructures. Une meilleure organisation du tri sélectif et des campagnes de sensibilisation auprès des acteurs du bâtiment et des travaux publics pourraient favoriser un développement durable et une meilleure exploitation de cette ressource secondaire.

### I.3.2. Déchets de céramiques

Les déchets de céramique proviennent principalement des activités de fabrication et de démolition (figure I.9). Ils incluent des morceaux cassés, des chutes de production et des débris issus de la démolition de bâtiments. En Algérie, ces déchets ne cessent d'augmenter en raison du développement du secteur de la construction et de l'utilisation croissante des carreaux, sanitaires et autres éléments en céramique pour l'aménagement intérieur et extérieur (**ASJP, 2021**).



Figure I.9: Déchets de Céramiques

La gestion de ces déchets représente un véritable défi. Abandonnés sur les chantiers ou dans des décharges, ils dégradent le paysage et peuvent contaminer les sols. Malheureusement, le recyclage de la céramique reste limité, bien qu'elle puisse être réutilisée sous forme de granulats pour d'autres applications. Par ailleurs, l'élimination de ces déchets engendre des coûts élevés pour les entreprises, les poussant à rechercher des solutions plus durables (**El Watan, 2023**).

Une bonne gestion des déchets de céramique permettrait de réduire leur impact sur l'environnement et de préserver les ressources naturelles. Plutôt que d'extraire toujours plus de matières premières, il est possible de recycler ces déchets et de leur donner une seconde vie. Cette approche ouvre aussi la porte à de nouvelles opportunités économiques, notamment en développant des matériaux recyclés pour le béton ou d'autres produits de construction innovants (**Vitamedz, 2023**).

Les déchets de céramique peuvent être valorisés dans le domaine des travaux publics. Incorporés dans le béton ou l'asphalte, ils contribuent à renforcer la résistance et la durabilité des infrastructures (ASJP, 2021). Ils peuvent aussi être utilisés dans le revêtement des routes, où ils améliorent la résistance à l'usure et aux intempéries. De plus, la poussière de céramique intégrée dans le béton permet de réduire sa porosité et d'accroître sa résistance aux agents chimiques (Vitamedz, 2023).

Gérer efficacement les déchets de céramique en Algérie représente un double avantage : réduire les nuisances environnementales tout en développant des matériaux performants et durables. En adoptant des pratiques de tri, de recyclage et de réutilisation, il est possible de limiter le gaspillage et de favoriser une approche plus responsable dans le secteur de la construction. Miser sur cette valorisation, c'est non seulement protéger notre environnement, mais aussi encourager une économie circulaire et durable.

### I.3.3. Déchets de granite

Les déchets de granite résultent principalement de l'extraction en carrière, des opérations de découpe et de polissage des pierres, ainsi que de la démolition d'ouvrages en granite (figure I.10). Ils se déclinent sous plusieurs formes, allant des blocs et gravats jusqu'à la fine poussière issue du façonnage. En Algérie, leur production annuelle atteint des niveaux alarmants, s'élevant à plusieurs millions de tonnes. Cette problématique s'intensifie avec l'essor continu du secteur de la construction, dont la croissance avoisine les 7.4% par an, et l'augmentation de l'usage du granite dans les infrastructures urbaines, représentant environ 15% des matériaux employés dans le bâtiment (ASJP, 2021). Face à cette situation, une gestion efficace de ces déchets s'impose pour limiter leur impact écologique et favoriser une valorisation optimale des ressources.



Figure I.10: Déchets de granites

La gestion des déchets de granite représente un véritable défi environnemental en Algérie. Chaque année, environ 3 millions de tonnes de ces déchets s'accumulent, principalement issus des carrières et des chantiers de construction. Cette accumulation ne se contente pas de dégrader les paysages; elle pollue également les sols, impactant ainsi l'environnement local. De plus, le manque d'infrastructures et de systèmes de recyclage adéquats empêche de tirer parti de ce matériau qui pourrait autrement être valorisé. Cette situation engendre des coûts significatifs liés à l'élimination des déchets, qui pourraient représenter jusqu'à 20% des dépenses totales pour les entreprises du secteur de la construction (**El Watan, 2023**).

Mettre en place une gestion efficace des déchets de granite peut faire une réelle différence. En réduisant l'accumulation de ces déchets dans les carrières, on pourrait diminuer leur impact environnemental de **50%**, tout en facilitant une meilleure utilisation des ressources naturelles disponibles. Le recyclage de ces déchets est crucial pour limiter l'extraction de nouvelles pierres, ce qui aide à protéger nos écosystèmes.

En outre, la valorisation des déchets de granite pourrait ouvrir la voie à de nouvelles opportunités économiques. Par exemple, en développant des produits comme des granulats recyclés, on pourrait répondre à près de 30% de la demande en matériaux pour la construction. Cela non seulement favoriserait l'innovation, mais pourrait également créer des emplois dans le secteur.

En somme, en adoptant des pratiques de recyclage et de gestion durable, l'Algérie pourrait non seulement atténuer les effets négatifs de l'accumulation des déchets de granite, mais aussi construire une économie circulaire plus forte et résiliente, au bénéfice de notre environnement et de notre société.

Les déchets de granite présentent un potentiel élevé pour le développement de matériaux utilisés dans les travaux publics. Lorsqu'ils sont incorporés dans le béton, ils améliorent sa résistance mécanique et sa durabilité (**ASJP, 2021**). Les granulats recyclés de granite sont également utilisés dans les revêtements de chaussées et les infrastructures routières, où ils renforcent la résistance à l'usure et aux conditions climatiques difficiles. De plus, l'ajout de poudre de granite dans les formulations de béton optimise les performances, en réduisant la porosité et en renforçant la résistance aux agressions chimiques (**Vitamedz, 2023**).

La gestion des déchets de granite en Algérie représente à la fois une opportunité écologique et économique. En promouvant leur valorisation dans le secteur des travaux publics, il est possible de diminuer leur impact environnemental tout en développant de nouveaux matériaux de haute performance. Une stratégie de gestion efficace, englobant le tri, le traitement et l'intégration des déchets de granite dans les projets de construction, pourrait aboutir à une utilisation plus durable des ressources et à un développement plus responsable du secteur du bâtiment et des travaux publics.

#### **I.3.4. Utilisation des déchets comme ajout dans la formulation des BFUP**

Le remplacement partiel ou total des ultrafines par d'autres additions et en particulier les ajouts recyclés, rend la formulation peu coûteuses et écologiques et limite l'utilisation des fumées de silice. Ces additions améliorent la rhéologie du mélange et forment des produits d'hydratation par leur effet pozzoulanique (**Amanjean, 2015**).

Parmi les additions utilisé comme ultrafine dans les BFUP d'après les travaux de recherche, on trouve le quartz broyé, qui a été utilisé comme addition pozzoulanique qui remplace

La fumée de silice (**Soliman, 2016**), et, plus récemment, le métakaolin (**Tafraoui et al., 2009**). Le quartz broyé est indispensable pour les traitements thermiques d'après **Richard et Cheyrezy (1995)**, cet ajout favorise remarquablement les résistances en compression par +8.2%, grâce à l'apparition de nouvelles phases hydratées sous haute température (**Tafraoui et al., 2009**). Le métakaolin obtenue par calcination du kaolinite a une température entre 600 à 800°C, il contribue à l'amélioration des résistances mécaniques des BFUP grâce l'effet filler, effet d'accélération des réactions d'hydratation du ciment par germination, et effet pozzoulanique par consommation de la portlandite (**Kinuthia et al., 2000**).

Le remplacement total de la fumée de silice par le metakaolin donne des résistances en compression varient de 155 MPa à moyen terme et a 175 MPa à long terme selon **Rougeau et Borys (2004)**, par contre **Tafraoui (2009)** a montré l'effet négatif de l'utilisation du metakaolin sur la résistance en compression par rapport à un BFUP de référence et une légère amélioration sur la résistance en traction par flexion.

A part ces travaux sur l'utilisation des ajouts comme remplacement de la fumée de silice, il n'existe pas des travaux antérieurs sur le remplacement partiel ou total de la fumée de silice par des ajouts recyclés comme les fillers de déchets de verres, céramiques et granites l'objet de cette thèse.

#### **I.4. Conclusion**

Il a été présenté dans ce chapitre une recherche bibliographique sur les bétons fibres a ultra-hautes performance, en mettant le point sur les différents constituant de ce matériau, leur propriétés a l'état frais et les performances mécaniques a l'état durci. Les paramètres de durabilité ont été également abordés. Leur formulation, fabrication et mise en œuvre ainsi que les différents domaines d'applications ont été détaillés.

Nous avons signalé également l'importance de déchet de verre, céramique et granite et quelques travaux antérieurs sur l'utilisation des matériaux recyclés dans les BFUP.

Cette recherche bibliographique nous on permet de donner des informations sur les BFUP et les différents caractéristiques et constituant de ce matériau.

## **CHAPITRE II**

---

*Caractérisation des matériaux et mise au point de la formulation*

## II. Caractérisation des matériaux et mise au point de la formulation

### II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble des matériaux utilisés dans ce travail à savoir les matériaux de bases (ciment, fumée de silice, sable, adjuvant, fibres de polypropylène et eau) et les matériaux élaborés (fillers recyclés de verre, céramique et granite).

Nous avons également présenté l'étude de mise au point de la formulation, comprenant la sélection des matériaux utilisés et identifiées la formulation de référence la plus prometteuse.

### II.2. Formulation des BFUP

Les BFUP se distinguent des bétons à hautes performances et à très hautes performances par leurs résistances caractéristiques en compression supérieures à 130 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).

La formulation de BFUP fait appel à l'utilisation de matériaux aux caractéristiques bien spécifiques. La matrice cimentaire des BFUP est composée d'une grande quantité de ciment, de super-plastifiant, de fumée de silice, et de sable fin dont la taille du diamètre maximal est comprise entre 0.5 et 1 mm. Un dosage important en fibres, supérieur ou égal à 2% volumique, est généralement incorporé dans la matrice afin d'améliorer la résistance en traction et la ductilité du matériau.

A l'heure actuelle, il n'existe pas de méthode générale de formulation des BFUP, mais plutôt des principes. Donc l'objectif est de trouver une formulation spécifique à base des matériaux locaux, en se basant sur des travaux antérieurs et des recommandations de l'AFGC (AFGC, 2002, 2013) et de la prénorme (PR NF P18-470) en termes de performances mécaniques et de durabilité.

#### II.2.1. Choix de la formulation

Les formulations types des BFUP sont généralement établies empiriquement, en s'appuyant sur quelques principes proposés par **Richard et Cheyrezy (1995)**, et **De Larrard et Sedran (1994)** et des critères de l'AFGC, ces formulations se basent sur différents critères :

- Réduction du rapport Eau/Liant (E/L),
- Amélioration de l'homogénéité du mélange en réduisant la taille des grains inertes (granulats),
- Augmentation de la teneur en fines (ciment et additions),
- Amélioration et optimisation de la compacité du squelette granulaire, ajout de fibres afin d'améliorer la ductilité du béton ( $\geq 2\%$  volumique),
- Amélioration éventuelle de la microstructure par traitement thermique.

### II.2.1.1 Etude préliminaire

Dans le but de valider le choix des matériaux pour la confection des BFUP, une étude préliminaire a été effectuée en se basant sur des travaux antérieurs et des normes. Pour aller à cet objectif nous avons ciblé et traité en première étape deux formulations Ductal et CEMTEC (tableau II.1) en matière de coût.

Tableau II.1: Compositions des deux formulations et prix des matériaux

Formulations	Ductal	CEMTEC	Prix unitaire (DA)
Ciment CEMI 52.5R (Kg/m <sup>3</sup> )	712	1050	10
Fumée de silice (Kg/m <sup>3</sup> )	231	268	75
Quartz broyé (Kg/m <sup>3</sup> )	211	--	3
Sable fin (100-300 µm) (Kg/m <sup>3</sup> )	1020	514	2
Adjuvants	60.7	44	180
Fibres métalliques	156	858	420
Pourcentage volumique de fibres (%)	2	11	--
Traitement thermique	90°C	non	--
Rapport E/C	0.2	0.2	--

Dans le cas du Ductal, nous pouvons noter une teneur inférieure en ciment par rapport au CEMTEC, les résistances mécaniques élevées étant obtenues grâce à l'application d'un traitement thermique à 90°C. La fumée de silice est utilisée dans les deux formulations citées, à une teneur de 15 à 32% de la masse de ciment. La teneur volumique en fibres est de 2 à 11%. Le rapport eau/ciment est réduit à une valeur de 0.2, ce qui justifié l'utilisation d'une grande quantité de super plastifiant pour maintenir l'ouvrabilité. Enfin, les sables fins sont privilégiés dans les deux cas.

Les résultants qui donnent le coût de chaque formulation sont présentés dans le tableau II.2.

Tableau II.2: Coût de composition 1m<sup>3</sup> des deux formulations

Formulations	Ductal	CEMTEC
Ciment CEMI 52.5R (Kg/m <sup>3</sup> )	7120	10500
Fumée de silice (Kg/m <sup>3</sup> )	17325	20100
Quartz broyé (Kg/m <sup>3</sup> )	633	--
Sable fin (100-300 µm) (Kg/m <sup>3</sup> )	2040	1018
Adjuvants	10926	7920
Fibres métalliques	65520	360360
Pourcentage volumique de fibres (%)	2	11
Traitement thermique	90°C	non
Rapport E/C	0.2	0.2
<b>Coût global DA</b>	<b>103564</b>	<b>399898</b>

D'après le tableau II.2, le coût des deux bétons est très élevé par rapport à un béton ordinaire, néanmoins, les avantages économiques de l'utilisation des BFUP résident en la capacité de réaliser des structures plus fines et plus élancées avec une réduction importante du volume de

matériau. La formulation Ductal donne le plus faible coût en comparaison avec la formulation CEMTEC.

Comme conclusion, l'étude montre le coût élevé des deux formulations par rapport à un béton ordinaire, et la formulation Ductal est la plus économique.

Une première composition (tableau II.3) a été testé établi avec des matériaux locaux, un mélange de sable de carrière et sable de dune, deux types de gravier 4/8 et 8/16 selon **Guiraud (2016)**, un ciment CPA-CEM I 42.5 de la cimenterie de Biskra, un adjuvant super plastifiant, des fibres de polypropylène, fumée de silice et l'eau potable avec un rapport E/C= 0.28. Les essais réalisés sur le mélange **F1** à l'état frais sont ; la mesure de la densité et l'ouvrabilité par l'étalement au cône d'Abrahams et à l'état durci, sont mesure de la résistance en compression et en traction à l'âge 28jours.

Tableau II.3: Formulations **F1** de mélange

Formulations	Quantités
Ciment CEMI 42.5 en Kg/m <sup>3</sup>	850
Fumée de silice en Kg/m <sup>3</sup>	38.25
Sable de dune en Kg/m <sup>3</sup>	183
Sable concassé en Kg/m <sup>3</sup>	434
Gravier 4/8 en Kg/m <sup>3</sup>	311
Gravier 8/16 en Kg/m <sup>3</sup>	311
Fibres polypropylène	9
Super-plastifiant	8.5
Eau en Kg/m <sup>3</sup>	238
Rapport E/C	0.28

Le malaxage a été faite dans une bétonnière de type B132, le volume de la cuve est de 132L (figure II.1), l'introduction des matériaux dans la cuve est; gros éléments, ciment mélangé avec la fumée de silice ensuite fibres et petits éléments ensuite malaxage à sec pendant 1 minute et introduction de l'eau est l'adjuvant et malaxage pendant 7minutes. Les résultats de cette variante sont présentés dans le tableau II.4.



Figure II.1: Bétonnière

Tableau II.4: Résultat des essais de caractérisation du BFUP de la formulation **F1**

Désignations	Résultats
Densité en g/cm <sup>3</sup>	2.350
Étalement en mm	240
Résistance en compression en MPa	100
Résistance en traction par flexion en MPa	6.2

La masse volumique du BFUP frais est mesurée conformément à la norme **EN 12350-6**, elle est de l'ordre de **2.350g/cm<sup>3</sup>**, ce résultat conforme au prescription de cette norme.

Le BFUP doit rester homogène et ne doit pas présenter de ségrégation des fibres ni d'une fraction solide des constituants compte tenu des moyens de mise en œuvre ce qui est observé après malaxage du béton. L'étalement obtenu est de 240mm, valeur inférieure à la valeur cible des BFUP qui est de 660 à 760mm (**NF EN 12350-8**).

La résistance en compression obtenue est de 100MPa, valeur inférieure à la résistance caractéristique à la compression à 28 jours qui est de l'ordre de 130 MPa et pouvant aller jusqu'à 250 MPa (**AFGC, 2002 et 2013**).

Les BFUP doivent avoir une valeur caractéristique en traction à 28 jours supérieure à 6.00 MPa selon la norme (**NF P 18-470**). Nous avons obtenues une résistance de 6.2 MPa qui est satisfaisante.

Comme conclusion, du point de vue ouvrabilité et résistance en compression, cette formulation ne donne pas des résultats satisfaisants. Pour atteindre l'ouvrabilité souhaitée, il faut que le sable soit choisi pour sa composition minérale (teneur en SiO<sub>2</sub> ≥ 98 %), la taille moyenne de ses grains (généralement entre 400 et 600µm) et leur forme (forme arrondie) (**AFGC, 2002 et 2013**).

Pour atteindre la résistance en compression caractéristique à l'âge 28jours il faut remplacer le CEMI 42.5 par un CEMI de classe 52.5.

Pour continuer la recherche d'une formulation qui répond aux prescriptions des normes, deux autres compositions ont été testés en même temps (formulation **F2** et **F3**). Le choix de ces formulations est basé sur une étude bibliographique et quelque recommandation et des formules proposées par des entreprises telles que (Ductal, BSI, CEMTEC) (**Amanjean, 2015**).

Pour réaliser ces formulations nous avons utilisées un sable local de dune de nature siliceux de classe 0/1 de la région d'Oued Zhor-Skikda, un CEMI de classe 52.5 de la cimenterie d'Ain Kbir, fumée de silice come ultrafines, des fibres de polypropylène (BASF) de longueur 7mm et un adjuvant super plastifiant master gulonium 26. Dans le tableau II.5, on donne les compositions des deux formulations.

Tableau II.5: Composition des mélanges des deux formulations choisis (**F2** et **F3**)

Désignations	Formulation F2	Formulation F3
CEMI 52.5 en kg/m <sup>3</sup>	950	950
Sable fin en kg/m <sup>3</sup>	950	1010
Fumé de silice en kg/m <sup>3</sup>	130	130
Fibres en kg/m <sup>3</sup>	9	9
Adjuvant en kg/m <sup>3</sup>	25	30
Eau en kg/m <sup>3</sup>	250	220

Le malaxage pour les deux formulations se fait dans un malaxeur à axe vertical du laboratoire LNHC de Skikda (figure II.2), l'introduction des matériaux dans la cuve et le procédé de malaxage n'est pas le même pour les deux formulations.



Figure II.2: Malaxeur à béton à axe vertical

- Pour la formulation **F2**, la méthode de l'introduction des matériaux et malaxage est comme suit:

- Pré-malaxage des matériaux secs et fibres pendant 1 minute,
- Ajout d'un mélange d'eau et du super plastifiant,
- Malaxage humide pendant 5 minutes à vitesse rapide (4.17 tours/s). Le temps de malaxage total obtenu avec ce malaxeur est de 10 minutes environ.

- Pour la formulation **F3**, la méthode de l'introduction des matériaux et malaxage est:

- Pré-malaxage du sable et fibres pendant 3 minutes,
- Introduction du ciment et fumée de silice et malaxage pendant 2 minutes,
- Introduction d'une partie de l'eau et malaxage pendant 1 minute,

- Ajout du reste de l'eau et du super plastifiant et malaxage pendant 8 minutes,
- Le temps de malaxage total obtenu avec ce malaxeur est de 14 minutes environ.

Les essais réalisées sur les mélanges sont, mesure de l'étalement au cône d'Abrams (figure II.3), résistance en compression et en traction par flexion a 2 et 28 jours sur des éprouvettes cubiques de dimension 10x10x10 cm<sup>3</sup> et des éprouvettes prismatiques de dimension 4x4x16 cm<sup>3</sup>.

Les résultats obtenus sur l'étalement (figure II.4), montre que la diminution du rapport E/C (0.26 pour la formulation **F2** a 0.23 pour la formulation **F3**) entraîne une diminution de l'étalement, ces résultats ne rentrent pas dans la fourchette des BFUP.



Figure II.3: Etallement au cône d'Abrams

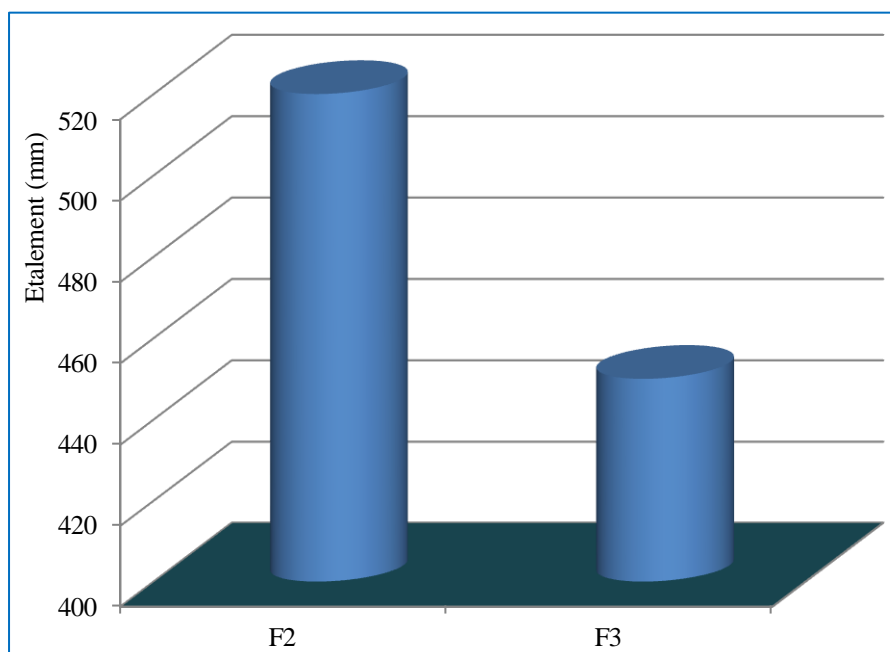


Figure II.4: Etallement pour les deux formulations

La résistance en compression pour la formulation **F3** est plus élevée en comparaison avec la formulation **F2** (figure II.5), on constate une augmentation de 32% à 2 jours et 53% à 28 jours. Cette augmentation est due à la diminution du rapport E/C (**Dreux et Feasta, 1996**). La résistance en compression augmente avec l'âge pour les deux formulations, la variation est plus marquée à l'âge 28 jours.

La résistance en traction par flexion minimale est de 6 MPa enregistré à l'âge 2 jours pour la formulation **F2**, la diminution du rapport E/C engendre une augmentation de cette résistance à une valeur de 15 MPa (figure II.6). La formulation **F3** donne une résistance très élevées en traction qui est de l'ordre de 25 MPa en comparaison avec la formulation **F2** (15MPa) a l'âge 28 jours.

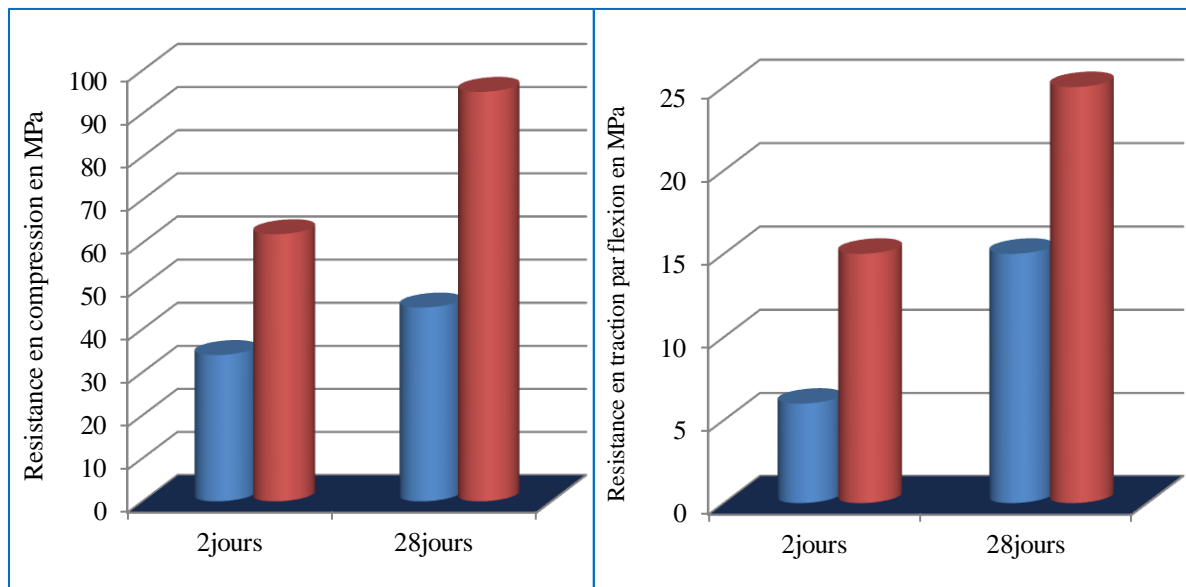


Figure II.5: Résistance en compression Figure II.6: Résistance en traction par flexion

D'après les résultats obtenus on peut dire que les deux formulations ne répondent pas aux exigences des normes des BFUP ni du point de vue ouvrabilité ni résistance en compression, il est donc nécessaire d'augmenter la teneur en liants on réduisant ainsi le rapport E/L. Il faut réviser aussi la méthode de malaxage et la procédure d'introduction des matériaux dans le malaxeur et choisir un malaxeur un peu puissant a forte capacité de cisaillement pour diminuer le temps de malaxage.

### II.2.1.2. Choix des composants

Pour atteindre la formulation optimale (formulation **F4**) nous avons choisi les matériaux de base cités ci-dessous.

#### a. Sable de dune

-Sable de dune (SD) siliceux de nature de classe 0/1 (figure II.7), d'origine Oued Zhor-Skikda, de bonne répartition granulométrique (figure II.8), ces propriétés sont données par le tableau II.6.



Figure II.7: Sable de dune

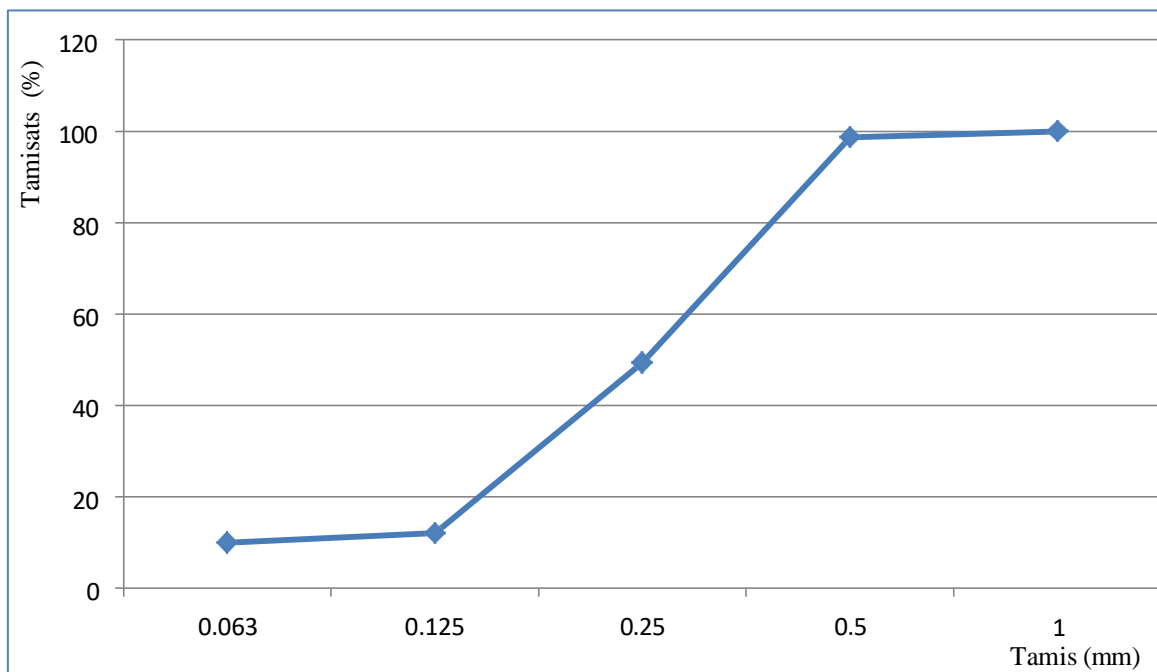


Figure II.8: Courbe granulométrique du sable de dune

Tableau II.6: Propriétés du sable SD

Propriétés	Valeur
Masse volumique apparente $\text{g/cm}^3$	1.541
Masse volumique apparente $\text{g/cm}^3$	2.650
Absorption %	1.49
VB %	1.10
ES %	75.29
Mf	1.39
Teneur en silice ( $\text{SiO}_2$ )%	98

### b. Ciment

Ciment CEM II/A-L 52.5N fourni par la cimenterie LAFARG, M'sila (figure II.9).



Figure II.9 : CEM II/A-L 52.5N (M'Sila)

### c. Fumée de silice

Fumée de silice TEKNA CHEM (figure II.10) de couleur argent, insoluble dans l'eau de granulométrie 0.05 à 0.15  $\mu\text{m}$ , composé de particule sphérique amorphe de  $\text{SiO}_2$  (**Fiche technique, (Siltek Powder TEKNACHEM, 2022)**).

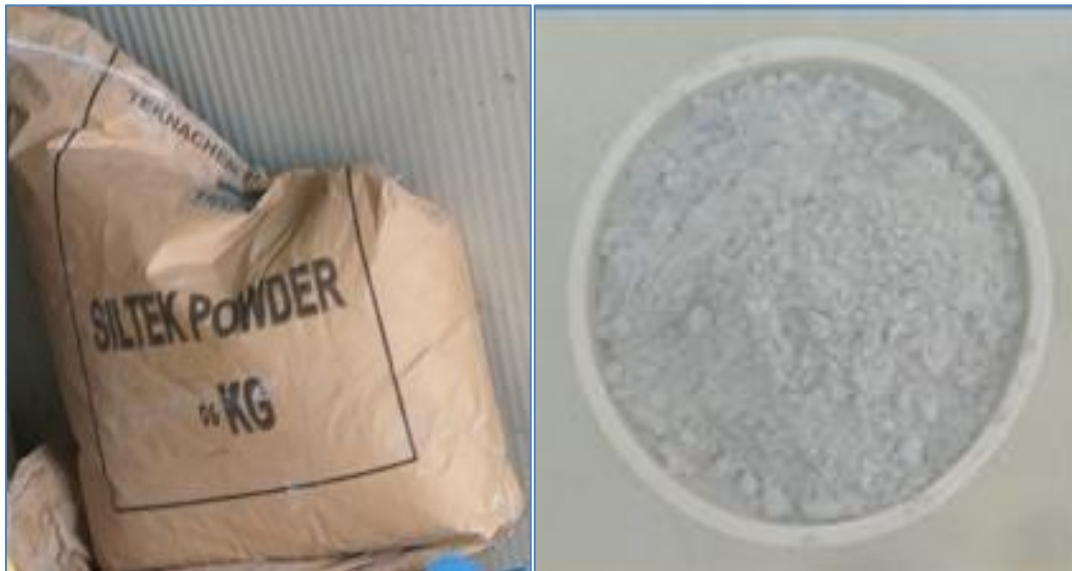


Figure II.10: Fumée de silice

Dans le tableau II.7 on donne les propriétés du ciment et du fumée de silice.

Tableau II.7: Propriétés de ciment et fumée de silice

Propriétés	CEM II 52.5	Fumé de silice FS
Densité absolue (g/cm <sup>3</sup> )	3.10	2.200
Finesse (cm <sup>2</sup> /g)	3600	220000
CaO (%)	62.30	0.5
SiO <sub>2</sub> (%)	19.20	95.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6.25	0.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.30	1
MgO (%)	2.00	1
K <sub>2</sub> O (%)	0.71	0.5
Na <sub>2</sub> O (%)	0.10	-
Cl (%)	0.1	--
SO <sub>3</sub> (%)	3.00	

#### d. Fibres de polypropylène

Fibres de polypropylène spéciale pour béton de type Sika® Fibre 12-34 de haute qualité spécialement traitées pour faciliter leur dispersion, de longueur 12 mm et diamètre 34 um et point de fusion a 160°C, sa masse volumique est de 0.9g/cm<sup>3</sup> (figure II.11) (Sika® Fibre 12-34, 2020).



Figure II.11: Fibres de polypropylène

#### e. Adjuvant

-Adjuvant super-plastifiant de type Master Glenium 26 de densité 1.08 g/cm<sup>3</sup> de couleur marron. Particulièrement recommandé pour la fabrication de bétons à faible E/C, à très long maintien d'ouvrabilité et aux performances mécaniques élevées à jeune âge. Ces propriétés sont données par le tableau II.8.

Tableau II.8: Propriétés du super plastifiant

Densité	pH	Extrait sec	Teneur en ions chlorures	Na <sub>2</sub> O
1.085 ± 0,02	5 ± 1.5	30 ± 1.5 (%)	< 0,1 (% Cl <sup>-</sup> )	<2(%)

#### f. Eau de gâchage

Eau de gâchage est l'eau potable du robinet de la zone industriel Sonatrach, ces analyses chimiques sont données par le tableau II.9, montent la conformité au prescription de la norme NF EN 1008.

Tableau II.9: Composition chimique de l'eau

Désignations	Quantités
Détergents	Absence de mousses
Matières en suspension	<4
Acides	7.892
Teneur maximale en chlorure (Cl <sup>-</sup> ) mg/l	255.6
Teneur maximale en sulfate (SO <sub>4</sub> ) mg/l	67.39

#### II.2.1. 3. Adoption de la formulation F4

La formulation **F4** testée est donnée par le tableau II.10.

Tableau II.10: Composition des mélanges de la formulation **F4** choisie

Désignations	Quantités
CEMII 52.5 en kg/m <sup>3</sup>	900
Sable de dune (SD) en kg/m <sup>3</sup>	980
Fumée de silice (FS) en kg/m <sup>3</sup>	225
Fibres de polypropylène (FP) en kg/m <sup>3</sup>	9
Super plastifiant (SP) en kg/m <sup>3</sup>	178
Eau (E) en kg/m <sup>3</sup>	63

**Patrick (2018)** a montré que pour la production des BFUP exige des malaxeurs à fort gradient de cisaillement et à haute capacité de dispersion, ci pour cette raison que le malaxeur utilisé dans cette formulation est un malaxeur à axe horizontal de type HJW-60 de capacité 96 litres et de vitesse de 45 tours par minute (figure II.12) et l'introduction des matériaux dans la cuve sera comme suit :

- Introduction du sable,
- Introduction du ciment et fumée de silice,
- Malaxage à sec ensuite introduction de l'eau et malaxage humide pendant 3 minutes,
- Introduction des fibres ensuite l'eau mélangée avec l'adjuvant et malaxage pendant 12 minutes, le temps total de malaxage est de 15 minutes.



Figure II.12: Malaxeur **HJW-60**

Les essais réalisés sur cette formulation, sont mesure de l'étalement au mini cône et les résistances en compression sur éprouvettes cubiques de dimension  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  et en traction par flexion sur éprouvettes prismatiques de dimension  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ . Les résultats obtenus sont donnés par le tableau II.11.

Tableau II.11: Résultat des essais de caractérisation du BFUP de la formulation **F4**

Désignations	Résultats
Etalement au mini cône en cm	23
Résistance en compression a 7 jours en MPa	163.99
Résistance en compression 28 jours en MPa	176.76
Résistance en traction par flexion a 7 jours en MPa	16
Résistance en traction par flexion a 28 jours en MPa	22

Les résultats obtenus montrent un étalement satisfaisant (23 cm) répond à la prescription de la norme ASTM C230/C230M des BFUP. La résistance en compression est de 176.76 MPa à l'âge 28 jours supérieurs à 130 MPa selon la norme NF EN 12390-3 et la résistance en traction par flexion est de 22 MPa à l'âge 28 jours supérieurs à 6 MPa (valeur minimale donnée par la norme NF EN 12390-5).

La formulation **F4** a été retenue car elle répond pleinement aux **critères normatifs des BFUP**, aussi bien en termes **d'ouvrabilité** que de **résistances mécaniques élevées**, ce qui en fait un choix optimal pour la suite des études ou applications.

### II.3. Caractérisations des matériaux élaborés

Les matériaux élaborés recyclés utilisés dans cette étude expérimentale sont:

- Fillers de déchets de verre (FV), obtenue par concassage et broyage chute de verre plat et bouteilles;
- Fillers de déchets de céramique (FC), obtenue par concassage des chutes des lavabos, éviers de cuisine et sièges jetés;
- Fillers de déchets de granite (FG), ces fillers sont données par le concassage et broyage de chutes de granité utilisé dans le revêtement.

Le broyage a été fait dans un broyeur à boulet de capacité 10 kg dans une durée de 8 heures pour avoir la finesse voulue. La figure II.13 et II.14 donne les différents types de fillers recyclées et les déchets avant broyage.

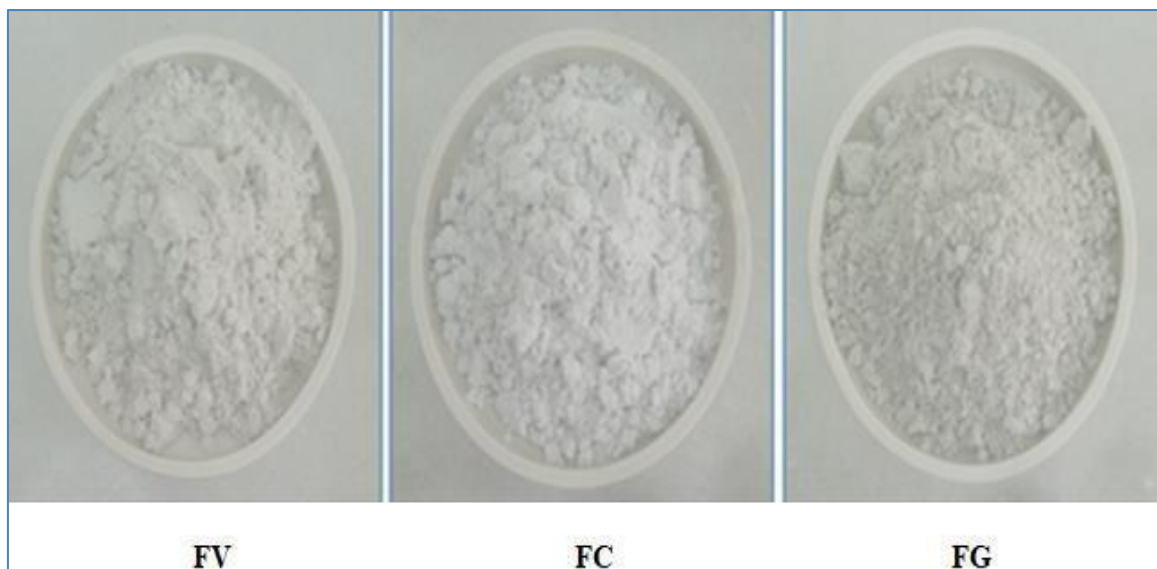


Déchets de verre

Déchets de céramique

Déchets de granite

Figure II.13: Déchets de verre, céramique et granite



FV

FC

FG

Figure II.14: Fillers recyclées

Dans le tableau II.12, on présente les différentes propriétés des fillers recyclés.

Tableau II.12: Propriétés des fillers recyclés

Désignations	Fillers de verre FV	Fillers de céramique FC	Fillers de granite FG
Densité absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.57	2.41	2.57
SSb (cm <sup>2</sup> /g)	2246	2984	5459
Absorption (%)	5.67	7.33	6.67
CaO (%)	8.09	1.24	1.05
SiO <sub>2</sub> (%)	68.43	63.15	71.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.41	25.03	13.46
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.00	1.17	1.05
MgO (%)	2.48	0.33	0.58
K <sub>2</sub> O (%)	0.38	1.46	3.92
Na <sub>2</sub> O (%)	17.32	1.97	5.02
Cl (%)	0.00	0.01	0.00
SO <sub>3</sub> (%)	0.08	0.02	0.04

### II.3.1. Comparaison entre les différentes caractéristiques des matériaux

En comparaison des résultats des essais de caractérisations des matériaux, on peut dire que:

-Les trois types de fillers ont des densités absolues supérieures à celui de la fumée de silice, la densité des fillers recyclés de déchets de céramique est plus faible par rapport à la densité des fillers de déchets de verre et granite qui sont similaires. Une densité faible rend le béton plus léger,

-Les fillers de déchets de céramique absorbent plus d'eau en comparaison avec les fillers de déchets granite (6.67%) et les fillers de déchets de verre (5.67%) respectivement. Un coefficient d'absorption élevé augmente la demande en eau et affecte négativement la durabilité du béton (**Dreux et Fiesta, 1996**),

-La fumée de silice a une surface spécifique très élevée cette caractéristique permet de capter et fixer l'hydrate de calcium (Ca(OH)) et le transformer en un premier temps en silicate hydraté et successivement en silicate de calcium stable et insoluble (**Siltek Powder TEKNACHEM, Abrasifs supérieurs henan, 2022**),

-La surface spécifique de Blaine des fillers de déchets de granite supérieure à celui des fillers de déchets de céramique et verre respectivement, une finesse élevée diminue la porosité, accélère la réaction d'hydratation par contre augmente la demande en eau (**Dreux et Feasta, 1996**),

-D'après les analyses chimiques, on constate que les ajouts recyclés composés essentiellement de silice il est de l'ordre de 71.19% pour les fillers de granite, 68.43% pour les fillers de verre et 63.15% pour les fillers de céramique. Ces ajouts permettent de ralentir le durcissement et augmente les résistances à moyen et à long terme et améliore la durabilité du béton (**Dreux et Feasta, 1996**),

-Les fillers de verre contient 8.09% de CaO, cet élément est responsable a la cohésion de la matrice cimentaire et engendre une élévation des résistances mécanique au jeune âge, en plus de CaO il existe 17.32% de Na<sub>2</sub>O, cet élément accélère l'hydratation du ciment au jeune âge (**Schwarz et Neithalath, 2008**). Les alcalis ralentissent l'hydratation des principaux minéraux et provoquent la diminution des résistances (**Benguedouar, 2013**),

-La présence de l'alumine dans les fillers de céramique 25.03% et granite 13.46% contribue la prise du béton et influe négativement sur la stabilité chimique et favorise l'attaqué par les sulfates (**Rihia et al., 2020**).

- Les autres éléments tels que le K<sub>2</sub>O, MgO, Cl et SO<sub>3</sub>, se trouvent en faibles quantités et n'influe pas sur la qualité du béton.

## II.4. Conclusion

Deux points ont été ciblés dans ce chapitre:

-Le premier point est de trouvé une formulation spécifique à base des matériaux locaux, cette formulation est considérée comme une formulation de référence utilisé dans le reste du programme expérimental.

-Le deuxième point est la caractérisation de l'ensemble des matériaux utilisés à savoir les matériaux de base (sable, ciment, fumée de silice, fibres et adjuvant) et les matériaux élaborés (fillers recyclés de verre, céramique et granite). D'après les résultats des essais de caractérisation on peut conclure:

-Les trois types de fillers ont des densités absolues supérieures à celui de la fumée de silice,

-Les fillers de déchets de céramique absorbent plus d'eau en comparaison avec les fillers de déchets granite et les fillers de déchets de verre respectivement,

-La fumée de silice a une surface spécifique très élevée en comparaison avec le ciment et les fillers recyclées,

-La surface spécifique de Blaine des fillers de déchets de granite est supérieure à celui des fillers de déchets de céramique et verre respectivement,

-La teneur en alumine est très élevée dans les fillers de céramiques et granite respectivement.

## **CHAPITRE III**

---

*Programme expérimental et méthodologie  
d'essais*

### III. Programme expérimental et méthodologie d'essais

#### III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons le programme expérimental, la formulation de référence ainsi que les différentes formulations retenues. Il indique également les paramètres fixes et variables de l'étude, les méthodes de fabrication des mélanges et une description détaillée de l'ensemble des essais réalisés sur les différentes formulations à l'état frais (densité, ouvrabilité et teneur en air occlus) et à l'état durci (résistances en compression et en traction par flexion avec et sans traitement thermique, les essais non destructifs, et les essais de durabilité, absorption capillaire et par immersion, porosité accessible à l'eau et pénétration des chlorures).

#### III.2. Programme expérimental

L'objectif de ce travail est de trouver une formule spécifique d'un BFUP à base de ciment et granulats locaux. Ensuite, nous procédons à la substitution des fumées de silice de la formulation adoptée par des ajouts recyclés (fillers de déchets de verre, céramique et granite) avec des taux de 10 et 20%, au-delà de 20 %, les performances diminuent nettement (perte de réactivité pouzzolanique), ce qui limite l'intérêt technique (**Boulekbache et al. 2010**).

La formulation du BFUP témoin est fixée par des essais préliminaires d'ouvrabilité, compression et traction par flexions sur plusieurs mélanges (chapitre 2) on se basant sur des principes de la norme **P 18-470 (2016)** et l'**AFGC (2013)** et quelques formulations industrielles tel que (la formulation utilisée dans le chantier d'Ormont-dessus (**Antille, 2012**), Ductal® (**Guiraud, 2018**) et le BSI® développé par Eiffage, etc...)

Pour obtenir la formulation témoins, nous avons fixé la quantité du sable et du ciment. La teneur en fumée de silice est de l'ordre de 25% et la teneur en fibre de polypropylène est de 1% et le dosage en super plastifiant de 4.4%.

Les formulations retenues sont obtenue par la substitution volumique des fumées de silice par 10 et 20% de fillers recyclés. Sept formulations ont été retenues (la formulation de référence BFUP (0%), la formulation à base de fillers de verre recyclées BFUPV, la formulation à base de fillers de céramique recyclées BFUPC et la formulation à base de fillers de granite recyclées BFUPG).

##### III.2.1. Composition des mélanges

Les différentes compositions des mélanges des BFUP sont présentées dans le tableau III.1. Les paramètres fixes sont:

- Dosage en ciment,
- Dosage en sable,
- Dosage en eau,
- Dosage en adjuvant,
- Dosage en fibres.

Les paramètres variables sont les taux de substitution des fumées de silice par des fillers recyclés de déchets de verre, céramique et granite.

Tableau III.1: Différentes compositions utilisées dans l'étude

Notation	Type de béton
<b>BFUP(0%)</b>	BFUP témoin à base de CEM II et 100% fumée de silice, sable roulé, fibres de polypropylène et super plastifiant.
<b>BFUPV(10%)</b>	BFUP témoin à base de CEM II et 90% fumée de silice et 10% fillers de verres recyclées, sable roulé, fibres de polypropylène et super plastifiant.
<b>BFUPV(20%)</b>	BFUP témoin à base de CEM II et 80% fumée de silice et 20% fillers de verres recyclées, sable roulé, fibres de polypropylène et super plastifiant.
<b>BFUPC(10%)</b>	BFUP témoin à base de CEM II et 90% fumée de silice et 10% fillers de céramique recyclées, sable roulé, fibres de polypropylène et super plastifiant.
<b>BFUPC(20%)</b>	BFUP témoin à base de CEM II et 80% fumée de silice et 20% fillers de céramique recyclées, sable roulé, fibres de polypropylène et super plastifiant.
<b>BFUPG(10%)</b>	BFUP témoin à base de CEM II et 90% fumée de silice et 10% fillers de granite recyclées, sable roulé, fibres de polypropylène et super plastifiant.
<b>BFUPG(20%)</b>	BFUP témoin à base de CEM II et 80% fumée de silice et 20% fillers de granite recyclées, sable roulé, fibres de polypropylène et super plastifiant.

✓ **Essais réalisés sur BFUP à l'état frais**

Nous avons effectué sur le BFUP à l'état frais des mesures de:

- La densité,
- L'étalement,
- L'air occlus,

✓ **Essais réalisés sur BFUP à l'état durci**

Les essais réalisés sur le BFUP à l'état durci sont:

- Résistance à la compression à 7, 28 et 90 jours,
- Résistance à la traction par flexion à 7, 28 et 90 jours,
- Résistance à la compression après traitement thermique,
- Résistance à la traction par flexion après traitement thermique
- Essai auscultation à 28 jours,
- Essai ultrasonique à 28 jours,
- Essai absorption d'eau par immersion,
- Essai porosité accessible à l'eau,
- Essai absorption d'eau par capillarité,
- Pénétration de chlorure à 28 jours.

### III.2.3. Formulation des mélanges

Sept formulations ont été retenues. Ces formulations sont présentées dans le tableau III.2.

Tableau III.2: Composition des mélanges

Type de béton	BFUP0	BFUPV10	BFUPV20	BFUPC10	BFUPC20	BFUPG10	BFUPG20
Sable de Dune (kg)	980	980	980	980	980	980	980
Ciment CEMII (kg)	900	900	900	900	900	900	900
Fumée de Silice (kg)	225	202.6	180	202.6	180	202.6	180
Fillers de Verres (kg)	00	26.30	52.6	00	00	00	00
Fillers de Céramique (kg)	00	00	00	24.7	49.3	00	00
Fillers de Granite (kg)	00	00	00	00	00	26.30	52.6
Fibres Polypropylène (kg)	9	9	9	9	9	9	9
Super plastifiant (kg)	50	50	50	50	50	50	50
Eau (kg)	191	191	191	191	191	191	191

### III.2.4. Fabrication des mélanges

#### a. Malaxage

Le malaxage a été fait dans un malaxeur à axe horizontal de type de type HJW-60 de capacité 96litres et de vitesse de 45tours par minute (figure III.1), l'introduction des matériaux dans la dans la cuve est :

- Introduction du sable,
- Introduction du ciment et fumé de silice,
- Malaxage à sec ensuite introduction de l'eau et malaxage humide pendant 3minutes,
- Introduction des fibres ensuite l'eau mélangé avec l'adjuvant et malaxage pendant 12minutes, le temps total de malaxage est de 15minutes.



Figure III.1 : Malaxeur à axe horizontal

Le produit obtenu après malaxage est représenté dans la figure III.2.



Figure III.2 : BFUP après malaxage

### b. Moules

Pour exécuter le programme expérimental plusieurs types de moules ont été utilisés (figure III.3).

- Moules cubiques de dimension  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  pour l'essai de compression,
- Moules prismatiques de dimension  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  pour l'essai de traction par flexion,
- Moules cubique de dimension  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$  pour l'essai d'auscultation et ultrason,
- Moules prismatiques de dimension  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  pour l'essai d'absorption d'eau par immersion,
- Moules prismatiques de dimension  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  pour l'essai porosité accessible à l'eau,
- Moules prismatiques de dimension  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  pour l'essai d'absorption capillaire,
- Moules prismatiques de dimension  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  pour l'essai pénétration de chlorure.



Figure III.3 : Moules

### c. Remplissage et vibration

Le remplissage des moules a été fait sans vibration, la surface supérieure est ajustée par l'arasement en utilisant une règle métallique (figure III.4).



Figure III.4 : Remplissage des moules

### d. Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes sont conservées dans les conditions du laboratoire avant le démoulage (figure III.5 et 6) pendant  $24h \pm 1h$  à une température de  $20C^{\circ} \pm 2$ . Ensuite, elles sont conservées selon les conditions de chaque essai après démoulage.



Figure III.5 : Conservation des moules remplis par le béton



Figure III.6 : Décoffrage des éprouvettes.

### III.3. Méthodologies des essais et Procédé de traitement thermique

#### III.3.1. Essai sur BFUP à l'état frais

##### III.3.1.1. Etalement au mini cône

L'essai d'étalement au mini cône est exécuté selon la norme ASTM C230/C230M. Il consiste à remplir le mini cône de dimension 100 mm de diamètre inférieur, 70 mm de diamètre supérieur et 50mm de hauteur. Le versement du mélange de BFUP dans le cône est effectué jusqu'à pleine capacité (figure III.7). Le cône a ensuite été retiré pour permettre au béton de s'étaler naturellement sur une table circulaire fixe de diamètre 330mm. Une fois l'équilibre atteint après environ 30 s, la distance d'étalement a été mesurée par une règle métallique.

L'étalement au mini cône doit être compris entre 230 à 270 mm pour avoir un BFUP visqueux susceptible d'être mis en place sans vibration, mais nécessitant une aide mécanique à l'écoulement. Il doit rester homogène et ne doit pas présenter une ségrégation des fibres ni d'une fraction solide des constituants (NF P 18-470, 2016).



Figure III.7 : Essai d'étalement au mini cône

### III.3.1.2. Air occlus

L'air occlus dans le BFUP est des bulles d'air qui restent dans le mélange après sa mise en place.

La mesure de l'air occlus selon à la norme NF EN 12350-7 (figure III.8) a été effectué par un aéromètre constitué de deux chambres, la chambre inférieure est un récipient de 1 litre, qui a été rempli par le BFUP sans vibration. La chambre supérieure est équipée par un aéromètre qui permet de mesurer la pression de l'air contenue dans le BFUP. La chambre supérieure est fixée soigneusement sur la chambre inférieure sur laquelle est intégrée une pompe manuelle appliquant une pression pour mettre l'aiguille de l'aéromètre à 0%. Le pourcentage de l'air occlus est affiché par le manomètre après compression du béton au moment de l'ouverture de la valve qui sépare les deux chambres.



Figure III.8 : Essai de l'air occlus

### III.3.1.3. Densité

La densité selon la norme ASTM C 1437-15 (figure III.9) a été mesurée par un récipient de capacité 10L. Soit  $M_v$  la masse du récipient vide et  $M_r$  la masse du récipient rempli par le mélange de BFUP et si le volume  $V$  du récipient est de 10 litres, la densité du béton à l'état frais  $D$  est donnée par la formule III.1.

$$D = (M_r - M_v) / V \quad (\text{g/cm}^3) \quad (\text{III.1})$$



Figure III.9 : Mesure de la densité

### III.3.2. Essai sur BFUP a l'état durci

#### III.3.2.1. Essai de compression

L'essai de compression a été réalisé par une machine de compression de type CONTROLS de charge 2000KN (figure III.10). La machine applique une charge de compression axiale sur éprouvettes de dimension  $10 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$ , conservées dans l'eau jusqu'à le jour de l'essai, conformément à la norme NF EN 12390-3: 2012. L'éprouvette de section **A** est centrée entre les plateaux de la machine appliquant une force qui augmente progressivement jusqu'à la rupture, si **F** est la charge maximale à la rupture, la contrainte en compression  $\sigma_c$  est donnée par la formule III.2.

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \text{ (MPa)} \quad \text{(III.2)}$$



Figure III.10 : Essai de compression

### III.3.2.2. Essai de traction par flexion

La résistance à la traction par flexion (figure III.11) décrite par la norme NF EN 12390-5 a été obtenue par la rupture en flexion 3 points sur éprouvettes de dimension 4x4x16 cm<sup>3</sup> conservées dans l'eau à une température 20°C jusqu'à le jour de l'essai par une machine de capacité de chargement 250KN. L'éprouvette est placée dans le dispositif et la machine qui applique une charge qui augmente progressivement jusqu'à la rupture. La contrainte maximale en traction par flexion est donnée par la relation **III.3**.

$$\sigma_t = 1.5FL/a^3 \text{ (MPa)} \quad \text{(III.3)}$$

F : Charge appliquée en N,  
L : Distance entre les appuis (mm),  
a : Coté de l'éprouvette (mm).



Figure III.11 : Essai de traction par flexion

### III.3.2.3. Essai au scléromètre

Pour évaluer la dureté à la surface et par conséquent la qualité globale de l'ouvrage, une mesure a été faite par la méthode non destructive au scléromètre selon la norme NF EN 12504-2 (figure III.12). L'éprouvette cubique de dimension 15x15x15cm<sup>3</sup> après conservation 28 jours dans l'eau a été tracée et fixée entre les plateaux d'une presse de compression sur la quelles a été appliqué une charge de compression de 10KN. Le scléromètre est appliqué aux points tracés sur l'éprouvette. Il projette une masselotte qui monte sur une tige en acier et comprime un ressort en fin de cours. Cette masselotte, revenue à la surface du béton, entraîne de son retour un curseur permettant de donner l'indice de rebondissement.



Figure III.12 : Essai au scléromètre

#### III.3.2.4. Essai d'ultrason

La mesure en transparence directe par ultrason (figure III.13) est régie par la norme NF EN 12504-4. Elle a été exécutée sur les mêmes éprouvettes destinées à l'essai sclérométrique. La vitesse  $V$  de propagation du son en m/s a été mesurée entre deux points de distance  $d$  au temps  $t$ . La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques est donnée par la formule III.4.

$$V = d/t \quad (\text{m/s})$$

(III.4)



Figure III.13 : Essai d'ultrason

### III.3.2.5. Essai d'absorption par immersion

Cet essai consiste à mesurer le coefficient d'absorption d'eau selon la norme NF P 18-555, sur des éprouvettes de dimension 4x4x16 cm<sup>3</sup> (figure III.14). Après 28 jours de conservation dans l'eau les éprouvettes sont placées à l'étuve à 105 °C jusqu'à l'obtention des poids constants. Ensuite, elles sont immergées dans l'eau jusqu'à saturation pendant 24 heures.

Si **Ms** est le poids de l'éprouvette après passage à l'étuve et **Mh** le poids de l'éprouvette après immersion dans l'eau, le coefficient d'absorption par immersion **Ab en %** est donné par la formule III.5

$$Ab = \frac{(Mh - Ms)}{Ms} \times 100 \quad (\%) \quad (III.5)$$



Figure III. 14 : Essai d'absorption par immersion

### III.3.2.6. Essai d'absorption capillaire

La capacité d'absorption d'eau d'une éprouvette en béton, lorsqu'une seule face de cette éprouvette est en contact avec l'eau, reflète le coefficient d'absorption. La mesure de ce coefficient, selon la norme NF EN 480-5, consiste à sécher des éprouvettes prismatiques de dimension 4x4x16 cm<sup>3</sup>. Pour obtenir la masse sèche des éprouvettes conservées déjà dans l'eau pendant 28 jours, elles sont passées à l'étuve à 105 °C pendant 72 heures. Ensuite, les éprouvettes sont recouvertes par un papier film sur les faces latérales et mises en contact avec d'eau de 3 mm d'épaisseur sur l'une de leurs faces (figure III.15). A des intervalles réguliers, la variation de la masse a été enregistrée et tracée sur un graphique en fonction de la racine carré du temps. L'eau absorbée par unité de surface « C » est donnée par la formule III.7.

$$C = \frac{(M_i - M_d)}{A} \times 100 \quad (\text{g/cm}^2) \quad (\text{III.7})$$

M<sub>i</sub> : la masse au temps i en (g), M<sub>d</sub> : la masse sèche en (g),  
A : la surface en contact avec l'eau en (cm<sup>2</sup>).



Figure III. 15 : Essai d'absorption capillaire

### III.3.2.7. Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau décrite par la norme NF P 18-459 est le rapport entre le volume des pores d'une éprouvette et son volume apparent. Les éprouvettes utilisées dans cet essai sont de dimension 4x4x16cm<sup>3</sup> conservées 28 jours dans l'eau à une température 20 °C. La porosité est donnée par la relation III.7.

$$\text{Porosité} = 100 \times \frac{(M_a - M_s)}{(M_a - M_e)} \quad (\%) \quad (\text{III.7})$$

- M<sub>a</sub>: la masse à l'air libre de l'éprouvette (figure III.16),
- M<sub>s</sub>: la masse de l'éprouvette sèche,
- M<sub>e</sub>: la masse apparente de l'éprouvette dans l'eau (pesée hydrostatique).



Figure III. 16: Mesure de la masse (essai porosité accessible à l'eau)

### III.3.2.8. Essai pénétration de chlorures

L'essai de pénétration des ions des chlorures (NF EN 12390-11) est un paramètre important qui agit sur la durabilité du BFUP (figure III.18). Les éprouvettes prismatiques de dimension  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ , après conservation pendant 28 jours dans l'eau à une température  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , sont recouvertes par une couche de paraffine sur les faces latérales pour assurer la pénétration dans une seule direction. Ensuite, elles sont immergées dans une solution de 5% de chlore sodium (5% NaCl). La profondeur de pénétration des ions des chlorures à l'âge 28 jours est mesurée comme suit :

- Couper l'éprouvette en deux tranches,
- Verser sur les faces coupées une solution de nitrate d'argent ( $\text{AgNO}_3$ ).

Le changement de couleur à une couleur blanche représente la pénétration des chlorures. L'épaisseur de la partie colorée représente la profondeur de pénétration qui est mesurée par un pied à coulisse sur plusieurs parties, la moyenne de ces mesures donne la profondeur de la pénétration des ions des chlorures.



Figure III. 17 : Essai pénétration des ions des chlorures

### III.4. Procédé de traitement thermique

Un protocole de traitement thermique à une température 90°C adéquat à la norme NF P 18-470 a été appliqué sur les différents mélanges de BFUP après 24 heures du coulage dont le but d'accélérer l'hydratation (figure III.18). Après décoffrage, les éprouvettes ont été placées à l'étuve pendant 24 heures ensuite plongées 28 jours dans l'eau. Ensuite, Les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression et de traction par flexion.

La résistance en compression moyenne mesurée à 28 jours après application de ce traitement thermique, ne doit pas être inférieure à la résistance en compression moyenne à 28 jours du même BFUP produit et conservé à 20 °C ± 2 °C sans aucun traitement thermique.



Figure III.18 : Étuve utilisée pour le traitement thermique

### III.5. Conclusion

L'objectif de ce chapitre est :

- La présentation du programme expérimental avec toutes les normes adoptées,
- La composition des différents mélanges,
- La présentation des résultats de toutes les formulations obtenues,
- Nous avons également signalé les différentes méthodes de fabrications et conservations des éprouvettes ainsi qu'une description détaillée de tous les essais réalisés sur le programme expérimental.

Il est important de signaler que nous avons effectué plusieurs essais de formulation sur le béton BFUP pour obtenir celle la plus adéquate à notre thème de recherche.

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les méthodes expérimentales adoptées afin d'aboutir à des résultats permettant de répondre aux questionnements énoncé dans la problématique. Les résultats obtenu seront analysés et interprétés dans chapitre suivant.

# **CHAPITRE IV**

---

*Analyse et interprétation de résultats*

## IV. Analyse et interprétation des résultats

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre on a étudié l'effet du taux et du type des fillers recyclés sur les propriétés des bétons fibrés à ultra hautes performances. Une analyse complète de l'ensemble des résultats obtenus sous formes, d'histogrammes et de graphes qui nous permettent d'expliquer clairement les phénomènes constatés.

Les analyse des résultats sont concentrés sur les modifications apportées par les fillers recyclés sur les propriétés des BFUP à l'état frais (densité, ouvrabilité et air occlus) et les performances mécaniques à savoir la résistance en compression et en traction par flexion sur des échantillons non traité thermiquement et autres subissent a un traitement thermique à l'état durci. La dureté à la surface et l'homogénéité ont également analysés et interprétés.

On analyse également les différents paramètres de durabilité par l'étude de l'influence du taux et type des fillers recyclés sur les différents BFUP obtenus. Les résultats sont présentés sous formes de courbes et histogrammes pour bien illustrés les phénomènes de durabilité à savoir, l'absorption d'eau par immersion et capillaire, la porosité accessible à l'eau et la pénétration des ions des chlorures a l'âge 28 jours.

### IV.2. À l'état frais

#### IV.2.1. Densité

Dans la figure IV.1 on donne la variation de la densité en fonction du taux et type des fillers recyclés.

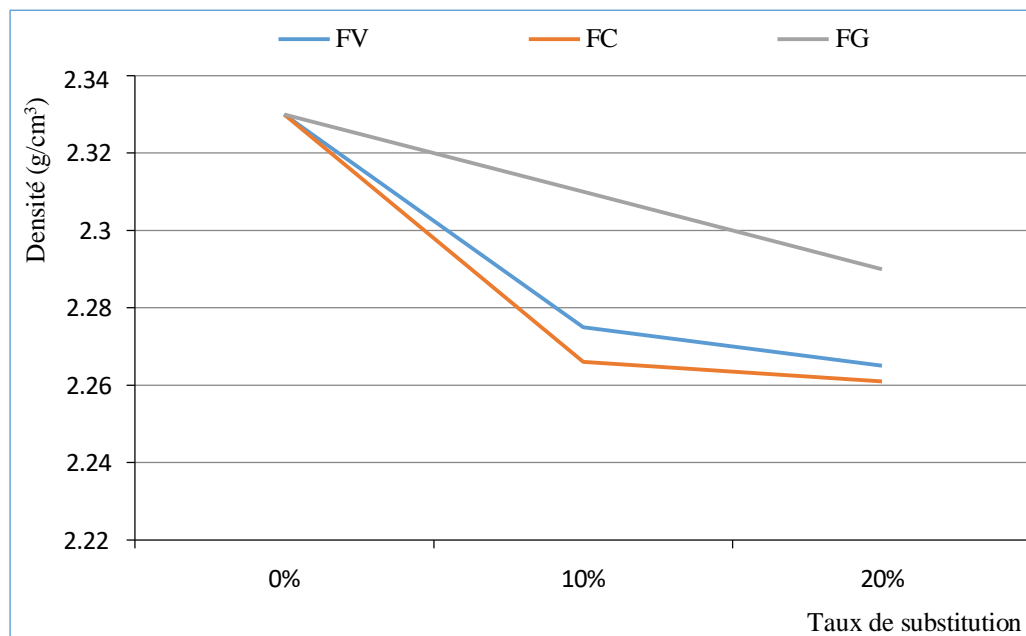


Figure IV.1: Variation de la densité en fonction du taux et type des fillers recyclés

D'une manière générale le remplacement partiel de la fumée de silice par des fillers recyclées de 10 à 20% (figure IV.1) diminue la densité du béton témoin et rend le béton plus léger

quel que soit le taux et le type de fillers recyclés. Cette diminution est due principalement aux faibles finesses des fillers recyclés qui rend la structure du mélange un peu poreuse et à la réduction de la porosité de la zone de transition entre la matrice et les granulats dans le BFUP témoin (**Amouri, 2009**).

La plus faible densité est donnée par les bétons à base de fillers recyclés de céramique qui est expliqué par la faible densité de ces fillers par contre les bétons a base des fillers recyclés de granite donne les densités les plus élevées qui sont du a la densité et la finesse élevée de ces fillers par rapport aux fillers de déchets de verre et céramique recyclés qui jouent le rôle d'un micro-filler et rend la microstructure de la matrice plus compacte (**Prokopski et al., 2020**)

#### IV.2.2. Ouvrabilité

La figure IV.2 indique la variation l'étalement en fonction du taux et type des fillers recyclées.

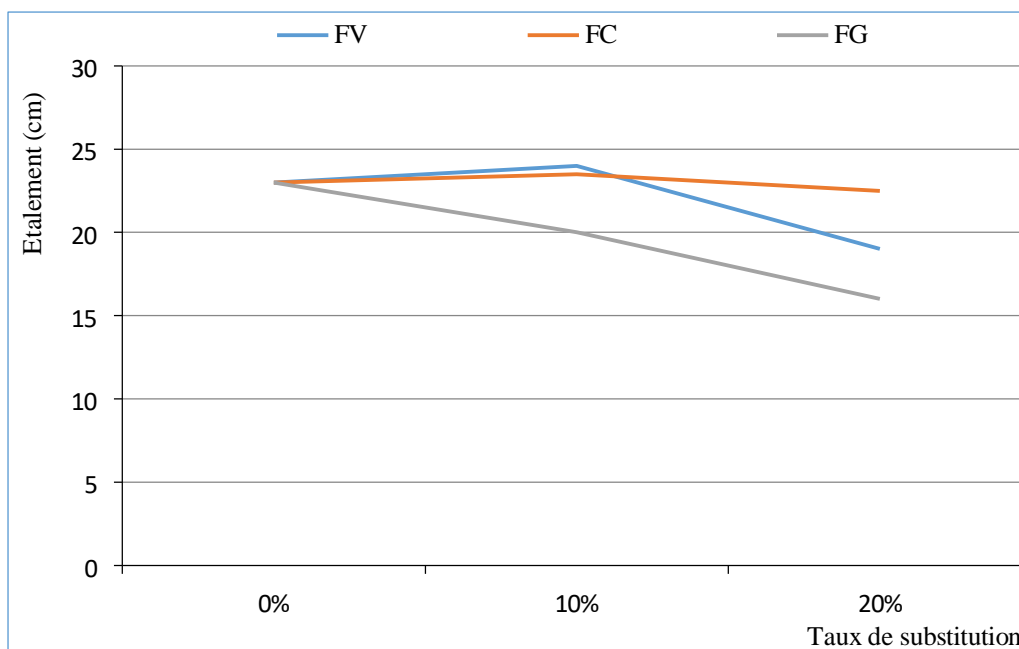


Figure IV.2: Variation de l'ouvrabilité en fonction du taux et type des fillers recyclés

D'après la figure IV.2, le remplacement partiel des fumées de silice par des fillers recyclés de céramique engendre une amélioration de l'ouvrabilité par rapport au BFUP témoin avec une valeur maximale enregistrée à un taux de 10%.

La substitution de la fumée de silice par 10% de fillers de verre recyclés permet d'augmenter l'ouvrabilité par un taux de variation de 9%, au-delà de 10% l'effet de fillers de verre recyclés est négatif, ce comportement est attribué à la géométrie des particules et à la réduction du module de finesse des fillers de verres recyclées (**Yamada et Ishiyama, 2005**), ce résultat concorde avec ceux trouvés par **Li et al., 2016**.

L'introduction des fillers recyclés de granite comme remplacement partiel des fumées de silice dans la formulation des BFUP conduit a diminué l'ouvrabilité des mélanges quel que soit le taux de substitution, cette diminution est dû à l'absorption des fillers de déchets de granite.

La meilleure ouvrabilité est donnée par le BFUP à base de 10% de fillers recyclés de verre tandis que la mauvaise ouvrabilité est donnée par le béton de 20% de fillers recyclés de granite ce qui dû à la finesse et l'absorption élevée des particules de fillers de granite recyclés (Li et al., 2022).

### IV.2.3. Air occlus

Sur la figure IV.3, on présente la variation de la teneur en air occlus en fonction du taux et type de fillers recyclés.

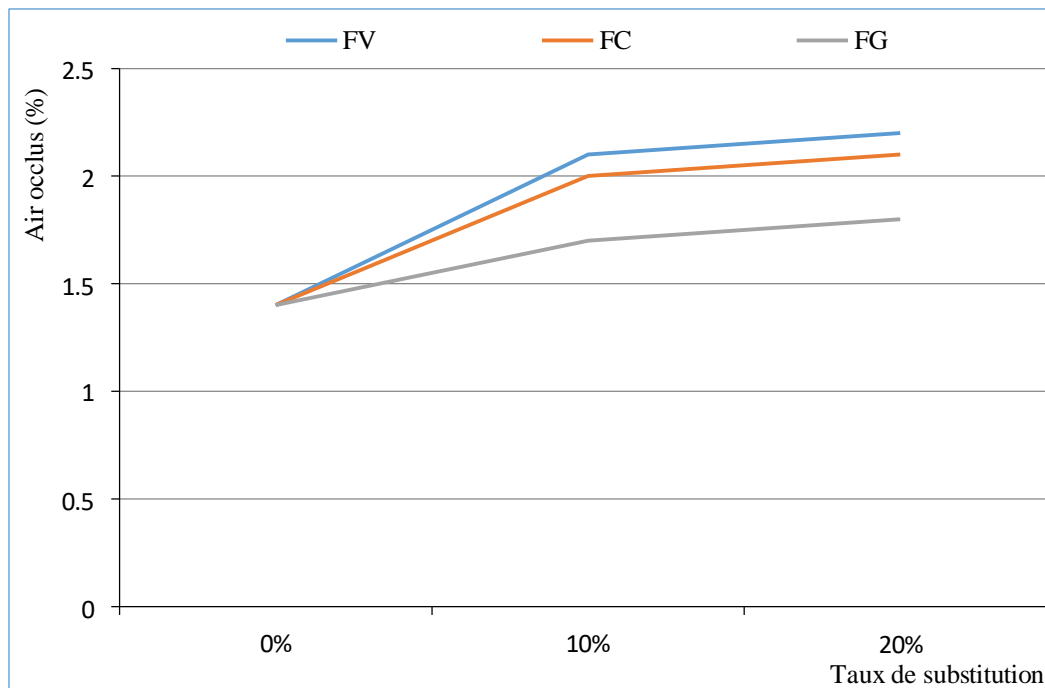


Figure IV.3: Variation de la teneur en air occlus en fonction du taux et type des fillers recyclés

Le béton à base de fumée de silice dégage moins d'air que les autres bétons à base des fillers de déchets recyclés (figure IV.3). La taille des particules de la fumée de silice est beaucoup plus petite que celle des fillers recyclés, il permet de colmater les pores du béton et par conséquent une diminution des bulles d'air (Abrasifs supérieurs du Henan, 2022).

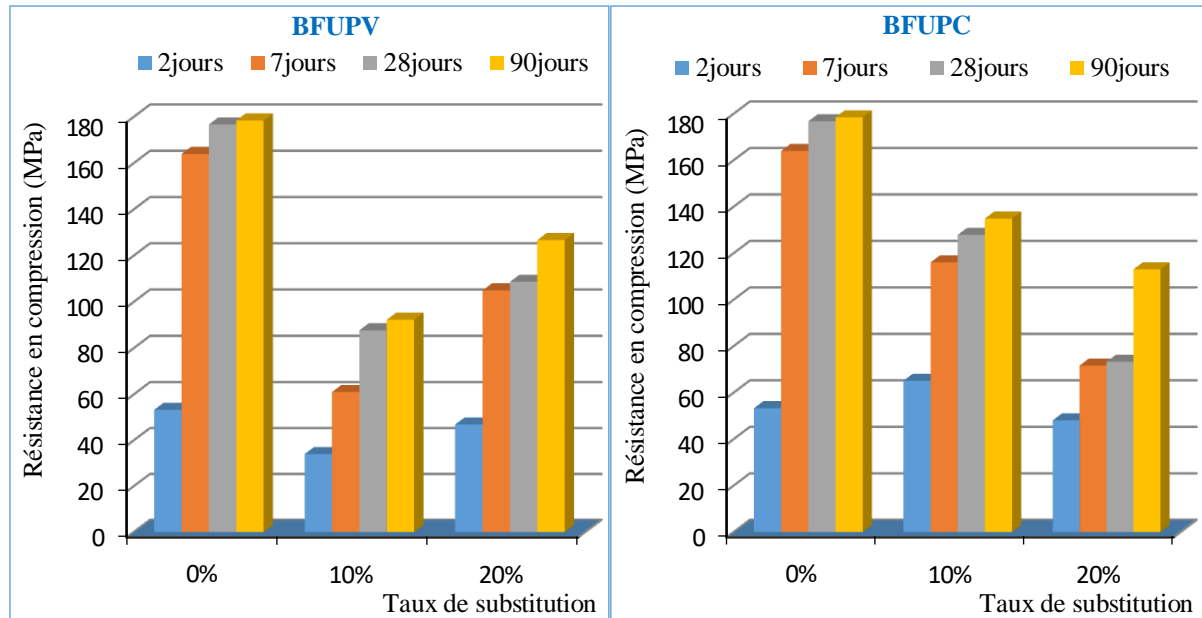
En comparaison des bétons à base des fillers recyclés, la teneur en air augmente avec l'augmentation du taux de substitution des fillers recyclés quel que soit le type de fillers. Le béton à base de fillers de verre recyclés affiche la teneur en air la plus élevée, ceci est dû à la taille des particules des fillers de verre un peu grossier en comparaison avec les autres fillers recyclés (Douaïssia, 2021), ces résultats sont en cohérence avec le travail publié par Li et al., 2016.

## IV.3. À l'état durci

### IV.3.1. Résistance à la compression

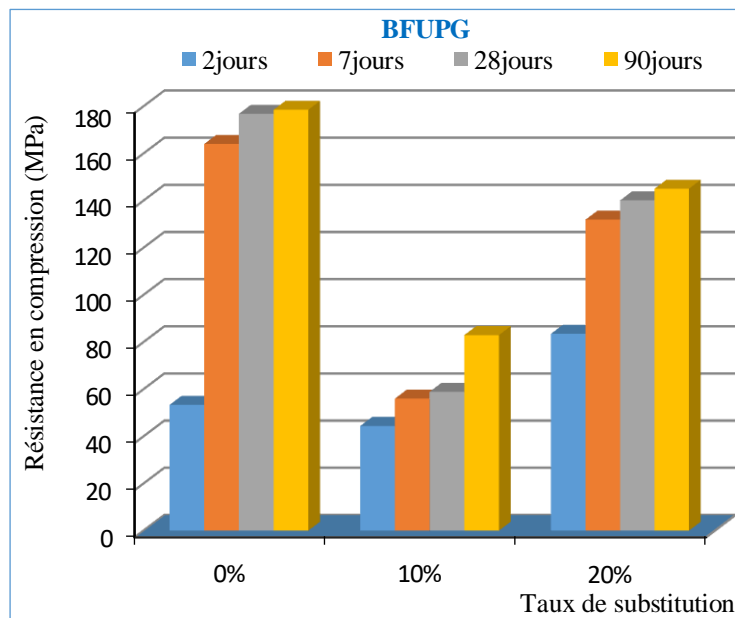
Le béton témoin (figure IV.4) à base de fumée de silice affiche les meilleures résistances en compression ( $R_c$ ) quel que soit l'âge, la fumée de silice réagit avec l'hydroxyde de calcium

(Portlandite CH), pour former des hydrates de type silicates de calcium hydratés (C-S-H) plus résistants (Amanjean, 2015) ce qui explique les résistances élevées du BFUP témoin.



a) Rc sur BFUP à base de fillers de verre

b) Rc sur BFUP à base de fillers de céramique



c) Rc sur BFUP à base de fillers de granite

Figure IV.4: Variation de la résistance à la compression en fonction du taux et type des fillers recyclés

Le remplacement partiel des fumées de silice par des fillers de verre recyclés (figure IV.4 (a)) avec des taux de 10 et 20% engendre une diminution des résistances en compression par rapport au BFUP témoin, cette diminution est fonction de l'augmentation du taux de substitution, elle est de l'ordre de 50.36% pour un taux de remplace de 10% et 38.51% pour un taux de 20% à l'âge 28jours. Ce chute de résistance peut être expliqué par la faible finesse des fillers de verre d'une part et par la teneur élevée en alcalis dans les fillers de verre d'autre part (Li et al., 2016). Ces résultats sont en accord avec les résultats de Zuo et al., 2008, qui

ont rapporté que lorsque  $\text{Na}_2\text{O}$  était élevé le degré de réaction n'augmentait pas de manière significative avec le temps, ce qui donne des résistances à la compression un peu faible. La valeur maximale est de 126.73 MPa donnée par le béton de 20% de taux de substitution à l'âge 90 jours.

On constate la même tendance lors du remplacement de la fumée de silice par des fillers de déchets de granite (figure IV.4 ©) (**Shwetha et al., 2022**). Par contre la substitution de 10% de fumée de silice par des fillers de céramique recyclés affiche les meilleures résistances en compression en comparaison avec le BFUP de 20% de taux de substitution (figure IV.4 (b)).

En comparaison des bétons à base des fillers recyclés, on peut dire que les résistances en compression maximales à l'âge 28 jours sont données par les BFUP de 20% de fillers de granité recyclés (140.07 MPa), 10% de fillers de céramiques recyclés (127.88 MPa) et 20% de fillers de verre recyclés (108.68 MPa), cette valeur est inférieure à la valeur préconisée par **AFGC (2013)** et or la plage de résistance en compression (entre 120 MPa et 180 MPa) données par **Droll (2004)** et **Deaux (2018)**.

Les fillers de granites recyclés présentent une finesse élevée par rapport aux autres fillers recyclés qui favorise la réaction d'hydratation et rend la matrice plus compacte et favorise l'augmentation des résistances (**Prokopski et al., 2020; Suresh et al., 2022**).

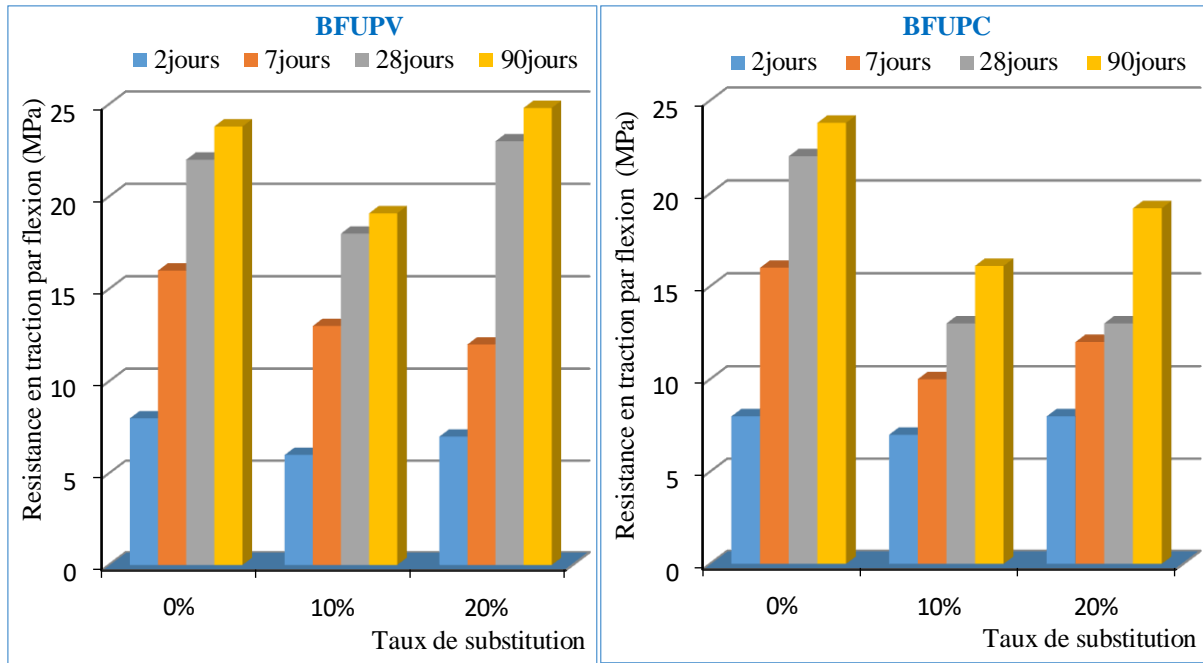
### IV.3.2. Résistance à la traction par flexion

Les BFUP à base de fumée de silice affichent les meilleures résistances en traction par flexion ( $R_t$ ) (figure IV.5), en comparaison avec les autres types de béton, sauf pour le béton de 20% de fillers de déchets de verre qui donne une résistance maximale de 24.8 MPa à l'âge 90 jours.

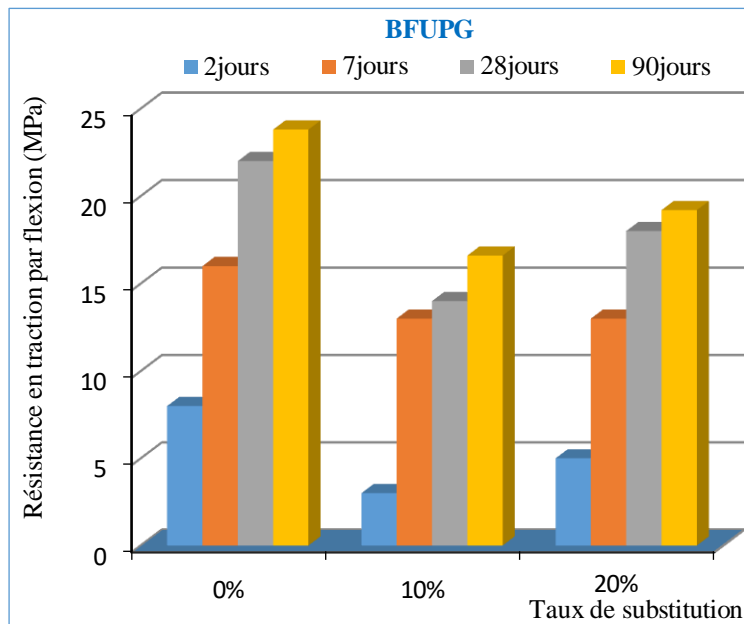
Les meilleures performances en traction sont données par les bétons à base de fillers de déchets de verre à moyen et long terme en comparaison avec les bétons à base des fillers recyclés (figure IV.5 (a)).

Tous les bétons à base des fillers recyclés enregistrent des résistances en traction par flexion à l'âge 28 jours supérieures à 6 MPa valeur limite donnée par **l'AFGC (2013)** et entre 7 et 15 MPa valeurs trouvés par le chercheur **Deaux (2018)**.

La valeur minimale est de 13 MPa donnée par le béton de 20% de taux de substitution du fumée de silice par des fillers de céramiques recyclés (figure IV.5 (b)), ce résultat peut être expliqué par l'absorption élevée des fillers de céramique recyclés qui influent sur la réaction d'hydratation (**Alnour et al., 2021**).



a) Rt sur BFUP à base de fillers de verre    b) Rt sur BFUP à base de fillers de céramique



c) Rt sur BFUP à base de fillers de granite

Figure IV.5: Variation de la résistance en traction par flexion en fonction du taux et types des fillers recyclés.

### IV.3.3. Influence de la température de traitement sur la résistance en compression

Le traitement thermique contribue à modifier significativement la résistance en compression moyenne mesurée après application de ce traitement thermique s'écarte de plus de 7% de la résistance en compression moyenne, mesurée à la même échéance, du même BFUP qui n'aurait pas subi. Ce traitement thermique commencé dès avant la prise (NF P18 470, 2019) a pour but de développer de nouveaux hydrates afin d'augmenter les résistances mécaniques.

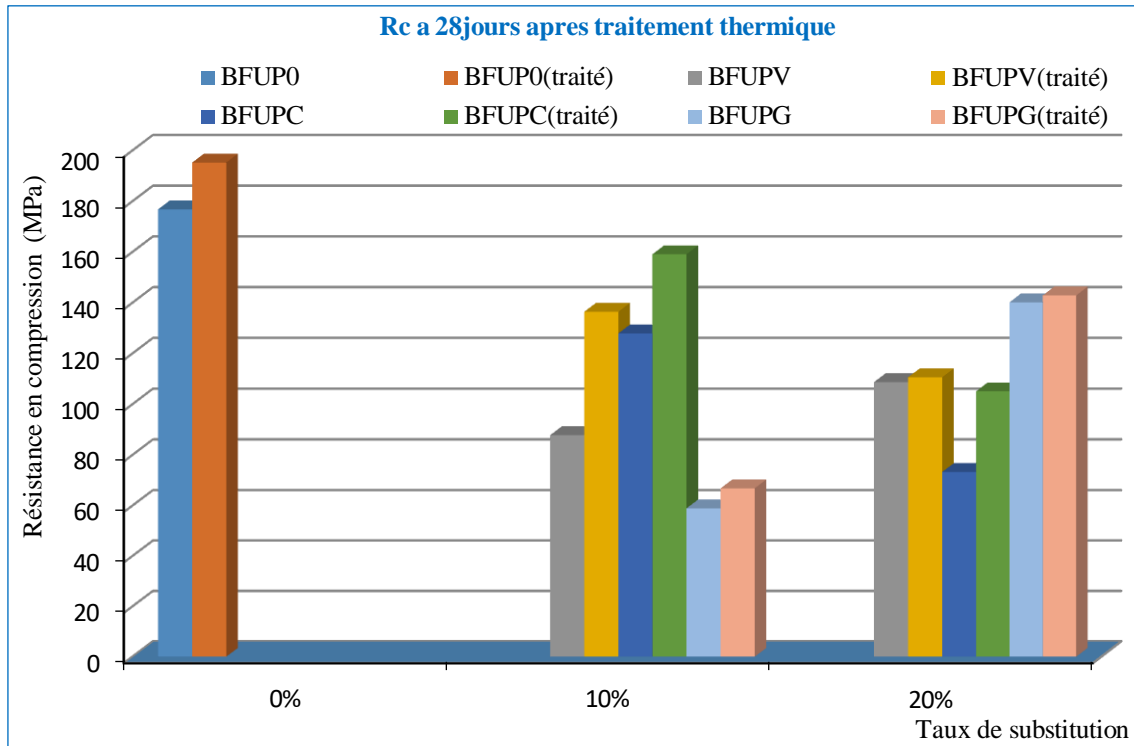


Figure IV.6: Résistance en compression a 28jours sur éprouvettes traité thermiquement

Dans la figure IV.6 on présente une comparaison entre les résistances en compression obtenues sur des éprouvettes traité à une température 90°C et non traité à l'âge 28 jours. Comme a été indiqué dans la norme **NF P18 470 (2019)** et **AFGC (2013)** et montré par **Graybeal (2007)**, tous les types des bétons après traitement thermique affichent des résistances en compression supérieures aux résistances obtenues sur éprouvettes non traité thermiquement. La résistance maximale est toujours donnée par le béton témoin (BFUP0 traité) avec un taux de variation de 10.43% par rapport au béton témoin non traité thermiquement (BFUP0), ceci peut s'expliquer par le changement de la nature cristalline des hydrates avec la température (**Richard et Cheyrezy, 1995**).

Le béton traité (BFUPC traité) contenant de 10% de céramique enregistre un gain de résistance de l'ordre de 24.37% par rapport au béton à base de 10% de fillers recyclés de céramique non traité (BFUPC), ce gain est proche à la valeur trouvé par **Richard et Cheyrezy (1995)** qui est de l'ordre de 26%.

#### IV.3.4. Influence de la température de traitement sur la résistance en traction par flexion

Le comportement en traction est le même qu'en compression (figure IV.7), le traitement thermique conduit a augmenté les résistances en traction par flexion mais avec un taux de variation faible en comparaison avec les résultats des résistances en compression, sauf pour le béton de 20% de fillers de déchets de céramique qui affiche la résistance maximale après traitement thermique avec un taux de variation par rapport au béton non traité de 53.85%.

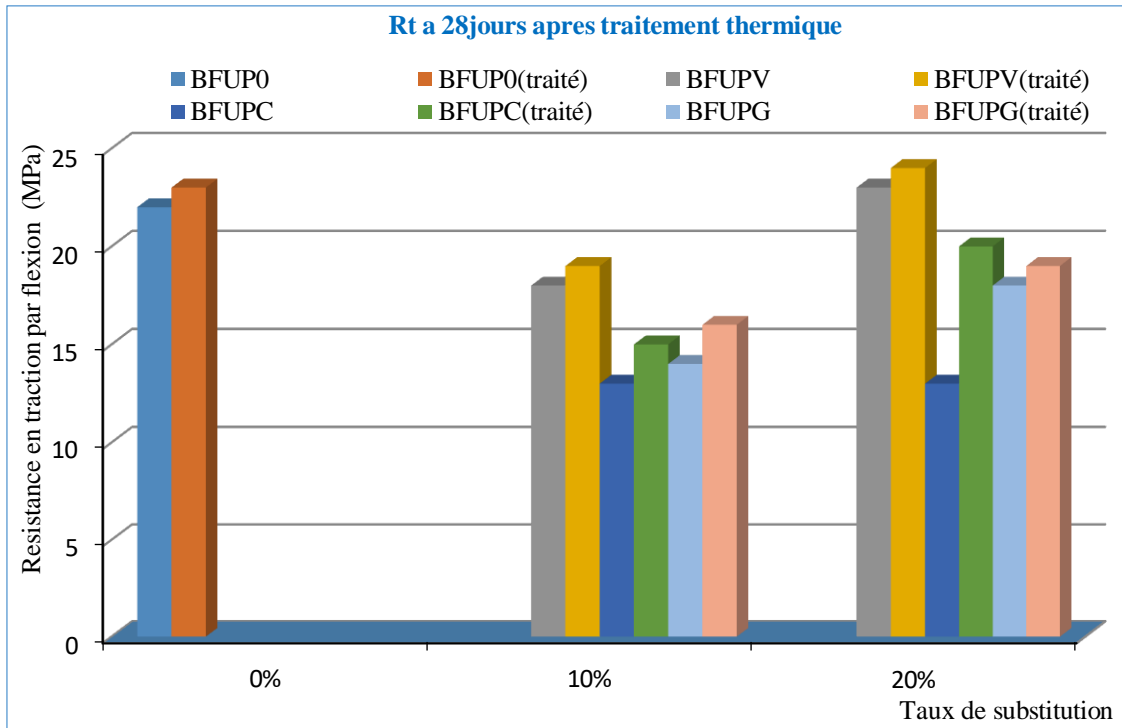


Figure IV.7: Résistance en traction par flexion à 28 jours sur éprouvettes traité thermiquement

### IV.3.5. Indice sclérométrique

L'essai au scléromètre est comparatif, il est utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables à des éléments préfabriqués (Neville, 2000).

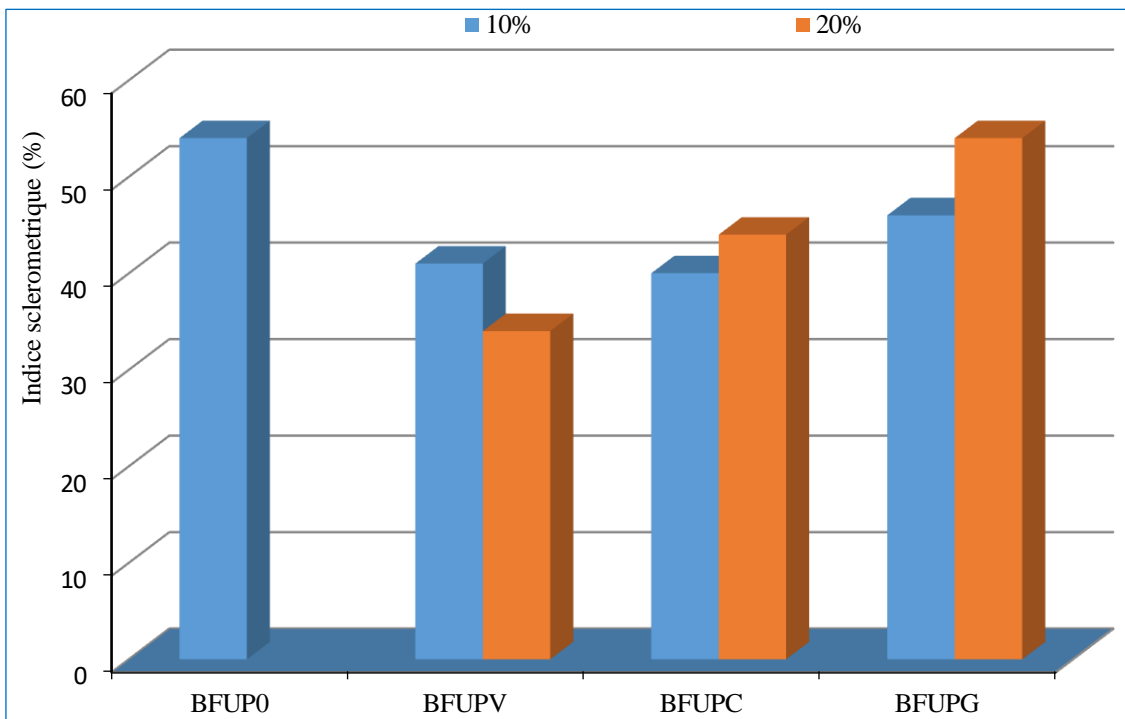


Figure IV.8: Variation de l'indice sclérométrique on fonction du taux et types des fillers recyclés

Le béton témoin a un indice sclérométrique similaire à celui du béton à base de 20% de fillers de déchets de granite (figure IV.8). Pour les autres types de béton, on constate une diminution de l'indice de rebondissement par rapport au béton témoin et la valeur minimale est donnée par le béton à base de 20% de fillers de verre recyclés.

Le remplacement des fumées de silice par des fillers recyclés de déchets de verre augmente les vides à l'intérieur du béton par la présence des alcalis (Li et al., 2016) et par conséquent une diminution de son homogénéité et dureté.

#### IV.3.6. Vitesse ultrasonique

L'étude de la variation de la vitesse ultrasonique (figure IV.9) indique qu'elle varie d'un taux un autre pour atteindre des valeurs maximales de 4.695m/s pour le béton témoin et de 20% de taux de substitution des fillers de fumée de silice par des fillers recyclés de granite.

L'incorporation de la fumée de silice permette de colmater les pores du béton durci à ultra hautes performances d'une part, et le gel C-S-H produit par son effet optimise la répartition de la taille des pores du béton ultra-haute performance et réduit la porosité ce qui favorise le déplacement rapide des ondes sonores ce qui explique la vitesse élevée du BFUP témoin (Abrasis supérieurs du Henan, 2022).

La valeur minimale (3.521m/s) est donnée par le béton de 20% de taux de substitution des ultrafines de fumées de silice par des fillers de verres recyclés, ce résultats est expliqué par les particules de fillers de verre recyclés qui sont un peu grossier par rapport autres fillers recyclés et entraînent une diminution de la compacité et par conséquent la vitesse ultrasonique (Douaïssia, 2021).

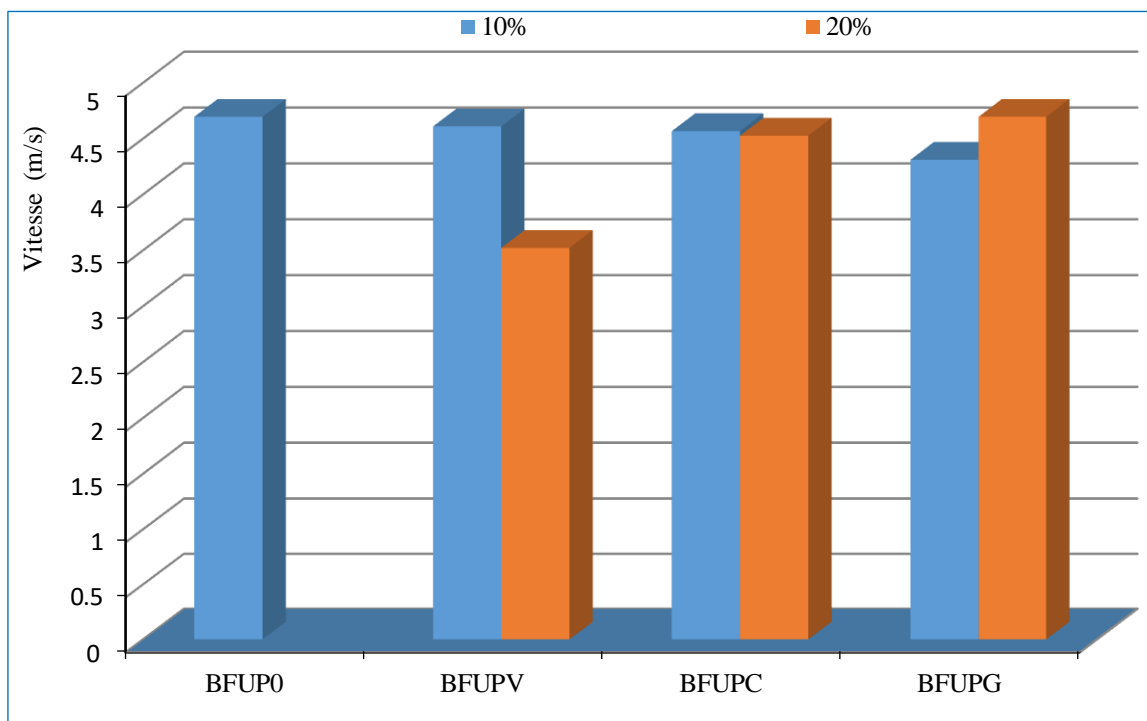


Figure IV.9: Variation de la vitesse ultrasonique on fonction du taux et types des fillers recyclés

#### IV.4. Effet du taux et type des fillers recyclés sur les paramètres de durabilité du BFUP

##### IV.4.1. Absorption d'eau par immersion

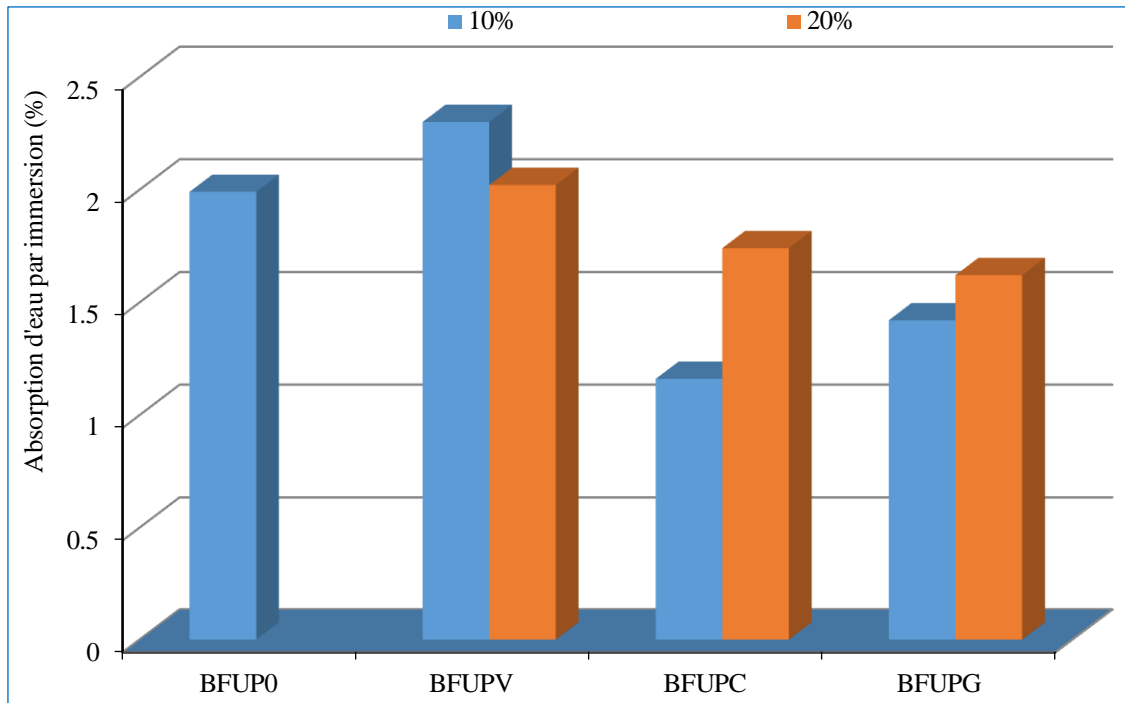


Figure IV.10: Variation de l'absorption d'eau par immersion en fonction du taux et types des fillers recyclés

D'après la figure IV.10 on constate que la substitution partiel de la fumée de silice par des fillers recyclés de céramique et granite entraîne une diminution de l'absorption d'eau par immersion par rapport au béton témoin, cette diminution est dû à la plus faible finesse des deux ajouts en comparaison avec la finesse de la fumée de silice d'une part à l'absorption élevé des ultrafine de fumée de silice d'autre part. **Prokopski et al., 2013**, ont montré que la poussière de granite diminue l'absorption d'eau du béton.

L'absorption maximale est donnée par les bétons à base de fillers de déchets de verre recyclés qui contient un niveau d'alcali plus élevé qui augmenté les vides perméables (**Li et al., 2016**).

##### IV.4.2. Porosité accessible à l'eau

La substitution de la fumée de silice par des fillers recyclés entraîne une diminution de la porosité des mélanges de béton, la porosité minimale est donnée par les bétons à base de fillers de granite recyclés quel que soit le taux de substitution (figure IV.11).

L'augmentation de la quantité des fumées de silice, augmente la quantité des éléments réactifs entraîne également une augmentation de la porosité ce qui explique la porosité élevée du béton témoin par rapport aux bétons à base de fillers recyclés de déchets de céramique et granite (**Schwarz et Neithalath, 2008**).

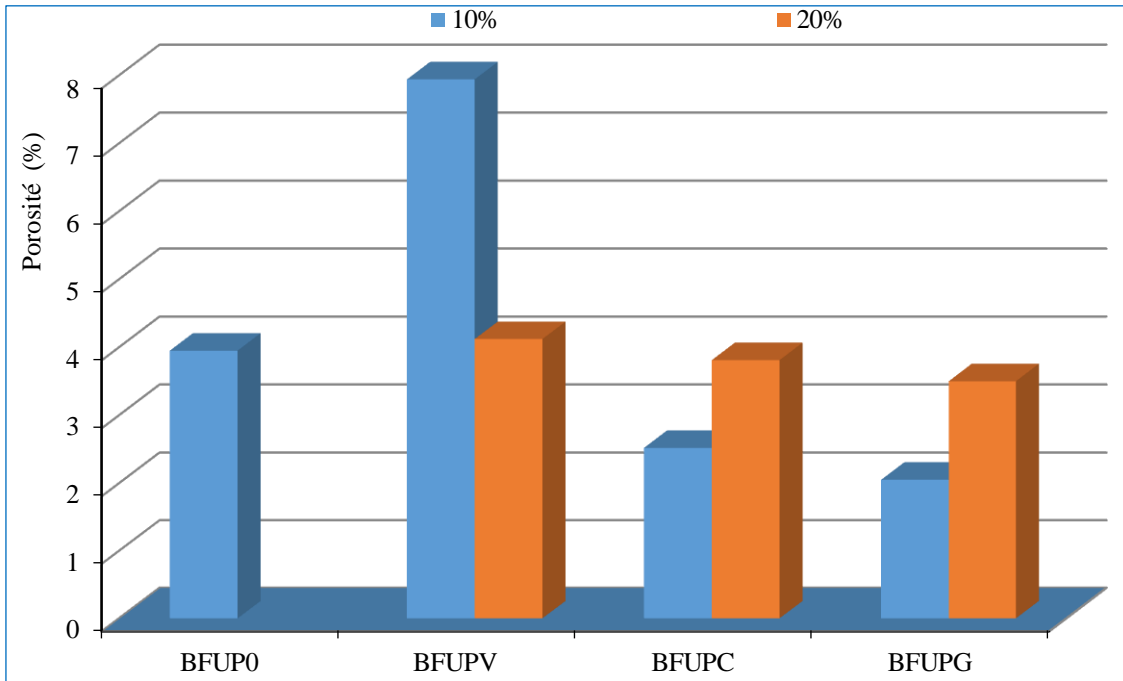


Figure IV.11: Variation de porosité accessible à l'eau en fonction du taux et types des fillers recyclés

#### IV.4.3. Absorption d'eau par capillarité

La figure IV.12 montre une augmentation du coefficient d'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps, cette augmentation est faible dans la première heure ensuite se développe rapidement jusqu'à 2280 min.

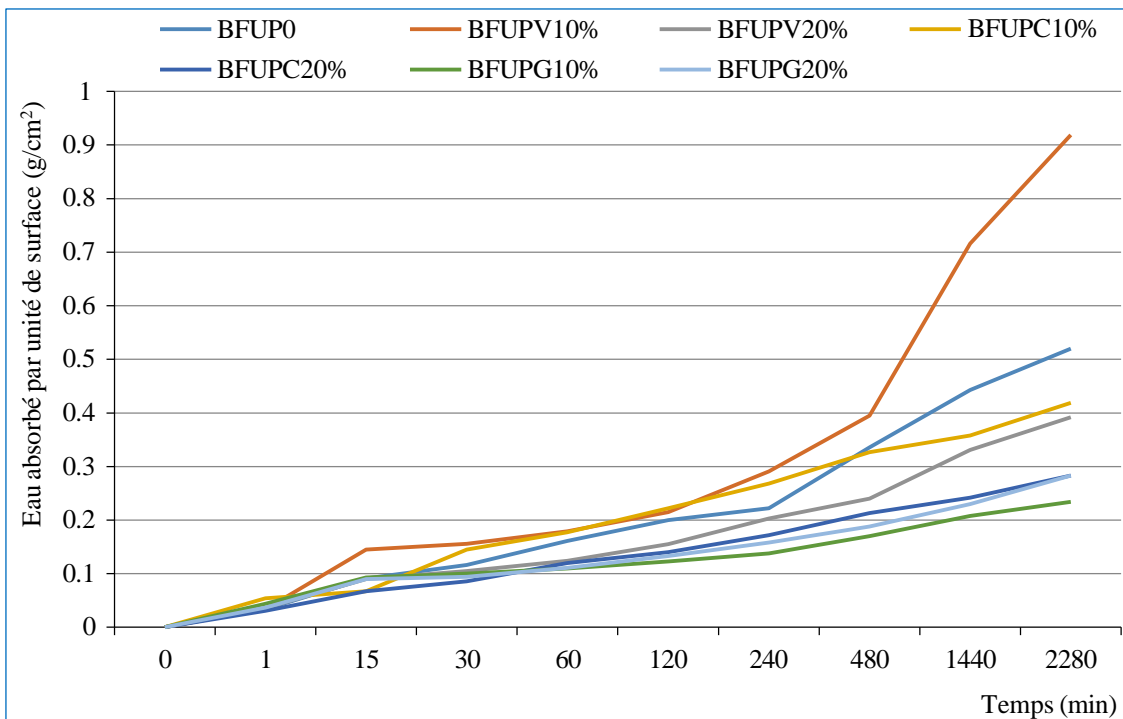


Figure IV.12: Effet du taux et type de fillers recyclés sur la variation de l'absorption capillaire en fonction du temps

La substitution de la fumée de silice par 10% de fillers de verre recyclés conduit à augmenter l'absorption capillaire du BFUP témoin par la présence des alcalis qui rend la structure poreuse (Li et al., 2016).

Les courbes 10% BFUPG, 20% BFUPG et 20% BFUPC présentent une variation similaire et très rapprochées. Les bétons contenant 10% fillers recyclées de déchets de verre et céramique présentent une absorption d'eau plus élevées en comparaison avec le béton témoin à base de fumée de silice, donc le remplacement de 10% de fumée de silice par des fillers recyclés de déchets de verre et céramique rend le réseau poreux plus grossier, donc une cinétique d'absorption plus élevée.

#### IV.4.4. Pénétration des ions de chlorures

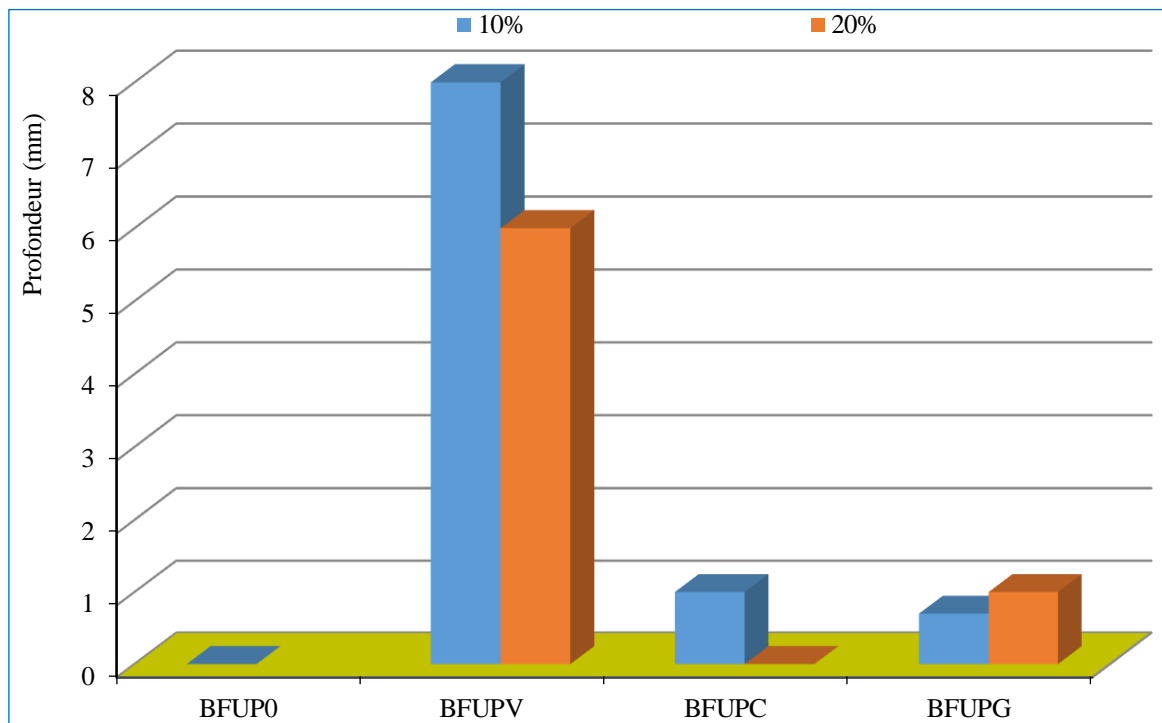


Figure IV.13: Variation de la profondeur de pénétration des ions des chlorures à l'âge 28jours en fonction du taux et type de fillers recyclés

La profondeur de pénétration des ions de chlorure à l'âge 28jours est insignifiante pour tous les types de béton. La profondeur est de 0 mm dans le BFUP témoin et 20% de fillers de déchets de céramique, les valeurs maximales sont de 8 mm et 6 mm donnés par le béton de 10% et 20% de fillers de verre recyclés respectivement causé par la présence des alcalis qui augmente le volume des vides perméables (Li et al., 2016).

#### IV.5. Conclusion

Ce travail qui vis la valorisation des fillers recyclées de déchets de verre, céramique et granité dans la formulation d'un BFUP comme substituants partiels des ultrafine (fumée de silice) nous ont permet de tirer les conclusions suivantes:

-L'introduction des fillers recyclés avec des taux de 10 et 20% à la place de la fumée de silice rend le BFUP plus léger,

- Le remplacement partiel des fumées de silice par 10% des fillers recyclés de céramique engendre une amélioration de l'ouvrabilité par rapport au BFUP témoin,
  - La teneur en air occlus augmente avec l'augmentation des taux des fillers recyclés,
  - Le béton témoin à base de fumée de silice affiche les meilleures résistances en compression quel que soit l'âge,
  - Les résistances en compression maximales à l'âge 28 jours sont données par les BFUP de 20% de fillers de granité recyclés (140.07 MPa), 10% de fillers de céramiques recyclés (127.88 MPa) et 20% de fillers de verre recyclés (108.68 MPa), cette valeur est inférieure à la valeur préconisée par l'AFGC (2013),
  - Les BFUP à base des fillers recyclés enregistrent des résistances en traction par flexion à l'âge 28 jours supérieures à 6 MPa valeur limite donnée par l'AFGC (2013),
  - Le traitement thermique à 90°C augmente les résistances en compression et en traction par flexion des BFUP par rapport aux BFUP non traités quel que soit le type de béton,
  - Le remplacement des fumées de silice par des fillers recyclés de verre engendre une diminution de l'homogénéité et la dureté,
  - Les valeurs maximales des vitesses ultrasoniques obtenues par le béton témoin et de 20% de taux de substitution de fumée de silice par des fillers recyclés de granité,
  - La substitution partielle de la fumée de silice par des fillers recyclés de céramique et granité entraîne une diminution de l'absorption d'eau par immersion par rapport au béton témoin,
  - La substitution de la fumée de silice par des fillers recyclés entraîne une diminution de la porosité des mélanges des BFUP,
  - Le remplacement de 10% de fumée de silice par des fillers recyclés de verre et céramique rend le réseau poreux plus grossier donc une cinétique d'absorption plus élevée,
  - La profondeur de pénétration des ions des chlorures à l'âge 28 jours est insignifiante.
- D'une manière générale on peut dire que la substitution partielle des fumées de silice par des fillers recyclés a un effet bénéfique, ils donnent à la fois des BFUP et d'autre fois des BHP, il est recommandé d'utiliser un type de verre à faible teneur en alcalis.

# **Conclusions Générales**

---

---

## Conclusions générales

Cette étude évalue la formulation d'un béton fibré à ultra-hautes performances (**BFUP**), La formulation **F4**, à base de matériaux locaux et de fumée de silice, satisfait aux exigences d'un béton fibré à ultra-hautes performances (**BFUP**) selon les critères de l'AFGC (2013). Des substitutions partielles de fumée de silice par des fillers recyclés de verre, de céramique, et de granite ont été évaluées. Les principaux résultats montrent que :

- La substitution de la fumée de silice, par les fillers de **verre** :
  - Rend le béton plus léger, mais diminue l'homogénéité et la dureté.
  - Résistance à 28 jours plus faible (108,68 MPa), en dessous du seuil AFGC.
  - Réseau poreux plus grossier à 10 %, absorption d'eau plus rapide.
  - Convient aux éléments non structuraux : mobilier urbain, revêtements décoratifs, pavés drainants.
- La substitution de la fumée de silice, par les fillers de **céramique** :
  - Améliore l'ouvrabilité à 10 %.
  - Bonne résistance en compression (127,88 MPa) et flexion (> 6 MPa).
  - Diminue porosité et absorption d'eau, favorable en milieux humides.
  - Adapté aux dalles minces, façades, fondations immergées.
- La substitution de la fumée de silice, par les fillers de **granite** :
  - Très bonne résistance à 28 jours (140,07 MPa).
  - Meilleure compacité (vitesse ultrasonique élevée).
  - Réduit porosité et absorption d'eau.
  - Idéal pour éléments préfabriqués, ponts, structures compactes contrôlées par ultrasons.
- Tous les BFUP recyclés présentent une bonne résistance en flexion (> 6 MPa).
- Le traitement thermique à 90°C améliore les performances mécaniques.
- Faible pénétration des chlorures : bonne durabilité pour ouvrages exposés (ponts maritimes, tunnels).
- L'utilisation de ces déchets locaux permet de réduire les coûts tout en contribuant à une construction plus durable, avec des performances adaptées à chaque besoin structural. Une optimisation des formulations (notamment pour le verre) pourrait encore élargir leurs champs d'application.

## Perspectives

L'étude a permis de répondre à certaines questions et d'identifier des points intéressants

- **Le granite recyclé** offre les meilleures performances mécaniques et une durabilité optimale, idéal pour les structures critiques.
- **La céramique** constitue un bon compromis coût/performance pour les applications courantes.
- **Le verre**, bien que moins performant, reste une solution économique pour des usages non structuraux.

Afin de mieux appréhender les différents aspects du comportement des BFUP à base de fillers recyclés, tels que :

- L'étude de retrait et gonflement du BFUP à base de fillers recyclés,
- L'étude de la durabilité vis à vis les attaques par les chlorures à 120jours,
- Etude de la durabilité vis-à-vis des attaques chimique dans différents milieux agressifs,
- Etude de la résistance au gel/dégel,
- Etude des caractéristiques de la microstructure,
- Etendre le thème de recherche à d'autres ajouts recyclés.

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

1. Abrasifs supérieurs henan. (2022). *Fumée de silice pour béton ultra-haute performance (BUHP)*. <https://hsamaterial.com>
2. Acker, P., Roussel, N., & Morin, V. (2013). Béton fibré à haute résistance : impact des fibres d'acier sur la compression et la ductilité. *Concrete Research Journal*, 45(4), 200-250.
3. AFGC. (2013). *Bétons fibrés à ultra-hautes performances*. <https://www.afgc.asso.fr>
4. AFNOR. (2004). *NF EN 206-1: Bétons – Spécification, performance, production et conformité*. Association Française de Normalisation.
5. Aïtcin, P.-C. (2000). *Ciments et bétons : Comprendre les mécanismes physiques et chimiques*. Éditions de l'École polytechnique de Montréal.
6. Aïtcin, P.-C. (2000). Les adjuvants et leur rôle dans la rhéologie des bétons auto-plaçants. *Materials and Structures*, 33(2), 66-72.
7. Aïtcin, P.-C. (2003). *High-Performance Concrete*. CRC Press.
8. Alnour, M. A., Kambal, M. E. M., & Mansour, M. I. (2021). Study the effect of using ceramic waste powder as partial replacement for cement on concrete properties. *Journal of Karary University for Engineering and Science (JKUES)*, 1-7. <https://doi.org/10.54388/jkues.v1i1.125>
9. Amanjean, E. N. P. (2015). *Développement de bétons fibrés ultra performants pour la réalisation d'éléments de structure préfabriqués* [Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier].
10. Amouri, C. (2009). *Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires caractérisation, performances, durabilité* [Thèse de doctorat, Université de Constantine].
11. Antille, F. (2012). *Le BFUP – Béton Fibré Ultra Performant*. TECHNI.CH. <http://www.techni.ch>
12. ASJP. (2021). Gestion des déchets de verre en Algérie : étude de cas. *ASJP*, 1-10.
13. Benguedouar, A. (2013). *Synthese et caracterisation de silicates de calcium hydrates (C.S.H) hybrides* [Mémoire de master, Université de Constantine].
14. Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., & Amziane, S. (2010). Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1664–1671. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.034>
15. Chanvillard, G., Papon, R., & Delage, J. (2016). Comportement dynamique des bétons renforcés par fibres métalliques courtes sous impact et fatigue. *Structural Materials Review*, 27(5), 180-230.

16. De Larrard, F., & Sedran, T. (2002). Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, 32(10), 1545-1551.
17. Deaux, O. (2018). *Optimisation de bétons fibrés à ultra-hautes performances et caractérisation de leurs propriétés en contexte industriel* [Thèse de doctorat, Université Polytechnique de Montréal].
18. Doiron, G. (2009). *Béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) et les ouvrages d'art en Amérique du Nord*. Lafarge Canada Inc. – Ductal. [www.afgc.asso.fr](http://www.afgc.asso.fr) › app › uploads › 2009/12 › 1.1\_Resplendino.pdf
19. Douaïssia, Z. (2021). *Utilisation des additions minérales pour l'amélioration des propriétés mécaniques et le comportement vis-a-vis la réaction alcali silice des mortiers et des bétons* [Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar].
20. Dreux, G., & Feasta, J. (1996). *Nouveau Guide du Béton et de Ses Constituants*. Eyrolles.
21. Droll, K. (2004). Influence of additions on ultra high performance concretes—grain size optimisation. *Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, Kassel, Allemagne.
22. *El Watan*. (2023, 12 février). La gestion des déchets de verre en Algérie : un défi à relever.
23. Feng, J., & Wu, Y. (2017). Experimental study on the mechanical properties of concrete incorporating granite powder. *Materials*, 10(12), 1379. <https://doi.org/10.3390/ma10121379>
24. Ferrari, L., et al. (2017). Influence of Mixing Time on the Rheological and Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, 144, 246-255. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.164>
25. Graybeal, B. A. (2011). Fiber-Reinforced Concrete. In *Handbook of Concrete Bridge Maintenance* (2e éd., pp. 15-1 à 15-12). American Concrete Institute.
26. Graybeal, B. A. (2007). Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Materials Journal*, 104(2), 146-152. <https://doi.org/10.14359/18577>
27. Guiraud, P. (2018). *BFUP (Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances)*. Infociments. <https://www.infociments.fr> › betons
28. Hajar et al. (2021). Optimisation du malaxage des bétons fibrés : impact sur l'homogénéisation des fibres et la réduction du temps de malaxage. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(6), 1125-1140.
29. Kang, S. T., & Yoon, Y. S. (2017). Étude des performances en traction des bétons fibrés métalliques à haute teneur en fibres longues. *Materials and Structures*, 50(6), 200-240.

30. Kinuthia, J., Wild, S., Sabir, B., & Bai, J. (2000). Self-compensating autogenous shrinkage in Portland cement—metakaolin—fly ash pastes. *Advances in Cement Research*, 12(1), 35–43. <https://doi.org/10.1680/adcr.2000.12.1.35>
31. Schmidt, M., & Fehling, E. (2005). Ultra-High Performance Concrete: A Review of the Current State of the Art. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3(2), 151-164. <https://doi.org/10.3151/jact.3.151>
32. Schwarz, N., & Neithalath, N. (2008). Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. *Cement and Concrete Research*, 38(4), 429-436. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.12.001>
33. Shwetha, K. G., Mahesh Kumar, C. L., Dalawai, V. N., Anadinni, S. B., & Sowjanya, G. V. (2022). Comparative study on strengthening of concrete using granite waste. *Materials Today: Proceedings*, 62(8), 5317-5322. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.389>
34. Sika® Fibre 12-34. (2020). *SikaFibre12-34-fr-DZ-(11-2020)-1-3.pdf*.
35. Siltek Powder TEKNACHEM. (2022). *Abrasifs supérieurs henan*.
36. Soliman, N. (2016). *Développement de béton à ultra-hautes performances (BFUP) à base de verre - vers un béton écologique innovant* [Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke].
37. Suresh, C., Sivaramakrishnan, S., Siddharthan, P., Babu, S. V., Neeraja, V. S., & Dhanraj, J. A. (2022). Study on the characteristics of the ordinary concrete with the granite dust as a substitute for the fine aggregates. *Materials Today: Proceedings*, 69(3), 739-743. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.154>
38. Tafraoui, A. (2009). *Contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental (Algérie)* [Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier].
39. Tafraoui, A., Escadeillas, G., Lebaili, S., & Vidal, T. (2009). Metakaolin in the formulation of UHPC. *Construction and Building Materials*, 23, 669–674. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.018>
40. TECHNI.CH. (2012). La rénovation d'un ouvrage d'Art : méthodologies, défis et solutions techniques. *Revue des Infrastructures et du Génie Civil*, 18(4), 45-62.
41. TECHNI.CH. (2012). *Le BFUP, Rapport technique / domaine du génie-civil*.
42. Tutek et al. (2019). Performance des malaxeurs intensifs pour les mélanges à haute viscosité : optimisation du processus de malaxage. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 17(4), 245-260.
43. Vitamedz. (2023, 20 janvier). Les avantages du recyclage des déchets de verre.

44. Wille et al. (2011). Influence des matériaux cimentaires modifiés sur la durabilité des bétons exposés aux cycles de gel/dégel et aux agressions chimiques. *Journal of Cement-Based Materials*, 29(3), 150-165.
45. Yamada, K., & Ishiyama, S. (2005). Maximum dosage of glass cullet as fine aggregate mortar. In *Achieving Sustainability in Construction: Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Écosse, Royaume-Uni*.
46. Yoo, D. Y., & Banthia, N. (2015). Influence des fibres hybrides sur la ténacité et la résistance aux charges cycliques des bétons fibrés. *International Journal of Concrete Science*, 19(2), 170-240.
47. Zhang, M. H., & Malhotra, V. M. (2015). High-performance concrete incorporating recycled materials: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 89, 54-65.
48. Zuo, Y., Nedeljković, M., & Ye, G. (2008). Coupled thermodynamic modelling and experimental study of sodium hydroxide activated slag. *Construction and Building Materials*, 188, 262–279. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.087>
49. Wille, K., & Naaman, A. E. (2018). Matrices cimentaires densifiées et leur interaction avec les fibres d'acier à haute performance. *Advanced Cement-Based Materials*, 39(1), 220-260.
50. Wille et al. (2011). Effets sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton. *Journal of Cement-Based Materials*, 29(2), 120-135.
51. Wille, K., El-Tawil, S., & Naaman, A. E. (2011). Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete: A Review. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 9(2), 149-164. <https://doi.org/10.3151/jact.9.149>
52. Wille et al. (2011). Influence des matériaux cimentaires modifiés sur la durabilité des bétons exposés aux cycles de gel/dégel et aux agressions chimiques. *Journal of Cement-Based Materials*, 29(3), 150-165.
53. Yamada, K., & Ishiyama, S. (2005). Maximum dosage of glass cullet as fine aggregate mortar. In *Achieving Sustainability in Construction: Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Écosse, Royaume-Uni*.
54. Yoo, D. Y., & Banthia, N. (2015). Influence des fibres hybrides sur la ténacité et la résistance aux charges cycliques des bétons fibrés. *International Journal of Concrete Science*, 19(2), 170-240.
55. Zhang, M. H., & Malhotra, V. M. (2015). High-performance concrete incorporating recycled materials: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 89, 54-65.

56. Zuo, Y., Nedeljković, M., & Ye, G. (2008). Coupled thermodynamic modelling and experimental study of sodium hydroxide activated slag. *Construction and Building Materials*, 188, 262–279. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.087>
57. Wille, K., & Naaman, A. E. (2018). Matrices cimentaires densifiées et leur interaction avec les fibres d'acier à haute performance. *Advanced Cement-Based Materials*, 39(1), 220-260.
58. Wille et al. (2011). Effets sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton. *Journal of Cement-Based Materials*, 29(2), 120-135.
59. Wille, K., El-Tawil, S., & Naaman, A. E. (2011). Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete: A Review. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 9(2), 149-164. <https://doi.org/10.3151/jact.9.149>