

Université 20 Août 1955-Skikda

Faculté des Sciences

Département : Génie civil

Réf : D012125006D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم: الهندسة المدنية

المرجع: D012125006D

Thèse présentée en vue de l'obtention
du diplôme de
Doctorat LMD
En génie civil
Option : Géo-matériaux

Contribution à l'étude d'un BFUP à base des granulats recyclés

Présentée par :

LEKOUI Mohamed Tahar

Dirigée par

M^{me}. HEBHOUB Houria

Soutenue publiquement le : 06 Février 2025

Devant le jury composé de :

Président	Dr. Boudjellal Khaled	M.C.A. Univ. 20 Aout 1955 - Skikda
Rapporteur	Pr. Hebhoub Houria	Pr. Univ. 20 Aout 1955 - Skikda
Co-rapporteur	Dr. Kechkar Chiraz	M.C.A. Univ. 08 Mai 1945 - Guelma
Examineur	Dr. Abdelouahed Assia	M.C.A. Univ. 20 Aout 1955 - Skikda
Examineur	Dr. Kherraf Leila	M.C.A. Univ. 20 Aout 1955 - Skikda
Examineur	Dr. Amouri Chahinez	M.C.A. Univ. Constantine
Examineur	Dr. Bensebti Salaheddine	M.C.A. Univ. Constantine

Remerciement

Toute notre parfaite gratitude et remerciement à ALLAH le tout puissant, pour m'avoir donnée la force et le courage pour accomplir ce travail, j'espère qu'il soit bien réalisé et bénéfique.

Ce travail a été réalisé sous la direction de Pr Mme H.Hebhoub, je tenais à notifier un remerciement à tous les enseignants qui ont contribué à mon formation en particulier mon encadrent Pr Mme H.Hebhoub et le co-encadrent C.KECHKAR, pour ces conseils, son aide et sa gentillesse... merci.

J'exprime mes remerciements à:

- ✓ *L'ensemble de membres de jury pour avoir accepté de juger mon travail.*
- ✓ *Toute l'équipe de notre laboratoire GENIGEOT à El Harrouch.*
- ✓ *Tous les responsables de département et de laboratoire de Génie Civil.*

Enfin, nous ne serions jamais assez reconnaissants envers ceux qui nous ont soutenus et ceux qui ont contribué de près ou de loin pour réaliser ce travail.

Merci

Dédicace

Je dédie ce travail aux personnes qui me sont les plus chères au monde :

À ma chère mère, pour son soutien indéfectible, ses encouragements constants et les nombreux sacrifices qu'elle a consentis. Que Dieu la protège et veille sur elle.

À l'âme de mon père, que Dieu lui accorde sa miséricorde.

- ✓ *À mon épouse et à mes enfants, qui ont fait preuve de patience pendant de longues années pour me permettre de terminer ce doctorat.*
- ✓ *A mes sœurs et mes frères*
- ✓ *A toute ma famille*
- ✓ *A tous mes amis et mes collègues*
- ✓ *A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin*

Merci

Résumé

Ce travail a pour objectif de chercher une formulation spécifique d'un Béton Fibré Ultra Performant (BFUP) à base des matériaux locaux existants en Algérie en raison de l'absence d'une formulation généralisée dans le monde qui limite leur utilisation d'une part, et de réutiliser les déchets dans cette formulation pour diminuer le coût de fabrication élevé de ce type de béton et le rendre écologique d'autre part. Pour réaliser ce travail nous avons cherché expérimentalement une formulation de référence à base de granulats ordinaires locaux, ensuite d'introduire dans la masse de cette formulation des granulats recyclés et en particulier des fillers recyclés de déchets de céramique et laitier granulé de haut fourneau et étudié leurs effets sur les propriétés à l'état frais (densité, ouvrabilité et air occlus) et à l'état durci à savoir la résistance en compression et en traction par flexion, le module d'élasticité, la résistance aux ultrasons et au scléromètre ainsi que les essais de durabilité (absorption capillaire et par immersion, porosité et résistances chimiques). L'analyse de la microstructure a été réalisée par microscopie électronique à balayage (MEB), complétée par une analyse par (EDAX). La comparaison des résultats du BFUP utilisant des déchets de céramiques et de laitier avec le BFUP témoin, à 28 jours montre une augmentation des résistances à la compression d'environ 8% et 7% respectivement, ainsi qu'une augmentation des résistances à la traction en flexion de 17% et 2% respectivement. De plus, il y a eu une diminution de la porosité de 17% et 42% respectivement. Les résultats révèlent qu'il est possible de produire un BFUP à base des matériaux locaux et d'améliorer leurs performances et paramètres de durabilité par l'ajout des fillers recyclés.

Mots-clés: BFUP, déchets, céramique, laitier, formulation, caractérisation, performance, durabilité,

الملخص

يهدف هذا العمل إلى البحث عن صياغة محددة للخرسانة الليفية فائقة الأداء (خ.ل.ف.أ) استنادًا إلى المواد المحلية الموجودة في الجزائر بسبب عدم وجود تركيبة عامة في العالم تحد من استخدامها من ناحية، وإعادة استخدام النفايات في هذه التركيبة لخفض تكلفة التصنيع المرتفعة لهذا النوع من الخرسانة وجعلها صديقة للبيئة من ناحية أخرى. لتنفيذ هذا العمل ، بحثنا تجريبيا عن تركيبة مرجعية تعتمد على الركام المحلي العادي ، ثم أدخلنا الركام المعاد تدويره وخاصة الحشوات المعاد تدويرها من نفايات السيراميك وخبث أفران الصهر المحبب في كتلة هذه التركيبة ودرسنا آثارها على الخصائص في الحالة الطازجة (الكثافة ، قابلية التشغيل والهواء المحبوس) وفي الحالة الصلبة ، أي قوة الانضغاط، والشد عن طريق الانحناء ، معامل المرونة ، مقاومة الموجات فوق الصوتية ومقياس الصلابة، بالإضافة إلى اختبارات المتانة (الامتصاص الشعري وعن طريق الغمر، والمسامية، والمقاومة الكيميائية). تم إجراء تحليل البنية المجهرية بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، مع استكماله بتحليل بواسطة (EDAX). أظهرت مقارنة نتائج (خ.ل.ف.أ) باستخدام نفايات السيراميك والخبث مع تركيبة (خ.ل.ف.أ) المرجعية في 28 يوما زيادة في مقاومة الانضغاط بنسبة 8% و7% تقريبا على التوالي، بالإضافة إلى زيادة في مقاومة شد الانحناء بنسبة 17% و2% على التوالي. بالإضافة إلى ذلك، كان هناك انخفاض في المسامية بنسبة 17% و42% على التوالي. تكشف النتائج أنه من الممكن إنتاج (خ.ل.ف.أ) من المواد المحلية وتحسين معايير الأداء والاستدامة عن طريق إضافة الحشوات المعاد تدويرها.

الكلمات المفتاحية:

(خ.ل.ف.أ)، النفايات، السيراميك، الخبث، الصياغة، التوصيف، الأداء، الاستدامة،

Abstract

The objective of this work is to search for a specific mix design of the Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) was proposed and applied for an Algerian existing materials. In the absence of a general mix design that limits their use, and to reuse waste the present mix design can help in reducing the high manufacturing cost of this type of concrete and make it more environmentally friendly. Here we've looked for a reference mix design based on local ordinary aggregates, then, we introduced the recycled fillers from ceramic waste and granulated blast furnace slag into our mix design and we have studied their effects on the properties of the fresh state (density, workability, and air content) and in the hardened state, namely compressive and flexural tensile strength, modulus of elasticity, ultrasonic and sclerometer resistance, as well as durability tests (capillary and immersion absorption, porosity, and chemical resistance). The analysis of the microstructure was carried out by scanning electron microscopy (SEM), complemented by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). Comparison of the results of UHPFRC using ceramic waste and slag fillers with the control UHPFRC at 28 days shows an increase in compressive strengths of approximately 8% and 7% respectively, as well as an increase in flexural tensile strengths of 17% and 2% respectively. In addition, there was a decrease in porosity of 17% and 42% respectively. The results reveal that it is possible to produce UHPFRC based on local materials and improve their performance and durability parameters and their microstructure by adding recycled fillers.

Keywords: UHPC, waste, ceramics, slag, formulation, characterization, performance, durability,

Sommaire

Sommaire	i
Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux.....	v
Introduction générale	2
I. Recherche bibliographique.....	6
I.1 Introduction	6
I.2 Béton fibre à ultra haut performance	6
I.2.1 Définition.....	6
I.2.2 Historique et réglementation	7
I.2.3 Composition	7
I.2.4 Principe de formulation	10
I.2.5 Propriétés des BFUP.....	11
I.2.5.1 Propriétés à l'état frais	11
I.2.5.1.1 Classes de consistance	11
I.2.5.1.2 Teneur en air	12
I.2.5.1.3 Masse volumique.....	12
I.2.5.2 Propriétés à l'état durci.....	12
I.2.5.2.1 Classes de résistance à la compression.....	12
I.2.5.2.2 Classes de comportement en traction	13
I.2.5.3 Microstructure	13
I.2.5.4 Durabilité	14
I.2.6 Fabrication et mise en œuvre.....	16
I.2.7 Utilisation	16
I.2.8 Les principaux BFUP disponibles aux marchés	16
I.2.9 Quelques ouvrages en BFUP	17
I.3 Valorisation des granulats recyclés dans le béton	20
I.3.1 Granulats recyclés	20
I.3.2 Béton à base des granulats recyclés.....	20
I.4 Valorisation des granulats recyclés et déchets dans le BFUP	21
I.4.1 Travaux antérieurs utilisent des granulats recyclés dans les BFUP	21
I.5 Conclusion.....	24
II. Caractérisation des matériaux.....	26
II.1 Introduction	26
II.2 Caractérisation des matériaux	26
II.2.1 Ciment	26
II.2.1.1 Propriétés physiques de ciment	27
II.2.2 Fumée de silice.....	28
II.2.3 Fillers recyclés	29
II.2.3.1 Laitier granulé de haut fourneau	29
II.2.3.2 Fillers de déchets de céramique	29
II.2.4 Sable	31
II.2.4.1 Analyse granulométrique	31
II.2.4.2 Masses volumique absolue, réelle et absorption d'eau	32
II.2.4.3 Masse volumique en vrac et porosité intergranulaire	32
II.2.4.4 Essai au Bleu de Méthylène	33
II.2.4.5 Equivalent de sable	34

Sommaire

II.2.4.6 Analyse chimique.....	35
II.2.5 Les fibres.....	35
II.2.6 Adjuvant.....	35
II.2.7 Eau de gâchage.....	36
II.3 Conclusion.....	36
III. Programme expérimental et méthodologie d'essais	38
III.1 Introduction.....	38
III.2 Programme Expérimental	38
III.2.1 Recherche de la formulation	38
III.2.2 Composition des mélanges	38
III.2.3 Différentes compositions des mélanges.....	39
III.2.4 Fabrication des éprouvettes	40
III.3 Méthodes D'essais	41
III.3.1 Essai sur béton frais	41
III.3.1.1 Etalement au cône d'Abrams	41
III.3.1.2 Air occlus.....	42
III.3.1.3 Densité	42
III.3.2 Essai sur béton durci	43
III.3.2.1 Essai de compression	43
III.3.2.2 Essai de traction par flexion.....	43
III.3.2.3 Essai au scléromètre.....	43
III.3.2.4 Essai d'ultrason.....	45
III.3.2.5 Essai d'absorption par immersion.....	45
III.3.2.6 Essai de porosité accessible à l'eau	46
III.3.2.7 Essai d'absorption capillaire.....	47
III.3.2.8 Essai pénétration de chlorures	47
III.3.2.9 Attaques chimiques.....	48
III.3.2.10 Microstructure.....	49
III.4. Conclusion	49
IV. Influence du type de fillers sur les propriétés des BFUP	51
IV.1 Introduction	51
IV.2 Influence du type de fillers sur les propriétés des BFUP à l'état frais	51
IV.2.1 Densité	51
IV.2.2 Consistance.....	51
IV.2.3 Teneur en air occlus.....	52
IV.3 Influence du type de fillers sur les propriétés des BFUP à l'état durci	53
IV.3.1 Résistance à la compression	53
IV.3.2 Résistance à la traction par flexion.....	54
IV.3.3 Indice sclérométrique	54
IV.3.4 Vitesse ultrasonique.....	55
IV.3.5 Module d'élasticité dynamique	56
IV.4 Etude microstructurelle.....	57
IV.5 Conclusion	62

Sommaire

V. Effet des fillers recyclés sur les paramètres de durabilité	64
V.1 Introduction.....	64
V.2 Effet des fillers recyclés sur les paramètres de durabilité.....	64
V.2.1 Porosité accessible à l'eau	64
V.2.2 Absorption d'eau par immersion	64
V.2.3 Absorption d'eau par capillarité.....	65
V.2.4 Pénétration des chlorures	67
V.2.5 Attaque chimique dans les milieux agressifs	67
V.2.5.1 Attaque chimique par l'acide chlorhydrique (HCl)	67
V.2.5.2 Attaque chimique par l'acide sulfurique (H ₂ SO ₄)	68
V.2.5.3 Attaque chimique par l'acide acétique (CH ₃ COOH).....	69
V.2.5.4 Attaque chimique par hydroxyde de sodium (NaOH)	70
V.3 Conclusion	70
Conclusions Générales.....	73
Références bibliographiques.....	75

Liste des figures

Figure I. 1: Centrale de Cattenom. Les aéroréfrigérants à courants croisés.....	15
Figure I. 2: Pont de Montpellier.....	17
Figure I. 3: Vue d'ensemble de la couverture du péage du Viaduc de Millau.	18
Figure I. 4: Vue de la couverture du stade Jean-Bouin.....	18
Figure II. 1: Ciment SARIE CEM II/A-L 52.5 N de Lafarge.....	26
Figure II. 2: Mesure de la densité	27
Figure II. 3: Mesure de la SSB	27
Figure II. 4: Fumé de silice SILTEK POWDER TEKNACHEM	28
Figure II. 5: Echantillon de laitier broyé	29
Figure II. 6: Déchets et fillers de céramique.....	30
Figure II. 7: Courbe d'analyse granulométrique du sable de dune.....	31
Figure II. 8: Masses volumiques absolue, réelle et absorption d'eau.....	32
Figure II. 9: Masse volumique apparente	33
Figure II. 10: Essai au Bleu de Méthylène	34
Figure II. 11: Essai d'équivalent de sable.....	34
Figure II. 12: Fibres de polypropylène (FIBRETEK PP 12mm).....	35
Figure III. 1: Malaxeur	40
Figure III. 2: Moules.....	41
Figure III. 3: Etalement au cône d'Abrams	42
Figure III. 4: Aéromètre � béton.....	42
Figure III. 5: Mesure de la densité.....	43
Figure III. 6: Essai de compression	43
Figure III. 7: Essai de traction par flexion.....	44
Figure III. 8: Essai au scléromètre.....	44
Figure III. 9: Essai d'ultrason.....	45
Figure III. 10: Etuves pour l'essai d'absorption par immersion.....	46
Figure III. 11: Essai de porosité	46
Figure III. 12: Essai d'absorption par capillarité.....	47
Figure III. 13: Essai pénétration des chlorures	48
Figure III. 14: Essai des attaques chimiques	49
Figure IV. 1: Variation de la densité des BFUP	51
Figure IV. 2: Variation de la consistance des BFUP	52
Figure IV. 3: Variation de la teneur en air	52
Figure IV. 4: Variation de la résistance à la compression	53
Figure IV. 5: Variation de la résistance à la traction par flexion	54
Figure IV. 6: Variation de l'indice de rebondissement.....	55
Figure IV. 7: Variation de la vitesse de propagation	55
Figure IV. 8: Variation du module d'élasticité selon la vitesse d'ultrason	56
Figure IV. 9: Image MEB des BFUP BT, BC, BL	57
Figure IV. 10: Les micrographies MEB et les spectres EDAX du BT.....	58
Figure IV. 11: Les micrographies MEB et les spectres EDAX du BC.....	59
Figure IV. 12: Les micrographies MEB et les spectres EDAX du BL.....	60
Figure IV. 13: Représentation Si/Ca et Al/Ca	61
Figure V. 1: Variation de la porosité accessible à l'eau.....	64
Figure V. 2: Variation de l'absorption par immersion.....	65
Figure V. 3: Variation de l'absorption par capillarité en fonction du temps	66
Figure V. 4: Variation du coefficient de capillarité C.....	66

Liste des figures

Figure V. 5: Variation de la profondeur de pénétration des chlorures en fonction du type de BFUP.....	67
Figure V. 6: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans 5% de HCL.....	68
Figure V. 7: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans 5% de H ₂ SO ₄	68
Figure V. 8: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans 5% CH ₃ COOH....	69
Figure V. 9: Variation de masse en fonction de la période d'immersion dans 5% NaOH	70

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Classes de consistance pour les BFUP (NF-p18-470 , 2016).....	12
Tableau I. 2: Classes de résistance à la compression pour les BFUP	13
Tableau I. 3: Construction de ponts avec BFUP en Amérique du Nord.....	19
Tableau II. 1: Composition chimique et minéralogique du CPJ-CEM II.....	28
Tableau II. 2: Composition chimique de fumé de silice.....	28
Tableau II. 3: Composition chimique de laitier.....	29
Tableau II. 4: Composition chimique des fillers de céramique.....	30
Tableau II. 5: Masses volumiques absolue, réelle et absorption d'eau	32
Tableau II. 6: Masse volumique apparente du sable, et porosité intergranulaire	33
Tableau II. 7: Essai au Bleu de Méthylène.....	33
Tableau II. 8: Equivalent de sable des granulats	34
Tableau II. 9: Analyse chimique du sable	35
Tableau II. 10: Caractéristiques de super plastifiant	36
Tableau II. 11: Analyse chimique de l'eau	36
Tableau III. 1: Différentes formulations utilisées dans l'étude.....	39
Tableau III. 2: Composition des mélanges.....	39

Introduction générale

Introduction générale

Au cours des dernières années, la famille des bétons a connu des enrichissements significatifs grâce à l'introduction de béton offrant de nouvelles performances, telles que les bétons à haute performance (BHP), les bétons autoplaçants (BAP) et les bétons fibrés ultra-haut performants (BFUP).

Le BFUP est un type de béton qui se distingue par sa très haute résistance à la compression, au-delà de 130MPa, et par sa capacité à résister à la traction après fissuration, ce qui lui confère une ductilité en traction. De plus, sa non-fragilité permet de concevoir et de réaliser des ouvrages et des éléments d'ouvrage sans armature de béton armé.

Le BFUP est de plus en plus adopté par de nombreuses nations à travers le monde, dont la Chine, l'Australie, les États-Unis, le Canada, la France, l'Allemagne, le Japon, l'Italie, la Malaisie, la Nouvelle-Zélande, la Corée du Sud, la Slovénie et la Suisse (**Ghani et al., 2023**).

Ces caractéristiques mécaniques élevées permettent de réduire la quantité de matériau nécessaire et d'optimiser la conception structurelle. Les premières recherches en laboratoire sur ce type de béton remontent aux années 1990, avec des contributions significatives de la France et du Canada. Ces avancées ont trouvé leur première application industrielle en France en 1998, lors du remplacement des poutrelles en acier par des BFUP dans les tours de refroidissement de la centrale nucléaire de Cattenom. Au Canada, la première application a eu lieu en 1997, avec la construction de la passerelle piétonne de Sherbrooke (**Moula, 2023**).

Il est important de noter que la grande durabilité du BFUP est ce qui lui permettra de durer plus longtemps et de nécessiter moins d'entretien et de réparation, plutôt que sa grande résistance, ce qui a été décisif dans ce cas. Le BFUP a une durabilité exceptionnelle puisque sa matrice est pratiquement imperméable aux dioxydes de carbone, aux ions chlorés, aux sulfates, etc.

L'inconvénient remarquable à la BFUP réside dans la nécessité d'utiliser des composants exclusifs en quantités considérables, tels que le ciment, la fumée de silice, la poudre de quartz, les superplastifiants, et les microfibrilles métalliques à haute résistance. Cela se traduit par une augmentation de l'empreinte carbone et du coût global de ce type de béton. Ces inconvénients en termes de coûts et de durabilité ont restreint les possibilités d'application de ces bétons avancés, ralentissant ainsi leur introduction sur de nouveaux marchés, particulièrement dans les pays en développement qui ont des besoins importants en matière de construction d'infrastructures (**Abellán-García & García-Castaño, 2022**).

À présent, des efforts ont été déployés pour diminuer les coûts, accroître la durabilité, et élargir les domaines d'application en utilisant des déchets de matières premières et/ou des sous-produits industriels disponibles localement.

Ce travail qui s'inscrit dans ce contexte a pour objectif de trouver une formule spécifique à base des matériaux locaux et d'introduire dans cette formulation des ajouts provenant de recyclage tel que les fillers de déchets de céramique et de laitier granulé de haut fourneaux qui se trouvent en abondance en l'Algérie, dont le but d'améliorer les performances du BFUP

d'une part et de diminuer le coût global de ce matériau d'autre part. Pour réaliser ce travail nous avons cherché une formule préliminaire par l'utilisation des matériaux locaux ensuite, introduire dans cette formule des fillers recyclés de déchets de céramique et laitier et d'étudier les modifications apportées sur les propriétés à l'état frais et les performances mécaniques à l'état durci ainsi que les paramètres de durabilité et microstructurel.

L'introduction des fillers recyclés de déchet de céramique et laitier granulé de haut fourneau dans la formulation des BFUP a pour objectif:

- Formuler un BFUP à base des matériaux locaux,
- Produire des nouveaux matériaux écologiques et durables,
- Réduire le coût global du BFUP par l'utilisation des déchets,
- Éliminer les déchets,
- Préserver l'environnement par la récupération des déchets.

Cette thèse se divise en deux grandes parties, la première est une synthèse bibliographique, la deuxième est une partie expérimentale. Le manuscrit de la thèse est organisé en cinq chapitres majeurs, chacun abordant une partie spécifique de la recherche et fournissant une analyse détaillée des aspects clés du sujet étudié. Ces chapitres suivent une progression logique, depuis l'introduction du problème jusqu'à la présentation des résultats, en passant par les discussions et les conclusions.

Le premier chapitre offre une revue de la littérature et de recherche bibliographique, ainsi qu'un état des connaissances sur les BFUP, en abordant les principes de formulation, les composants, les propriétés, les aspects réglementaires, les avantages et les domaines d'application et quelques travaux antérieurs sur l'utilisation des granulats recyclés dans ce type de béton.

Le deuxième chapitre se concentre sur la caractérisation des matériaux composant les BFUP. Ce volet de l'étude examine en détail les différentes propriétés des matériaux utilisés dans la fabrication des BFUP, mettant en lumière leurs caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques. Afin de fournir une compréhension approfondie des composants du BFUP et de leur influence sur les propriétés finales du matériau.

Le troisième chapitre est entièrement dédié à la description du programme expérimental et la méthodologie des essais. Il détaille les différentes étapes du programme expérimental, y compris la planification des essais, le choix des méthodes d'analyse, la préparation des échantillons et les procédures de test. De plus, il présente la méthodologie utilisée pour mener à bien les essais, en expliquant les protocoles de mesure, les instruments utilisés et les critères d'évaluation des résultats. L'objectif principal de ce chapitre est de fournir une description complète de l'approche expérimentale adoptée dans l'étude, garantissant ainsi la validité et la fiabilité des résultats obtenus.

Dans le quatrième chapitre on analyse l'influence du type de fillers sur les propriétés du BFUP à l'état frais (densité, ouvrabilité et air occlus) et les propriétés à l'état durci à savoir la résistance en compression et en traction par flexion, l'homogénéité et la dureté à la surface et

le module d'élasticité dynamique. Une étude de la microstructure à l'aide de la microscopie électronique à balayage (MEB) est également abordée.

Le dernier chapitre se focalise sur l'analyse des paramètres de durabilité des BFUP et l'effet des fillers recyclés sur l'absorption d'eau par immersion et capillaire, la porosité accessible à l'eau, les résistances chimiques dans les milieux acides et bases ainsi que la pénétration des ions des chlorures.

Enfin, nous terminons par des conclusions générales, des recommandations et des perspectives.

Chapitre I
Recherche bibliographique

I. Recherche bibliographique

I.1 Introduction

Le béton, un matériau omniprésent dans de nombreux secteurs du génie civil, demeure largement plébiscité à l'échelle mondiale en raison de sa facilité de fabrication et de mise en œuvre. Ses multiples avantages tant sur le plan technique qu'économique, ainsi que ses performances éprouvées, en font un matériau de construction incontournable, apprécié pour sa fiabilité et sa durabilité. Son utilisation répandue s'étend à une variété d'applications, allant des infrastructures de transport aux structures de bâtiments, en passant par les ouvrages d'art, témoignant ainsi de sa polyvalence et de son importance dans l'industrie de la construction.

Plusieurs recherches et travaux ont été développés pour aboutir à ces performances qui ont débouché sur la mise au point des nouveaux types de bétons.

Ces dernières décennies, de nombreux travaux scientifiques ont montré les effets néfastes, pour la résistance et la durabilité, des excès de l'eau de gâchage. Dans la perspective d'améliorer les propriétés mécaniques des bétons, il était donc nécessaire d'explorer les voies visant à réduire ce dosage en eau (mise au point des plastifiants et fluidifiants vers les années 1970). En parallèle, d'autres recherches ont été orientées vers l'obtention d'un mélange de très haute compacité, lors de la formulation du béton (optimisation de l'étendu granulaire à une échelle microscopique par l'ajout d'additions extrafines) (**Malier, 1992**).

Ces deux voies de recherche ont abouti à des résultats très intéressants, et à la découverte des nouveaux bétons qui ont des performances très élevées et surtout en termes de la résistance et de la durabilité.

Ce chapitre explore une recherche bibliographique approfondie sur les BFUP, en mettant l'accent sur la formulation spécifique du BFUP, qui est l'objectif principal de notre étude. La synthèse bibliographique se concentre sur l'élaboration de la formulation, les propriétés à l'état frais et durci, ainsi que les indicateurs de durabilité. Un aperçu de l'historique et des aspects réglementaires est également inclus. Enfin, nous explorerons également la valorisation des déchets et l'utilisation des granulats recyclés dans ce type de béton pour une approche plus durable.

I.2 Béton fibré à ultra haut performance

I.2.1 Définition

Selon la norme française NF P 18-470, le BFUP est un «Béton caractérisé par une résistance à la compression élevée, supérieure à 130MPa, au-delà du domaine d'application de la norme NF EN 206/CN: 2014, par une résistance en traction post-fissuration importante permettant d'obtenir un comportement ductile en traction et dont la non-fragilité permet de calculer et de réaliser des structures et éléments de structure sans utiliser d'armatures de béton armé » (**NF P 18-470, 2016**).

Dans le cadre des BFUP, on cherche à exploiter la capacité des fibres à résister à la traction après que la matrice cimentaire se soit fissurée. Lorsque cette résistance est jugée suffisante, selon le comportement structural et les charges appliquées, il devient possible de

ne pas utiliser les armatures conventionnelles. À défaut, la précontrainte, que ce soit par pré-tension ou post-tension, permet aux poutres en BFUP de franchir de longues portées. Les fibres, quant à elles, interviennent dans la reprise des efforts de traction secondaires, ce qui peut limiter ou éliminer la nécessité d'un ferrailage passif secondaire (AFGC, 2002).

I.2.2 Historique et réglementation

Les recherches qui ont conduit au développement des BFUP ont débuté dans les années 70 au Danemark, sous la direction du professeur **Bache**. Ces travaux étaient réalisés dans le cadre de la technologie des Bétons de Poudres Réactives (BPR), principalement axée sur la production d'éléments préfabriqués.

En France, les recherches sur les BFUP remontent aux années 1990, sous la conduite de Pierre Richard (Groupe Bouygues) dans le cadre de la technologie des Bétons de Poudres Réactives (BPR). Ce concept a ensuite été perfectionné au centre de recherche Lafarge à l'Isle-d'Abeau, aboutissant au DUCTAL®, premier BFUP commercialisé (**Resplendino, 2006**).

La réglementation a pris quelques années après l'innovation du BFUP. Elle a débuté avec les recommandations de l'AFGC en 2002 et 2013, et en 2016, la norme française NF P 18-470 a été introduite.

I.2.3 Composition

Les BFUP sont, par définition, des matériaux à base de matrice cimentaire présentant une résistance en compression à 28 jours dépassant 130MPa et pouvant atteindre jusqu'à 250MPa (AFGC, 2002 et 2013). Cette section aborde les spécifications relatives au choix des matériaux ainsi que les méthodes de formulation des BFUP. Elle fournit également des détails sur les précautions à prendre lors de la fabrication et de la mise en œuvre (**Elsa Nguyen, 2015**).

La composition des BFUP repose au minimum sur cinq constituants; ciment, fumée de silice, fibres, eau et superplastifiant. Le rapport eau sur ciment (E/C) varie entre 0,15 et 0,25 avec des dosages en fumée de silice allant jusqu'à 30% (**Elsa Nguyen, 2015**).

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

a. Le ciment

À l'instar du béton traditionnel, le ciment utilisé pour la fabrication d'un béton BFUP doit être conforme à la norme NF EN 197-1. Le choix du ciment repose sur sa classe de résistance, ses propriétés d'hydratation, l'agressivité de l'environnement, ainsi que la composition globale du béton et son utilisation prévue. Afin de tirer pleinement parti de l'activité pouzzolanique des fines d'addition, on privilégie généralement les ciments sans ajouts (CEM I) (**Elsa Nguyen, 2015**).

Les Bétons Fibrés Ultra Performants (BFUP) possèdent des quantités importantes en ciment et leur masse volumique varie entre 700 et 1500kg/m³, beaucoup plus élevée que pour

des bétons ordinaires qui ont une masse volumique de 300 à 375kg/m³. Les ciments pour les BFUP doivent avoir une faible teneur en alcalin et C₃A permettant ainsi de réduire les besoins en eau, et la chaleur d'hydratation (**Arab et Rafai, 2017**).

Afin de créer suffisamment de pâte dans ce type de béton, il est nécessaire de combiner cette importante quantité de ciment avec la fumée de silice pour enrober les fibres de manière satisfaisante. La pâte liante (ciment + fumée de silice) doit être optimisée pour que le mélange ait un comportement autoplaçant avec un comportement mécanique meilleur (**Elsa Nguyen, 2015**).

Lors de la fabrication des BFUP, et en particulier lors de l'ajout d'eau, seulement 30% du ciment est hydraté. Les grains de ciment qui ne réagissent pas immédiatement confèrent au matériau une capacité potentielle d'auto-cicatrisation. Ainsi, en présence d'eau, les microfissures peuvent être comblées par les liaisons formées grâce à l'hydratation du ciment non encore réactif (**Habel, 2004**).

À cet égard, **Granger (2006)** a mené une étude sur des échantillons de BFUP préalablement fissurés (avec un rapport E/C de 0.2) et une quantité significative de ciment, immergés dans l'eau à 20°C pendant une période de 10 à 20 jours. Les résultats ont été comparés à ceux d'échantillons conservés à l'air. Il a démontré que les éléments conservés dans l'eau présentent une résistance nettement améliorée, révélant ainsi le processus d'auto-cicatrisation.

b. Fumée de silice

Les ultrafines incorporées, telles que la fumée de silice, jouent un rôle essentiel dans les BFUP à trois niveaux:

- Elles augmentent la compacité du matériau en comblant les espaces entre les grains de ciment, les fibres et le sable,
- Elles améliorent la rhéologie du mélange,
- Elles participent à la formation de produits d'hydratation grâce à leur effet pouzzolanique.

Ces trois actions combinées permettent au BFUP de développer une structure très dense, offrant ainsi une résistance accrue. De nombreux chercheurs se sont penchés sur la quantité optimale de fumée de silice pour obtenir les meilleures performances. **Parant, (2003)** recommande un dosage de 25%, tandis que **Chan & Chu, (2004)** a démontré que les meilleures performances en termes d'énergie nécessaire pour arracher les fibres de la matrice et de contrainte d'adhérence sont obtenues avec des teneurs comprises entre 20 et 30% (**Zeghad, 2018**).

Son utilisation doit également être conforme à la norme **NF EN 13263-1 (2009)**. En pratique, elle est fréquemment incorporée dans des bétons nécessitant une résistance mécanique élevée à 28 jours, comme les BFUP. En raison de ses qualités, cette ultrafine est de plus en plus recherchée, mais sa disponibilité est limitée par la capacité de production des industries du silicium, ce qui entraîne une augmentation de son prix.

c. Le sable

Le sable utilisé dans les BFUP est sélectionné en fonction de sa composition minérale (avec une teneur en SiO₂ supérieure à 98%), la taille moyenne de ses grains (généralement comprise entre 400 et 600µm), ainsi que leur forme arrondie. Ce matériau doit être particulièrement dur afin de créer des interfaces pâtes/granulats de haute qualité. La forme arrondie des grains réduit l'absorption d'eau et favorise une meilleure rhéologie du béton. De plus, le sable doit avoir une distribution granulométrique serrée et un module de Young proche de celui de la pâte, afin de garantir une bonne adhérence entre le granulat et la pâte (Khelil et al., 2023).

On distingue deux types de sable:

- Les sables concassés améliorent les résistances mécaniques grâce à de meilleures propriétés d'adhérence aux interfaces, ce qui réduit la microfissuration,
- Les sables roulés optimisent la rhéologie du mélange granulaire,

Dans la fabrication des BFUP, la taille moyenne des grains de sable est généralement inférieure à 1mm (Edouard, 2003).

d. Les adjuvants

Selon la norme **NF EN 934-2**, un adjuvant est un produit ajouté lors du malaxage du béton en petites quantités par rapport à la masse de ciment. Son rôle est de modifier les propriétés du mélange, que ce soit à l'état frais ou durci. Chaque adjuvant possède une fonction principale et peut également remplir une ou plusieurs fonctions secondaires.

Bien qu'il existe diverses catégories d'adjuvants, nous nous concentrerons particulièrement sur les superplastifiants utilisés dans les BFUP. Les superplastifiants sont des agents dispersants qui désagrègent les particules fines en suspension dans l'eau, en neutralisant les forces d'attraction entre les grains de ciment. Leur utilisation permet de diminuer la quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton, ce qui améliore sa résistance mécanique tout en maîtrisant ses propriétés rhéologiques (Zeghad, 2018).

e. Fibres

Les fibres sont intégrées dans le béton pour améliorer sa résistance à la traction et lui conférer une certaine ductilité, compensant ainsi sa fragilité naturelle. En général, il est possible d'incorporer des fibres métalliques, synthétiques, en verre ou végétales. Concernant les BFUP, les fibres peuvent être soit métalliques, soit organiques, et leur choix dépend du type d'application envisagé. En effet, la norme matériaux BFUP (**NF P 18-470, 2016**) recommande l'utilisation de fibres métalliques pour les BFUP à vocation structurelle, tandis que les fibres synthétiques sont préconisées pour les applications non structurelles (Elsa Nguyen, 2015).

f. Dosages des constituants usuels du BFUP

- Le ciment (quantité de ciment comprise entre 700 et 1400 kg/m³),

- Le sable fin ($0,063 \text{ mm} < \text{diamètre max} < 2 \text{ mm}$), granulats de taille réduite et de résistance mécanique élevée,
- La fumée de silice (10 à 30 % du poids de ciment C),
- Le quartz broyé (diamètre max $< 20 \mu\text{m}$),
- Les fibres métalliques et non métalliques (synthétiques, carbonées, ...etc.) pouvant être courtes ou bien longues de dimensions et formes différentes selon les propriétés recherchés,
- Le superplastifiant haut réducteur d'eau (le dosage varie de 0.5 à 3% du poids de ciment),
- L'eau (rapport E/Liant inférieur à 0,25).

Le BFUP est un béton à granulométrie fine, caractérisé par une sélection optimisée des granulats, un taux élevé de ciment et de fines, principalement de la fumée de silice, ainsi qu'un faible rapport eau/liant.

De plus, la quantité de superplastifiant utilisée dans le BFUP est nettement supérieure à celle employée dans le béton classique ou à haute résistance (Arab & Rafai, 2017).

I.2.4 Principe de formulation

La formulation du Béton Fibré Ultra-haute Performance (BFUP) vise à optimiser sa porosité pour réduire sa perméabilité, à affiner sa microstructure pour accroître ses performances, à améliorer son uniformité pour garantir sa qualité, et à augmenter sa résistance pour améliorer sa durabilité (Akeed et al., 2022).

L'inconvénient remarquable du BFUP réside dans la nécessité d'utiliser des composants exclusifs en quantités considérables, tels que le ciment, la fumée de silice, la poudre de quartz, les superplastifiants et les microfibres métalliques à haute résistance.

Cela se traduit par une augmentation de l'empreinte carbone et du coût global de ce type de béton. Ces inconvénients en termes de coûts et de durabilité ont restreint les possibilités d'application de ces bétons avancés, ralentissant ainsi leur introduction sur de nouveaux marchés, particulièrement le développement qui ont des besoins importants en matière de construction d'infrastructures (Joaquín et Eliana, 2022)

En raison de l'absence d'une méthode de formulation spécifique pour les BFUP, contrairement aux bétons ordinaires, des principes de formulation ont été proposés par (Richard & Cheyrezy, 1995), ainsi que par (De Larrard et Sedran, 1999), basés sur divers critères.

La formulation des bétons fibrés ultra-hautes performances (BFUP) repose sur plusieurs principes essentiels pour maximiser les performances mécaniques et la durabilité du matériau:

- Réduction de la taille des granulats; utiliser des granulats fins permet d'améliorer l'homogénéité du mélange, réduisant ainsi les points de concentration des contraintes qui pourraient affaiblir le béton,

- Augmentation du volume de pâte; l'accroissement du volume de la pâte cimentaire (composée de ciment et d'additions réactives) favorise la compacité du mélange,

-Optimisation granulométrique; la distribution optimale des poudres et granulats permet de réduire les vides, augmentant la densité du béton,

-Réduction du rapport Eau/Liant (E/L); un rapport inférieur à 0.25 est crucial pour limiter la porosité et augmenter la résistance mécanique.

-Traitement thermique; dans certains cas, un traitement thermique après la prise du béton est appliqué pour améliorer la microstructure du matériau,

-Ajout de fibres, l'incorporation de fibres, notamment métalliques, augmente la capacité du béton à résister à la fissuration et améliore sa capacité de déformation,

-Amélioration de la limite élastique; l'utilisation de microfibres métalliques permet d'améliorer la limite élastique du BFUP, offrant une meilleure résistance à la fissuration sous contrainte.

Ces principes combinés permettent de produire un béton ultra-performant, capable de répondre aux exigences les plus élevées en matière de construction moderne.

I.2.5 Propriétés des BFUP

I.2.5.1 Propriétés à l'état frais

I.2.5.1.1 Classes de consistance

Selon la norme française **NF P 18-470**, à l'état frais, 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.

La consistance du BFUP à l'état frais fait normalement l'objet d'une spécification associée à une valeur cible. Dans le cas contraire, le BFUP doit être classé selon sa consistance à l'état frais. Il appartient alors à l'une des trois classes de consistance suivantes:

a. Ca: BFUP susceptible d'être autoplaçant, c'est-à-dire généralement susceptible d'être mis en place sans vibration ni aide mécanique à l'écoulement;

b. Cv: BFUP visqueux, c'est-à-dire généralement susceptible d'être mis en place sans vibration mais qui nécessite une aide mécanique à l'écoulement;

c. Ct: BFUP à seuil, c'est-à-dire généralement susceptible de s'écouler sous l'effet d'un cisaillement dynamique mais dont la surface libre au repos est susceptible de tenir une pente.

La classe de consistance choisie doit être associée à la durée pratique d'utilisation au cours de laquelle le maintien de cette consistance est demandé.

Pour les classes Ct, il convient que l'aptitude à la mise en œuvre soit assurée dans les conditions du projet, et caractérisée par une performance mesurée selon un mode opératoire faisant l'objet d'un accord entre le producteur, le prescripteur et l'utilisateur.

Les domaines de consistance correspondant à ces classes sont caractérisés par l'un des essais suivants, adapté à la taille des fibres et des granulats composant le BFUP» (NF P 18-470, 2016). La classification est déterminée comme indiqué au **tableau I.1**.

Tableau I. 1: Classes de consistance pour les BFUP (NF P 18-470, 2016)

Classe	Étalement à la table a chocs (Selon la norme NF EN 12350-5) mm	Étalement au cône ASTM sans choc (Adapté à la norme ASTM C230/C230M) mm	Étalement au cône d'Abrams (Par référence à la norme NF EN 12350-8) mm
Ca	Sans choc: ≥ 560	≥ 270	≥ 760 (SF3)
Cv	Sans choc: 420 à 560 Après 15 chocs: > 560	230 à 270	660 à 760 (SF2)
Ct	Sans choc: < 420 Après 15 chocs: > 560	< 230	< 660 (SF1)

I.2.5.1.2 Teneur en air

Lorsque la teneur en air d'un BFUP doit être déterminée, elle doit être mesurée conformément à la norme **EN 12350-7**.

La teneur en air dans les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) est généralement très faible, en raison de la formulation optimisée qui limite l'incorporation d'air. La réduction de la porosité dans le BFUP est cruciale pour maximiser la compacité et les performances mécaniques. Cette faible teneur en air, associée à un dosage précis des superplastifiants et à une granulométrie fine, améliore la durabilité et la résistance du matériau. Le contrôle rigoureux de la teneur en air est essentiel pour éviter les défauts qui pourraient compromettre la performance globale du béton.

I.2.5.1.3 Masse volumique

Lorsque la masse volumique d'un BFUP frais doit être déterminée, elle doit être mesurée conformément à la norme **EN 12350-6**

I.2.5.2 Propriétés à l'état durci

I.2.5.2.1 Classes de résistance à la compression

Le BFUP est classé selon sa résistance à la compression, en se basant sur sa résistance caractéristique à 28 jours (f_{ck-cyl}), mesurée sur des cylindres de dimensions nominales 110mm/220 mm, conformément à la norme **NF EN 12390-3, 2012**. Les éprouvettes doivent être conformes aux normes **NF EN 12390-1** et **NF EN 12390-2**, ainsi qu'aux précisions des annexes B et C de la norme (NF P 18-470). La classification est présentée dans le **tableau I.2**.

Tableau I. 2: Classes de résistance à la compression pour les BFUP

Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindre MPa	Résistance caractéristique minimale indicative sur cube MPa
BFUP 130/145	130	145
BFUP 150/165	150	165
BFUP 175/190	175	190
BFUP 200/215	200	215
BFUP 225/240	225	240
BFUP 250/265	250	265

Si le contrôle de la résistance du BFUP pendant la phase de production se fait à l'aide d'éprouvettes cubiques, la résistance en compression doit être mesurée sur des cubes de 10cm de côté et la résistance caractéristique (fck-cube) peut être déterminée. Cependant, dans ce cas, une double mesure de la résistance, à la fois sur cylindres et sur cubes, est nécessaire lors des études, avec un nombre suffisant d'échantillons pour valider la valeur utilisée dans le projet. La mesure sur cylindres reste prioritaire pour la classification du BFUP.

Lors de la phase de contrôle, au lieu de comparer directement la valeur (fck-cube) aux limites de classe du **tableau I.2** ou aux niveaux intermédiaires utilisés, il est possible d'appliquer un coefficient de conversion déterminé lors des études, afin d'estimer (fck-cyl) et de vérifier la conformité à la classe (**NF P 18-470, 2016**).

I.2.5.2.2 Classes de comportement en traction

Le comportement en traction des BFUP qui sert de référence au calcul de l'ouvrage et à la spécification du matériau, doit être déterminé par analyse inverse de résultats d'essais de flexion selon la procédure décrite en annexe D (essais sur prismes) ou en annexe E (essais sur plaques minces) de la norme (**NF P 18-470**), selon la géométrie des éléments du projet, et en intégrant la prise en compte sur la phase post-fissuration du facteur d'orientation K traduisant l'effet de la mise en œuvre du BFUP dans la structure, le produit ou le composant d'ouvrage, selon la partie d'ouvrage concernée et la direction considérée. Les facteurs d'orientation K doivent être déterminés lors de l'épreuve de convenance pour l'ouvrage ou l'élément considéré conformément à l'annexe F de la norme (**NF P 18-470**).

Les BFUP couverts par la norme (**NF P 18-470**) doivent avoir une valeur caractéristique de la limite d'élasticité en traction à 28 jours (fctk,el) supérieure à 6MPa (**Zeghad, 2018**).

I.2.5.3 Microstructure

Il est bien établi que les performances des matériaux cimentaires dépendent étroitement de leur microstructure. Dans le cas de la pâte de BFUP, celle-ci joue un rôle crucial pour déterminer ses propriétés mécaniques et sa durabilité. Toutefois, la cinétique d'hydratation de la pâte de BFUP diffère de celle de la pâte de ciment Portland classique en raison de l'ajout d'additifs pouzzolaniques et d'un très faible rapport eau/liant. Ces éléments, associés à la réaction pouzzolanique, conduisent à une microstructure particulièrement dense et homogène (**Gu et al., 2013**).

Quand on incorpore de l'eau dans la pâte de BFUP contenant de la fumée de silice, le ciment se dissout et s'hydrate. La fumée de silice a un impact sur la vitesse d'hydratation du ciment. Dans un premier temps, pendant la phase de dissolution et de nucléation, et dans une étape régulée par la limite de phase, trois mécanismes accélèrent l'hydratation du ciment; le remplacement d'une partie du ciment par de la fumée de silice augmente le rapport eau/ciment (E/C) en maintenant le même rapport E/L, ce qui favorise l'hydratation du ciment en lui offrant davantage d'eau disponible. Les particules de fumée de silice jouent un rôle essentiel en tant que sites de nucléation pour les produits d'hydratation tels que le CSH et le Ca(OH)_2 , ce qui permet d'accélérer le temps nécessaire pour l'hydratation. En raison de sa grande réactivité, la fumée de silice peut absorber le Ca(OH)_2 grâce à des réactions pouzzolaniques, ce qui aide également à accélérer, dans une certaine mesure, l'hydratation du ciment (Gu et al., 2013).

La microstructure du Béton Fibré à Ultra-Haut Performance (BFUP) est caractérisée par une densité élevée et une homogénéité remarquable, résultant de l'utilisation de granulats finement calibrés et de l'incorporation de fibres et d'adjuvants spécifiques. À l'échelle microscopique, le BFUP présente une matrice cimentaire densifiée, où la fumée de silice et les poudres minérales jouent un rôle crucial dans l'optimisation des réactions d'hydratation. Cette structure est enrichie de produits d'hydratation comme le CSH, qui se forment autour des particules de ciment et de fumé de silice, créant un réseau continu qui renforce la résistance mécanique. De plus, les fibres, qu'elles soient métalliques, synthétiques ou naturelles, améliorent la tenue à la traction et la ductilité du matériau, tout en réduisant les risques de fissuration. L'interaction entre la matrice et les fibres dans cette microstructure contribue à des performances exceptionnelles en termes de durabilité, de résistance à l'usure et de comportement en conditions extrêmes.

I.2.5.4 Durabilité

La durabilité du Béton Fibré à Ultra-Haut Performance (BFUP) est l'un de ses atouts majeurs, en raison de sa résistance accrue aux agressions environnementales et aux sollicitations mécaniques. Grâce à sa composition riche en matériaux pouzzolaniques, comme la fumée de silice, et à l'intégration de fibres, le BFUP présente une faible perméabilité, limitant ainsi les infiltrations d'eau et les dommages liés au gel-dégel. Cette durabilité se traduit par une longévité significative, réduisant les besoins en maintenance et en réparation, ce qui en fait un choix privilégié pour des infrastructures exigeantes telles que les ponts, les tunnels et les bâtiments. En intégrant des principes de développement durable, le BFUP s'impose comme une solution efficace pour répondre aux défis contemporains en matière de construction.

Une étude de retour d'expérience sur un ouvrage en BFUP a révélé, à travers des analyses microscopiques ainsi que des mesures mécaniques et chimiques réalisées sur les échantillons provenant des poutrelles témoins de l'aéroréfrigérant n°1 de Cattenom dans l'Est de la France (**figure I.1**) ont donné des résultats conformes aux attentes; le module d'élasticité et la résistance à la compression demeurent stables, ce qui indique une bonne stabilité chimique des hydrates.

De plus, aucune pollution mesurable par les chlorures n'a été détectée. La carbonatation, potentiellement seulement superficielle et probablement liée à des dépôts externes, se manifeste par une couche de tartre qui agit comme une barrière diffusives. Cela

est cohérent avec l'absence de corrosion visible des fibres métalliques, sauf si celles-ci dépassent de la surface extérieure coffrée. Ces éléments suggèrent que les câbles de précontrainte sont protégés contre la corrosion, à l'exception peut-être de leurs extrémités, si celles-ci n'ont pas reçu un cachetage adéquat. Ainsi, le très haut potentiel de durabilité des structures en BFUP peut être confirmé (François et al., 2009).



Figure I.1: Centrale de Cattenom (les aéroréfrigérants à courants croisés)

a. Indicateurs de durabilité « classiques »

Pour évaluer la durabilité d'un matériau, il est essentiel de déterminer les mécanismes de dégradation potentiels en conditions normales d'utilisation. Ces mécanismes peuvent être d'origine mécanique, tels que le fluage, le retrait, la fatigue, l'abrasion, ou des contraintes liées aux températures (incendie, gel). Ils peuvent aussi être physico-chimiques, causés par des agents biologiques, chimiques ou par des irradiations. Il est donc crucial d'anticiper ces facteurs pour garantir la longévité du matériau face à diverses sollicitations (Myriam, 2009).

L'origine physico-chimique des dégradations est influencée par les caractéristiques de transfert du BFUP, telles que la porosité, la perméabilité et la diffusion. Ces paramètres influencent la résistance du matériau aux agents chimiques et physiques.

Ces caractéristiques sont évaluées par des essais en laboratoire afin de mieux comprendre leur impact sur la durabilité du béton. De là vient le terme indicateur de durabilité.

b. Indicateurs particuliers liés à la nature des BFUP

En plus des mécanismes traditionnels de dégradation, les BFUP peuvent comporter des risques particuliers liés à leur composition particulière. La stabilité des adjuvants, la réhydratation éventuelle due aux composants anhydres, la corrosion des fibres métalliques et les conséquences des traitements thermiques suscitent des questions. Toutefois, des recherches ont prouvé que ces éléments ne mettent pas en péril la pérennité des BFUP. Effectivement, la réhydratation et la cicatrisation des microfissures peuvent même consolider la structure et empêcher l'entrée d'agents agressifs dans la structure (Myriam, 2009).

I.2.6 Fabrication et mise en œuvre

La fabrication des BFUP nécessite une précision rigoureuse, une gestion constante des matériaux et des contrôles stricts. Il est crucial de bien maîtriser la quantité d'eau et le rapport eau/ciment. En général, la production exige des malaxeurs à fort gradient de cisaillement et à haute capacité de dispersion, un ordre d'ajout précis des composants et des temps de malaxage prolongés. Aucune addition d'adjuvant ou d'eau n'est autorisée après la production du béton. Le délai entre la fabrication des BFUP et leur mise en place doit être compatible avec les capacités de production en centrale et les méthodes d'application sur le chantier. (Patrick, 2018).

Les formulations des BFUP peuvent être adaptées à toutes les techniques de mise en œuvre. Leur caractère auto-plaçant facilite leur application, car ils adhèrent naturellement aux surfaces des coffrages. Cela permet une installation aisée, soit par une benne équipée d'une manchette, soit par pompage, sans besoin de vibration. Grâce à leur fluidité, les coffrages ou moules sont remplis sans difficulté, ce qui permet de réaliser des pièces aux formes complexes ou des parois de faible épaisseur. (Patrick, 2018).

Les coffrages doivent être parfaitement étanches en raison de la fluidité du matériau et de sa faible granulométrie. Il est essentiel de prévoir et de contrôler l'orientation des fibres avant de les installer dans les coffrages et les moules, afin de garantir leur alignement dans le sens d'écoulement du béton frais. Pour faciliter l'écoulement du matériau, il est recommandé d'utiliser des coffrages à arêtes arrondies afin d'éviter toute interruption d'écoulement et la rencontre de fronts de coulage sans interpénétration. Comme pour tous les bétons, il est important de prendre des mesures de précaution spécifiques lorsqu'on utilise des BFUP à des températures extrêmes, qu'elles soient basses ou élevées. Il est essentiel de procéder à une cure systématique et particulièrement rigoureuse en raison de la faible teneur en eau du béton, afin d'éviter la dessiccation. Il est nécessaire de valider les procédures de bétonnage à travers des essais préalables, ainsi que de maîtriser la rhéologie du béton frais en fonction des conditions climatiques pour la mise en œuvre. Le respect des tolérances géométriques des coffrages est également essentiel, en particulier pour des éléments de très faible épaisseur, où cette précision est d'autant plus nécessaire (Patrick, 2018).

I.2.7 Utilisation

Les normes françaises distinguent:

Les BFUP structurels, notés BFUP-S qui ont une résistance caractéristique supérieure à 150 MPa et sont renforcés de fibres métalliques en vue d'obtenir un comportement ductile en traction. Ces BFUP, qui recouvrent le même domaine technique que les recommandations **AFGC de 2002 et 2013**, sont couverts par la norme calculs **NF P 18-710**.

Les BFUP non structurels qui peuvent être utilisés dans diverses applications non structurelles ou architectoniques (panneau de revêtement de façade, mobilier urbain, équipements divers, ...). Ces BFUP peuvent faire l'objet d'applications industrielles associées éventuellement à des normes produit spécifiques (Jacques et Ziad, 2015).

I.2.8 I.2.8 Les principaux BFUP disponibles sur les marchés

Les BFUP actuellement disponibles sur le marché en France sont:

- Les différents bétons Ductal ®, développés dans le monde par LAFARGE HOLCIM;
- Le BSI ® développé par le groupe Eiffage;
- Le BCV ® développé par le cimentier Vicat et le groupe Vinci.

D'autres BFUP ont fait l'objet d'applications diverses:

- Le CEMTEC multiscale ® développé par l'Ifsttar (ex. Ipc);
- Des matériaux de laboratoire développés par Edf, par le Cerib.

Dans d'autres pays, on note la technologie CRC, développée par Aalborg Portland Cement (Densit) au Danemark. En Allemagne, plusieurs produits sont en cours de développement, bien que les technologies BSI® et Ductal® soient principalement utilisées en Europe de l'Ouest. Ductal® est également la technologie dominante en Asie, au Moyen-Orient, en Australie et en Amérique du Nord (États-Unis et Canada) (**Jacques et Ziad, 2015**).

I.2.9 Quelques ouvrages en BFUP

➤ Pont – Montpellier

Ce nouvel équipement public, situé au sud-est de Montpellier, fait le lien entre les quartiers récents et en développement de Port Marianne (**figure I.2**), tels que Consuls de Mer, Aiguerelles, la nouvelle mairie en rive droite, ainsi que les quartiers Rive Gauche, Jacques Cœur et Parc Marianne en rive gauche. Il établit également une connexion entre le centre-ville et sa périphérie proche, orientée vers la mer (**Fabrice, 2014**).



Figure I. 2: Pont de Montpellier

➤ La couverture du péage du Viaduc de Millau

L'ouvrage (**figure I.3**) présente une géométrie complexe (forme gauche à génératrices hélicoïdales). Il mesure 98m de long et 28m de large. Il est constitué de 53 voussoirs préfabriqués à joints conjugués collés et assemblés par des câbles de précontrainte (**Jacques et Ziad, 2015**).



Figure I. 3: Vue d'ensemble de la couverture du péage du Viaduc de Millau.

➤ La couverture du stade Jean-Bouin

La couverture du stade Jean Bouin (**figure I.4**) est une coque tridimensionnelle constituée d'éléments de dalles nervurées triangulaires de grandes dimensions en BFUP, associées à des inclusions en verre (**Jacques & Ziad, 2015**).



Figure I. 4: Vue de la couverture du stade Jean-Bouin.

Doiron (2009) cité plusieurs ouvrages construits en Amérique du Nord, réalisés entre 1997 et 2012, tableau I.3.

Tableau I. 3: Construction de ponts avec BFUP en Amérique du Nord

Année	Pont	Localité	Usage
1997	Passerelle à Sherbrooke	Rivière Magog, Sherbrooke, Québec, Canada	Tout le pont sauf tubes inox
2003	FHWA poutres PI	Langley, Vancouver	2 poutres en PI
2005	Wapello/Mars Hill	Wapello County, Iowa	3 poutres in I de 33.5 m
2006	Rainy Lake	Près de Fort Frances, Ontario	Joints, clés et bordures
2007	Passerelle Glenmore	Calgary, Alberta	Poutre centrale 33.6 m en T
2007	Sunshine Creek	Ouest de Thunder Bay, Ontario	Joints et bordures
2008	Cat Point Creek	Richmond, Virginie	5 poutres (bulb-tee) 24.3 m
2008	Hawk Lake	Est de Kenora, Ontario	Joints et bordures
2008	Jakway Park Bridge	Buchanan County, Iowa	3 poutres en PI
2008	Passerelle Country Hills	Calgary, Alberta	Poutre centrale 33.6 m en T
2009	Buller Creek	Nord de Vermillion Bay, Ontario	Joints et bordures
2009	Canandaigua Outlet	Village of Lyons, New York	8 poutres (bulb-tee) 26 m
2009	Log River	Sud de Nestor Falls, Ontario	Joints et bordures
2009	Otego Creek	Oneonta, New York	Joints et clés
2010	Chukuni River	Nord de Ear Falls, Ontario	Joints, clés et bordures
2010	Eagle River	Est de Vermillion Bay, Ontario	Joints, bordures, joints d'expansion
2010	LaValle River	Ouest de Fort Frances, Ontario	Joints et bordures
2010	Mathers Creek	Au nord d'Emo, Ontario	Joints, clés et bordures
2010	Wabigoon	Nord de Vermillion Bay, Ontario	Joints, bordures, coffrage pour pieux
2011	Bennett Creek	Route 248 Greenwood, New York	Joints
2011	Current River	Thunder Bay, Ontario	Joints et clés
2011	Keg Creek	Route US 6, Iowa	Joints, clés et bordures
2011	Fingerboard	Staten Island, New York	Joints
2011	MacKenzie River	Nord de Thunder Bay, Ontario	Joints, clés et bordures
2011	Shashawandah	Kettle Point, Ontario	Joints, clés et bordures
2011	Steel River	Est de Terrace Bay, Ontario	Joints, clés et bordures
2011	Wabigoon	Ouest de Dryden, Ontario	Joints et clés
2011	Wapello County	Wapello County, Iowa	Dalles gauffrées, joints et clés
2011	Whitemans Creek	Près de Brantford, Ontario	Joints, clés, coulis pour pieux
2011/12	Route 42 – pont de 100 pi.	Nord-ouest état de New York	Joints et clés construction en hiver
2011/12	Route 42 – point de 150 pi.	Nord-ouest état de New York	Joints et clés construction en hiver

I.3 Valorisation des granulats recyclés dans le béton

I.3.1 Granulats recyclés

Les déchets de construction et de démolition sont définis par l'Agence américaine de protection de l'environnement comme les déchets générés habituellement lors de nouvelles opérations de construction ou de rénovation ou de démolition de constructions existantes (rues, autoroutes, ponts, bâtiments, usines de services publics, jetées et barrages (**Wang et al., 2021**)).

La production de béton recyclé à partir de matériaux issus des déchets de construction et de démolition a été introduite et mise en œuvre pour la première fois pendant et après la deuxième Guerre mondiale, car de grandes quantités de gravats et de débris avaient été produites à la suite des bombardements des villes, notamment au Royaume-Uni et en Allemagne (**Wang et al., 2021**).

L'utilisation des déchets et sous-produits industriels comme granulats recyclés dans la production de béton représente une avancée majeure pour l'industrie de la construction en termes de durabilité. En intégrant des matériaux tels que les scories de haut fourneau, les cendres volantes ou les résidus de verre, ce procédé permet non seulement de réduire la dépendance aux granulats naturels, mais aussi de valoriser des déchets qui, autrement, seraient mis en décharge. Ces granulats recyclés contribuent ainsi à diminuer l'empreinte environnementale du secteur tout en maintenant des propriétés mécaniques et techniques comparables à celles des matériaux traditionnels (**Kou et Poon, 2009**). Ce processus s'inscrit dans une logique d'économie circulaire et d'optimisation des ressources, favorisant une approche plus écologique dans la construction.

Le recours aux déchets de construction, de démolition, ainsi qu'aux sous-produits industriels pour produire du béton recyclé constitue une solution efficace face aux enjeux environnementaux et matériels liés à la gestion des débris. Cette pratique permet de valoriser les gravats en les transformant en ressources utiles. Aujourd'hui, le recyclage des matériaux issus des sous-produits industriels ainsi que des déchets de construction et de démolition continue de générer des avantages économiques et environnementaux, en contribuant à la réduction des déchets et à la préservation des ressources naturelles.

I.3.2 Béton à base des granulats recyclés

Le béton à base de granulats recyclés est une solution durable qui permet de réduire l'impact environnemental de l'industrie de la construction. En intégrant des granulats issus de déchets de construction et de démolition, comme le béton concassé ou les briques, ce type de béton contribue à la réduction de la consommation de ressources naturelles et à la diminution des déchets envoyés en décharge. Les études montrent que l'utilisation de granulats recyclés peut améliorer la durabilité environnementale sans compromettre les performances mécaniques du béton, rendant cette alternative viable par rapport au béton traditionnel (**Kou, et Poon, 2012**). Ce procédé s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire, essentielle à la transition vers des pratiques de construction plus écologiques.

Le processus de fabrication du béton ultra-haute performance (BFUP) génère une quantité significative d'émissions de gaz à effet de serre, aggravant ainsi le réchauffement

climatique. L'utilisation de granulats de béton recyclé permet de diminuer la consommation de ressources naturelles et d'énergie (Yu et al., 2019).

I.4 Valorisation des granulats recyclés et déchets dans le BFUP

La valorisation des granulats recyclés dans le béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) est une thématique de recherche et d'innovation en génie civil, visant à rendre ce matériau hautement performant plus durable et écologique. Le BFUP est connu pour sa haute résistance mécanique et durabilité, mais il utilise principalement des granulats naturels et des matières premières de qualité élevée, souvent coûteuses et à fort impact environnemental.

L'industrie du ciment et du béton a su, au fil des décennies, intégrer des matériaux recyclés issus d'autres secteurs industriels pour répondre aux enjeux de durabilité et d'efficacité. Ces matériaux incluent notamment les laitiers de hauts fourneaux, un sous-produit de la sidérurgie, et les cendres volantes, qui proviennent de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. Leur incorporation partielle dans la composition du ciment et du béton permet à ces industries de diminuer leur recours aux ressources naturelles vierges, tout en réduisant leur empreinte carbone.

L'intérêt de cette pratique réside dans le fait que l'ajout de ces sous-produits n'altère pas la qualité des matériaux finaux. Bien au contraire, le ciment et le béton produits avec ces ajouts conservent leur résistance et leur durabilité, et ils répondent ainsi aux exigences de performance des constructions modernes. Cette initiative s'inscrit également dans une logique d'économie circulaire: les déchets d'une industrie deviennent des ressources pour une autre, contribuant ainsi à la réduction des déchets globaux et à la préservation des ressources naturelles.

Selon le Code Français de l'Environnement (**Article L541-1.**), «Un déchet tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériaux, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon».

La valorisation consiste dans « le réemploi, le recyclage ou toutes autres actions visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie » (**Loi n° 92-646 du 13 juillet 1992, Français**)

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa traficabilité.

L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir.

I.4.1 Travaux antérieurs utilisent des granulats recyclés dans les BFUP

Roig-Flores et al. (2021) ont étudié la recyclabilité des éléments en BFUP éliminés, incluant la production des granulats et de fibres recyclées issus de ces matériaux. La faisabilité de l'utilisation des granulats et de fibres recyclées à différents taux de substitution a été évaluée en examinant les propriétés rhéologiques et mécaniques des nouveaux éléments BFUP. Les mélanges de béton, avec des taux de remplacement des granulats de 50 % et

100%, ont démontré une résistance à la compression similaire à celle du BFUP d'origine, préservant sa réponse au durcissement par déflexion. Cependant, l'augmentation de la teneur en matériaux recyclés a légèrement réduit leur maniabilité. Les mélanges intégrant des fibres recyclées ont quant à eux présenté une baisse de résistance résiduelle et se sont comportés comme des matériaux à adoucissement par déflexion en cas de remplacement complet.

Kang et al. (2024) ont étudié l'utilisation des granulats recyclés issus des déchets de construction et de démolition, une solution prometteuse pour le secteur de la construction face à la pénurie croissante de granulats naturels. Cette étude explore l'opportunité de l'utilisation de granulats fins recyclés dans le béton à ultra-haute performance (BFUP), visant à réduire le retrait endogène, atténuer les impacts environnementaux et renforcer les résistances mécaniques. Trois types de fibres recyclés (RFA) de granulométries distinctes (0-0.6 mm, 0.6-1.18mm et 1.18-2.36mm) sont pré-saturés avant d'être intégrés au BFUP en remplacement du sable de quartz. Les effets de ces RFA pré-saturés sur l'ouvrabilité, l'humidité relative interne, le retrait endogène, la résistance à la compression, la perméabilité aux ions chlorures, et la microstructure du BFUP sont étudiées.

Les résultats expérimentaux montrent qu'en comparaison avec le BFUP témoin, l'incorporation de 20% de RFA de taille 1.18 à 2.36mm assure un durcissement interne efficace, maintenant une humidité relative interne plus élevée et préférentiellement ainsi le retrait endogène de 78.5 % à 7 jours. À 28 jours, la résistance à la compression du BFUP contenant 20% de RFA de 1.18 à 2.36mm enregistre une augmentation de 7.1%, sans impact notable sur la fluidité ni la résistance à la pénétration des ions chlorure. Les mécanismes sous-jacents à ces améliorations incluent un degré d'hydratation accumulé du BFUP, favorisé par le renforcement interne, ce qui optimise la microstructure de la zone de transition interfaciale et réduit le nombre des pores de grande taille. En outre, l'analyse de durabilité montre que l'intégration de RFA dans le BFUP entraîne des réductions de 7% des émissions de carbone et de 7.8% de la consommation d'énergie. Cette étude propose une méthode efficace pour atténuer le retrait endogène de le BFUP, en préservant ses propriétés mécaniques.

Le béton de verre à ultra-haute performance (BFUP) est un leader innovant dans la technologie de pointe du béton durable (**Sévar Dilkhaz et al., 2022**). Grâce à l'utilisation de verre post-consommation, la technologie BFUP peut améliorer l'environnement. Étant donné que ces matériaux ne sont ni biodégradables ni écologiquement inoffensifs, tout avantage économique provenant d'une réduction de la quantité de déchets déversés dans les décharges est indésirable. Cette étude passe en revue les recherches antérieures sur le comportement du béton à ultra-haute performance (BFUP) incorporant de la poudre de verre usagée comme matériau cimentaire respectueux de l'environnement. Une synthèse a également été réalisée pour les travaux antérieurs qui utilisaient du verre usagé broyé pour remplacer le ciment, la poudre de quartz (QP), la fumée de silice (SF) et le sable ou le sable de quartz (QS) dans les mélanges BFUP. Ainsi, diverses applications de la poudre de verre usagée (WGP) dans le BFUP et ses caractéristiques fraîches et durcies ont été examinées.

L'utilisation de la poudre de verre dans le BFUP a des répercussions sur les caractéristiques à l'état frais et mécaniques du béton qui doivent être prises en compte plus tôt dans les voies et les structures. Une étude exhaustive en cours évalue l'utilisation de la poudre de verre pour remplacer les SCM dans des mélanges de BFUP.

Selon **Soliman et Tagnit-Hamou (2017)**, la conception du béton à ultra-hautes performances (BFUP) repose principalement sur la densité de compactage et la distribution granulométrique de ses particules. Le ciment présente une lacune granulométrique à l'échelle microscopique, nécessitant l'ajout de matériaux plus fins, tels que la fumée de silice, pour la combler. Cependant, l'ajout de fumée de silice seul demande des quantités élevées (entre 25% et 30% du poids de ciment) en raison de sa finesse extrême, ce qui peut affecter défavorablement la rhéologie du béton. De plus, les ressources limitées et le coût élevé de la fumée de silice limitent l'adoption généralisée du BFUP sur le marché.

Cette étude explore la possibilité de produire et d'utiliser de la poudre de verre fin (PVF) en remplacement partiel de la fumée de silice dans le BFUP. Les résultats montrent que la PVF, avec une taille moyenne de particule de $3.8\mu\text{m}$, pourrait constituer une distribution granulométrique optimale pour combler l'écart entre les particules de ciment et celles de fumée de silice. Ils révèlent également qu'il est possible d'atteindre des résistances à la compression de 235 et 220MPa après 2 jours de cure à la vapeur, respectivement pour des remplacements de 30% et 50% de la fumée de silice par de la PVF, contre 204MPa pour le BFUP de référence contenant 100% de fumée de silice. Par ailleurs, la substitution des particules de fumée de silice par des particules de verre non absorbantes améliore la rhéologie du BFUP frais.

Dans sa thèse, **Moula (2023)** explore la possibilité de développer un béton à ultra-hautes performances (BUHP) à faible empreinte carbone en remplaçant une grande partie du ciment (jusqu'à 50%) par du laitier granulé de haut fourneau moulu (LHF) et en utilisant une faible proportion de fumée de silice (FS). Cette étude repose sur des substitutions partielles du ciment à des taux de 30% et 50% avec deux types de laitier, de finesses Blaine de $420\text{ m}^2/\text{kg}$ (SL1) et $700\text{ m}^2/\text{kg}$ (SL2), tout en maintenant un rapport eau/liant constant de 0.16 pour l'ensemble des mélanges. Elle examine l'influence de la finesse et du dosage du laitier sur les performances du BUHP, tant à court qu'à long terme.

Les résultats expérimentaux montrent qu'un BUHP contenant du SL2 peut offrir des performances comparables à celles des matériaux traditionnels basés sur la fumée de silice. Une substitution de ciment avec 30% de laitier réduit les besoins en superplastifiant (SP) et accélère l'hydratation et la prise. En revanche, un dosage de 50% de SL1 augmente la demande en SP, ralentissant l'hydratation et la prise, alors que le mélange avec 50% de SL2 améliore considérablement la maniabilité du BUHP et présente un effet d'accélération. Les mélanges incorporant 30% de SL2 affichent le retrait endogène le plus élevé. À 28 jours, un taux de 30% de SL1 améliore légèrement la résistance à la compression, tandis que le SL2, avec sa réactivité accrue, permet d'augmenter cette résistance dès 3 jours pour les faibles dosages. Le mélange à 50% de SL2 atteint une résistance similaire à celle du BUHP de référence au bout de 28 jours. Tous les BUHP testés présentent une résistance en traction par fendage supérieure à 6 MPa après 28 jours.

L'analyse microstructurale révèle que tous les mélanges étudiés possèdent une microstructure extrêmement dense et une porosité réduite. L'effet du laitier est particulièrement marqué avec des taux de substitution de 30% et 50% de SL2, combiné à la présence de FS, ce qui réduit considérablement la porosité et affine le réseau de pores, diminuant ainsi les propriétés de transfert. À long terme, les mélanges présentent une durabilité élevée, les matrices étant presque imperméables aux pénétrations de dioxyde de carbone et de chlorures. Dans leur thèse examine la possibilité de concevoir un BUHP à

faible empreinte carbone, avec un remplacement élevé du ciment (jusqu'à 50%) par du laitier granulé de haut fourneau moulu (LHF) et une faible proportion de fumée de silice (FS). Dans le cadre de cette étude, le ciment est partiellement substitué par du laitier à des taux de 30% et 50%, en utilisant deux types de laitiers, de finesses Blaine de 420 m²/kg (SL1) et 700 m²/kg (SL2), avec un rapport eau/liant constant de 0.16 pour tous les mélanges. L'impact de la finesse et du dosage du laitier sur les performances des BUHP à court et long terme est étudié.

D'un point de vue environnemental, le remplacement partiel du ciment par du LHF réduit significativement l'empreinte écologique des BUHP. Pour 1 m³ de BUHP, l'incorporation de 50% de laitier superfine (SL2) diminue les émissions de CO₂ d'environ 41%, rendant le mélange SL2-50SF plus durable que le béton de référence à base de FS. Toutefois, cette substitution à 50% de SL2 entraîne une augmentation du coût de production de 15% par rapport au mélange de référence.

I.5 Conclusion

Les Bétons Fibrés à Ultra-hautes Performances (BFUP) se distinguent par leurs qualités exceptionnelles, répondant aux exigences croissantes en matière de résistance, de durabilité et d'esthétisme dans le domaine de la construction. Grâce à leurs performances multiples, les BFUP offrent des possibilités étendues pour la réalisation de structures complexes et de grande envergure, nécessitant des propriétés mécaniques accrues et une durabilité renforcée. Ces matériaux permettent d'optimiser les conceptions structurales en augmentant les portées, réduisant les sections nécessaires et limitant la consommation de matières premières, ce qui contribue à la fois à la préservation des ressources et à la réduction des coûts globaux.

De plus, l'utilisation des BFUP favorise une exécution de chantier plus rapide et efficace, en raison de la diminution des phases de mise en œuvre et de la simplification des processus. Cette rapidité contribue également à une réduction de l'impact environnemental des projets. En termes d'esthétique, les BFUP permettent des finitions de surface fines et durables, apportant une élégance pérenne aux ouvrages. Par ailleurs, la liberté architecturale offerte par ces matériaux ouvre de nouvelles perspectives pour les concepteurs, leur permettant de créer des formes inédites tout en assurant la robustesse et la longévité des structures.

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu sur les BFUP, une définition, propriétés, composition, domaine d'utilisation et quelques déchets peut être valorisé dans ce type de matériau.

Chapitre II

Caractérisation des matériaux

II. Caractérisation des matériaux

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons en détail les caractéristiques des matériaux utilisés pour réaliser l'ensemble du programme expérimental. Ces matériaux comprennent le ciment, les fumées de silice, les granulats, l'adjuvant, les fillers de déchets de céramique et de laitier, les fibres de polypropylène, ainsi que l'eau de gâchage. Chacun de ces composants joue un rôle crucial dans la formulation et les performances finales du béton.

II.2 Caractérisation des matériaux

Les matériaux utilisés dans cette étude sont:

- Un ciment CPJ-CEM II/A-L de classe 52.5 N de la cimenterie de Lafarge M'sila,
- Un sable de dune de classe 0/1 provenant d'oued Zhor- Skikda,
- Fumée de silice de type SILTEK POWDER TEKNACHEM,
- Fillers de laitiers granulés de haut fourneau d'El-Hadjar- Annaba,
- Fillers de déchets de céramiques obtenus par broyage des chutes des lavabos,
- Fibres de polypropylène de type FIBERTEK PP TEKNACHEM,
- Adjuvant Master Glenium SKY 3080 BASF.
- Eau de robinet.

II.2.1 Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude pour l'ensemble des compositions, est un ciment portland de type CEM II de classe 52.5, conforme à la norme algérienne NA 442 (**figure II.1**), provenant de la cimenterie de Lafarge M'sila (Algérie). Ce ciment Portland est spécialement choisi pour ses propriétés optimales, adaptées aux exigences des formulations étudiées. Ses caractéristiques chimiques et minéralogiques sont données par le **tableau II.1**. Offrant une vue complète sur sa composition en termes d'éléments principaux et de phases minérales. Ces informations sont cruciales pour comprendre l'influence du ciment sur les propriétés finales des bétons élaborés dans cette recherche.



Figure II. 1: Ciment SARIE CEM II/A-L 52.5 N de Lafarge

II.2.1.1 Propriétés physiques de ciment

- **Densité**

L'essai de densité sur le ciment est une étape essentielle pour déterminer la masse volumique absolue du ciment. Cette caractéristique est importante car elle influence le dosage et la qualité du béton. La densité du ciment est définie comme la masse par unité de volume de ciment, sans compter les vides entre les grains. Les résultats de cet essai doivent être intégrés dans les calculs de dosage afin d'assurer une qualité constante et fiable du béton produit. La densité est de 3.10 g/cm^3 , déterminée à l'aide de densimètre le Chatelier, en utilisant l'acétone selon la norme **NF P15-435 (figure II.2)**.

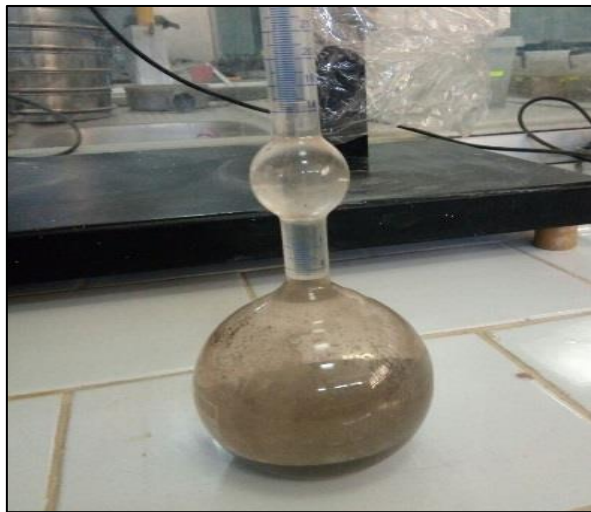


Figure II. 2: Mesure de la densité

- **Surface spécifique de Blaine**

La SSB est de $4425 \text{ cm}^2/\text{g}$, déterminée conformément à la norme **EN 196-6** par la méthode de perméabilité à l'air (**figure II.3**), qui consiste à observer le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un échantillon de ciment ou de fillers compact dans la cellule de perméabilimètre de Blaine. Plus la surface spécifique de la poudre est importante et plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long.



Figure II. 3: Mesure de la SSB

- Analyse chimique

Se fait par fluorescence par rayon X et par la méthode classique. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment sont présentées dans le **tableau II.1**.

Tableau II. 1: Composition chimique et minéralogique du CPJ-CEM II

Désignations	Résultats en %	Désignations	Résultats en %
CaO	61.69	CaO libre	0.97
Al ₂ O ₃	5.37	Cl ⁻	0.027
Fe ₂ O ₃	3.00	SO ₃	2.20
SiO ₂	19.34	C ₃ S	58.3
MgO	1.80	C ₂ S	14.6
Na ₂ O	0.14	C ₃ A	8.7
K ₂ O	0.76	C ₄ AF	11.26

II.2.2 Fumée de silice

L'additif utilisé dans notre programme de recherche, est le fumée de silice (**figure II.4**), est un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Les fumées de silice présentent des propriétés pouzzolaniques, ce qui les rend particulièrement efficaces pour améliorer les performances du béton. Cet additif possède une surface spécifique BET de 220.000 cm²/g et une masse volumique absolue de 2.24 g/cm³.



Figure II.4: Fumé de silice SILTEK POWDER TEKNACHEM

Les caractéristiques chimiques des fumées de silice, sont présentées dans le **tableau II.2**.

Tableau II. 2: Composition chimique de fumée de silice

Désignation	Résultats en %	Désignation	Résultats en %
CaO	0.5	SiO ₂	95
Al ₂ O ₃	0.5	MgO	1
Fe ₂ O ₃	1	Na ₂ O	0.60

Les fumées de silice, riches en SiO₂, possèdent des propriétés pouzzolaniques qui augmentent les résistances à long terme du béton.

II.2.3 Fillers recyclés

II.2.3.1 Laitier granulé de haut fourneau

Le laitier est un sous-produit de l'industrie métallurgique possédant des propriétés hydrauliques (**figure II.5**), provient de l'usine d'El-Hadjar Annaba. Le laitier est broyé dans un broyeur à boulet normalisé de capacité 10 kg pour avoir la finesse voulue. Cet ajout a une surface spécifique de 3300 cm²/g et une masse volumique absolue de 2.880 g/cm³.



Figure II. 5: Echantillon de laitier broyé

Dans le **tableau II.3**, on présente les résultats des analyses chimiques de laitier. Le filler de laitier est composé essentiellement de CaO (43.30), qui offre à la matrice cimentaire une bonne cohésion à court terme (**Moula, 2023**).

L'utilisation du laitier dans le béton permet d'améliorer plusieurs aspects, notamment la durabilité, la résistance à long terme et la réduction de la chaleur d'hydratation (**Sivakumar et al., 2024**).

Tableau II. 3: Composition chimique de laitier

Désignation	Résultats en %	Désignation	Résultats en %
CaO	43.30	MgO	5.25
Al ₂ O ₃	7.19	Na ₂ O	0.20
Fe ₂ O ₃	1.69	K ₂ O	0.65
SiO ₂	38.14	SO ₃	0.34

II.2.3.2 Fillers de déchets de céramique

Les fillers de déchets de céramique (**figure II.6**) sont obtenus par broyage des chutes provenant principalement des usines de production de céramique. Ces déchets résultent de la fragmentation des matériaux durant le processus de fabrication ou d'expédition. De plus, les

travaux de rénovation à domicile génèrent également des déchets céramiques, qui peuvent être recyclés et transformés en fillers.

Ces fillers de céramique possèdent une densité de 2.920 g/cm^3 , ce qui est relativement élevé. Cette caractéristique est importante pour leur utilisation en tant qu'ajout, car elle contribue à augmenter la densité du béton produit.

En outre, les fillers de céramique ont une surface spécifique de $5177 \text{ cm}^2/\text{g}$, une valeur qui reflète leur finesse et leur grande surface réactive. Cette finesse élevée permet aux fillers de céramique d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton en comblant les pores et en participant aux réactions pouzzolaniques (Li et al., 2021).

En résumé, l'utilisation des fillers de déchets de céramique dans la formulation du béton offre une solution écologique en recyclant des matériaux qui seraient autrement mis au rebut, tout en améliorant les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Ces fillers, avec leur densité et leur surface spécifique élevées, peuvent contribuer de manière significative à la performance globale du matériau final.



Figure II. 6: Déchets et fillers de céramique

Les caractéristiques chimiques des fillers de déchets de céramiques sont présentées dans le **tableau II.4**.

Tableau II. 4: Composition chimique des fillers de céramique

Désignation	Résultats en %	Désignation	Résultats en %
CaO	1.52	MgO	0.28
Al ₂ O ₃	21.90	Na ₂ O	1.11
Fe ₂ O ₃	0.6	K ₂ O	1.39
SiO ₂	76.86	Cl	--

D'après les analyses chimiques on constate que les fillers de déchets de céramique sont riches en silice (76.86% de SiO₂), en plus de contenir un pourcentage d'oxyde d'aluminium (21.90% d'Al₂O₃).

Les résultats des essais de caractérisation des fillers recyclés ont montré:

- La densité et la finesse des fillers recyclés de céramique sont légèrement supérieures à celles des fillers de laitier.

-Les fillers recyclés de céramique a une teneur en silice S_iO_2 très élevée comparativement avec celle des fillers de laitier, la présence de silice en grande quantité favorise l'hydratation à long terme (Moula, 2023).

-La teneur en alumine est de 21.90% dans les fillers recyclés de céramique et de 7.21% dans les fillers de laitier. Cet élément augmente le durcissement lors du premier jour, par contre influe négativement sur la résistance chimique (Moula, 2023).

- Les autres éléments tels que l'oxyde de fer, les alcalis, le SO_3 et le MgO se trouvent en faible quantité.

II.2.4 Sable

II.2.4.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique par tamisage selon la norme **NF EN 933-1** peut être définie comme un ensemble d'opérations qui permettent de séparer les grains en fonction de leur grosseur, en utilisant des tamis à maille carrée. Cela permet d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension. Les résultats de l'analyse granulométrique sont exploités par la courbe d'analyse granulométrique (**figure II.7**).

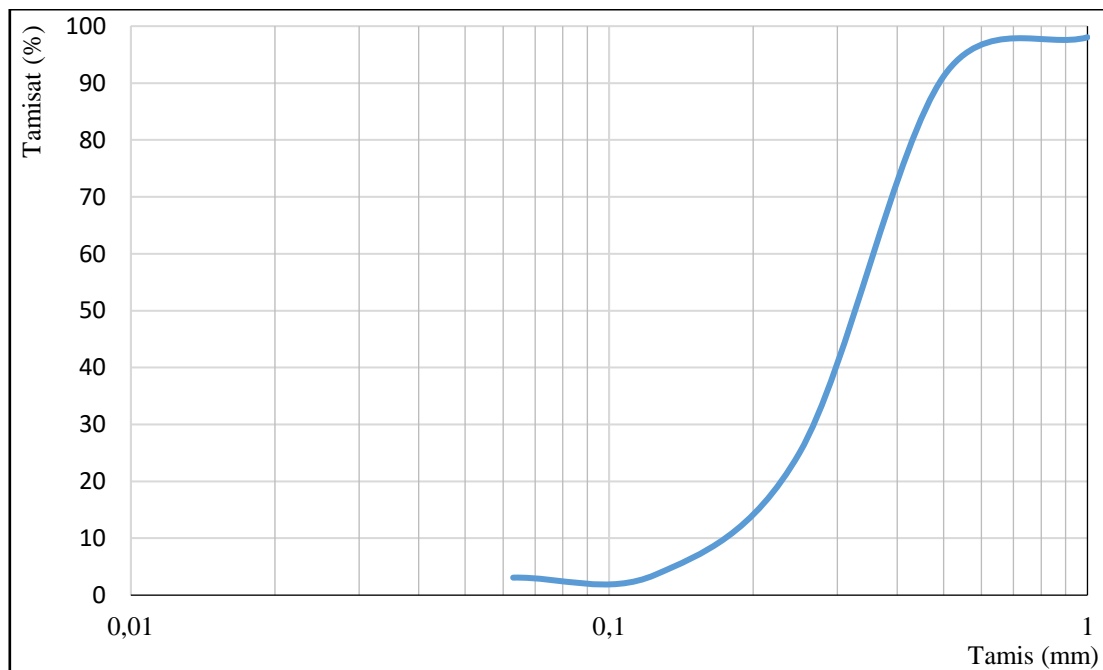


Figure II.7: Courbe d'analyse granulométrique du sable de dune

-Les résultats d'analyse granulométriques, la granulométrie de ce sable est continue.

-Le module de finesse est de 1.82, indique un sable très fin ce qui donne un béton très ouvrable d'où une résistance faible.

II.2.4.2 Masses volumique absolue, réelle et absorption d'eau

La masse volumique absolue (NF EN 1097-6) correspond à la masse d'une unité de volume absolue du matériau, sans prendre en compte le volume des vides.

La masse volumique réelle (NF EN 1097-6) correspond à la masse par unité de volume réel, incluant les pores du matériau, mais excluant le volume des vides intergranulaires.

Le coefficient d'absorption représente le rapport entre l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau et sa masse sèche. Cette imbibition est réalisée en immergeant l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à une température de 20°C.

Les résultats de cet essai (figure II.8) sont consignés dans le tableau II.5.



Figure II.8: Masses volumiques absolue, réelle et absorption d'eau

Tableau II. 5: Masses volumiques absolue, réelle et absorption d'eau

Désignations	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique réelle (g/cm ³)	Absorption d'eau (%)
Sable de dune	2.670	2.600	1.07

-Les résultats obtenus indiquent que le sable de dune présente des densités absolue, réelle et absorption d'eau courantes et peuvent être utilisés comme des constituants dans la formulation de ce béton.

-Le coefficient d'absorption d'eau du sable de dune est inférieur à 2.5%, l'utilisation de ce sable dans le béton donne un béton durable.

II.2.4.3 Masse volumique en vrac et porosité intergranulaire

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps c'est-à-dire celle du volume constitué par la nature du corps et les vides qu'elle contient. La masse volumique apparente est mesurée par un récipient de deux litres (figure II.9). Les résultats de cet essai (norme NF EN 1097-3) sont donnés par le tableau II.6.

La porosité intergranulaire du sable se réfère à l'espace vide entre les grains individuels de sable. La porosité intergranulaire v correspond au pourcentage de vides intergranulaire dans le sable; il se calcule selon l'équation II.1.

$$v = \frac{(\rho_p - \rho_b)}{\rho_p} \quad (\text{II.1})$$

Avec:

- v : est la porosité intergranulaire,
- ρ_p : est la masse volumique réelle,
- ρ_b : est la masse volumique en vrac.

Tableau II. 6: Masse volumique apparente du sable, et porosité intergranulaire

Désignations	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Porosité intergranulaire (%)
Sable de dune	1.510	41.91



Figure II.9: Masse volumique apparente

II.2.4.4 Essai au Bleu de Méthylène

C'est l'adsorption du bleu de méthylène par des éléments fins d'un sable, les fines sont caractérisées par la quantité de bleu de méthylène adsorbé par 200 g de fines. Cet essai (**figure II.10**) est régi par la norme **NF EN 933-9** et les résultats sont indiqués dans le **tableau II.7**.

Tableau II. 7: Essai au Bleu de Méthylène

Echantillon	Sable de dune 0/1
Masse sèche de la prise d'essai (M1)	200
Volume du bleu introduit (V1)	10
Valeur au bleu de méthylène	0.5



Figure II. 10: Essai au Bleu de Méthylène

Le sable de dune est un sable à faible pourcentage de fines argileuses.

II.2.4.5 Equivalent de sable

Le but de cet essai (figure II.11) est d'évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai est réalisé conformément à la prescription de la norme NF EN 933-8 et les résultats obtenus sont notés au tableau II.8.

Tableau II. 8: Equivalent de sable des granulats

Désignations	Nature	ES (%)	Moyenne
Sable de dune	Echantillon *1*	83.47	83
	Echantillon *2*	83.25	

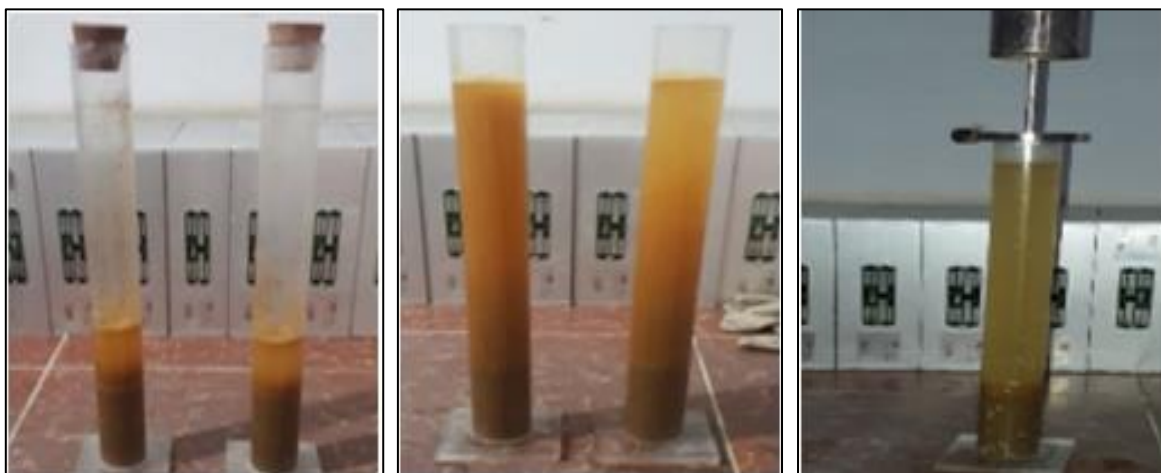


Figure II. 11: Essai d'équivalent de sable

ES= 83%, le sable est propre, il convient parfaitement pour un béton de qualité.

II.2.4.6 Analyse chimique

L'analyse chimique a été effectuée au laboratoire de la cimenterie de **Hdjar -soud**. Les résultats obtenus sont donnés dans le **tableau II.9**.

Tableau II. 9: Analyse chimique du sable

Désignations	Résultats en %	Désignations	Résultats en %
CaO	0.80	MgO	0.14
Al₂O₃	2.36	Na₂O	0.2
Fe₂O₃	1.15	K₂O	0.58
SiO₂	94.09	SO₃	0.01

D'après les analyses chimiques on constate que le sable de dune est un sable siliceux.

II.2.5 Les fibres

Les fibres utilisées sont **FIBERTEK PP 12mm** de 12mm de longueur, étant mono-filament ils se dispersent facilement dans la matrice dans toutes les directions de manière à avoir une répartition homogène de la fibre dans la pâte et une matrice renforcée qui permet de contrôler son retrait plastique, ce qui augmente la compacité et limite les microfissurations.

Les fibres **FIBERTEK PP 12mm** sont destinés à être incorporés dans la matrice de ciment (béton, mortier, etc.) pour constituer un matériau homogène en mesure de contrer le retrait plastique.



Figure II. 12: Fibres de polypropylène (FIBRETEK PP 12mm)

II.2.6 Adjuvant

Le super plastifiant qu'on a utilisé dans notre étude est le Master Glenium SKY 3080 (BASF) (haut réducteur d'eau conforme à la norme (**NF EN 934**)), est un super plastifiant haut réducteur d'eau non chlore et prêt à l'emploi à base de poly carboxylate modifié qui se présente sous la forme d'un liquide marron clair.

Les caractéristiques de l'adjuvant sont présentées dans le **tableau II.10**.

Tableau II. 10: Caractéristiques de super plastifiant

Désignations	Couleur	Densité	PH	Teneur en ions Cl ⁻	Teneur Na ₂ O éq	Extrait Sec
Résultats	marron	1.07 ±0.02	5±1	≤ 0.1%	≤ 2.5 %	30± 1 %

II.2.7 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est l'eau potable du réseau public. L'analyse chimique est représentée dans le tableau II.11, dont les résultats répondent à toutes les prescriptions de la norme EN 1008.

Tableau II. 11: Analyse chimique de l'eau

PH	Chlorures Cl ⁻ Mg/l	Sulfates SO ⁻² Mg/l	Alcalins Na ₂ O Mg/l	Nitrates NO ₃ ⁻ Mg/l	Matière humique	Matières en suspension
7.3	1.77	63.07	114.3	20.0	Néant	Néant

II.3 Conclusion

D'après les résultats obtenus, les observations suivantes ont été tirées:

- La densité absolue des fillers de laitier est légèrement inférieure à celui des fillers de céramique,
- Les fillers de céramique sont plus fins que les fillers de laitier respectivement,
- Le filler de laitier présente une quantité de CaO élevée que les fillers de céramique,
- La teneur en SiO₂ dans les fillers de céramique est supérieure à celle des fillers de laitier. La présence de silice en grande quantité favorise l'hydratation à long terme,
- La teneur en alumine dans les fillers recyclés de céramique est plus élevée en comparaison avec cette teneur dans les fillers de laitier. Cet élément augmente le durcissement lors du premier jour, par contre influe négativement sur la résistance chimique

Chapitre III
Programme expérimental
et méthodologie d'essais

III. Programme expérimental et méthodologie d'essais

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente le programme expérimental, l'étude préliminaire pour la recherche de la formulation des bétons fibrés à ultra-haut performance, les essais réalisés sur le béton frais et durci, les méthodes de fabrication des mélanges et les différentes compositions des mélanges obtenus et les méthodes d'essais.

III.2 Programme expérimental

L'objectif de cette étude est de confectionner des bétons fibrés à ultra-hautes performance en ajoutant dans la composition des fillers de laitier et de déchets de céramique, et on observe les modifications apportées par l'introduction de ces fillers. La réalisation de ce programme expérimental permis d'élaborer différentes formulations.

III.2.1 Recherche de la formulation

La formulation des BFUP ne repose pas sur une méthode de formulation classique comme pour les bétons ordinaires, mais plutôt sur l'expérimentation et le respect des principes de formulation mentionnés dans le premier chapitre intitulé recherche bibliographique. Pour établir la composition de ce type de béton, nous nous sommes appuyés sur divers travaux antérieurs (**Ait Medjber & Saidi, 2019; Baby, 2012**).

L'optimisation de cette formulation du BFUP repose sur la détermination précise des quantités de chaque constituant afin de respecter trois principes fondamentaux:

1. Réduire la porosité en intégrant des ultrafines,
2. Optimiser la composition granulaire,
3. Maintenir un faible rapport eau/ciment (E/C).

L'origine des matériaux de la formulation témoin, et leurs propriétés physiques et chimiques sont détaillés et interprétés dans le chapitre II.

III.2.2 Composition des mélanges

Une fois la formulation témoin a été retenue, les autres formulations sont obtenues en introduisant une quantité de fillers recyclés tout en gardant le même volume de la formulation de référence. Les paramètres fixes sont le rapport E/C égal à 0.25, le dosage en adjuvant 2%, squelette granulaire continu, dosage en fibre et en fumée de silice.

Trois formulations ont été retenues, une formulation témoin (BT), formulation à base de fillers de céramique (BC) et formulation à base de fillers recyclées de laitier (BL), ces formulations sont données par le **tableau III.1**.

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

Notation	Type de béton
BT	BFUP témoin à base de CEM II et fumée de silice, sable ordinaire et fibres.
BC	BFUP à base de CEM II et fumée de silice, sable ordinaire, fibres et fillers de déchets de céramique.
BL	BFUP à base de CEM II et fumée de silice, sable ordinaire, fibres et fillers de laitier.

✓ **Essais réalisés sur béton frais**

On a effectué sur le béton frais pour les trois formulations des mesures de:

- L'étalement au cône d'ABRAMS,
- La densité,
- L'air occlus.

✓ **Essais réalisés sur béton durci**

Les essais réalisés sur le béton durci sont:

- Résistance à la compression à 3,7, 28 et 90jours,
- Résistance à la traction par flexion à 3,7, 28 et 90jours,
- Essai scléromètre à 28jours,
- Essai ultrasonique à 28jours.

✓ **Essais de durabilité et microstructure.**

- Essai absorption d'eau par immersion,
- Essai de porosité,
- Essai absorption capillaire,
- Pénétration de chlorure 28jours,
- Attaque chimique,
- Microstructure.

III.2.3 Différentes compositions des mélanges

On présente dans le **tableau III.2** les résultats de différentes compositions des mélanges.

Tableau III. 2: Composition des mélanges

Désignations	Ciment Kg	Fumée de silice Kg	Sable 0/1 Kg	Fibres PP Kg	SP Kg	Eau Kg	Fillers de laitier Kg	Fillers de céramique Kg
BT	1000	75	999	1	20	250	/	/
BC	1000	75	816	1	20	250	/	200
BL	1000	75	814	1	20	250	200	/

III.2.4 Fabrication des éprouvettes

a. Malaxage

Une bétonnière (**figure III.1**) est utilisée pour effectuer le malaxage, et l'introduction des matériaux et le processus de malaxage se déroulent dans l'ordre suivant:

- Malaxage préalable des matériaux secs pendant une minute,
- Incorporer de l'eau et du superplastifiant, ce dernier étant mélangé avec l'eau,
- Effectuer un malaxage humide à une vitesse rapide (4.17 tours/s) pendant 5 minutes,
- Incorporation des fibres, puis un deuxième malaxage de 5 minutes (**Elsa NGUYEN, 2015**).

Ce type de malaxeur nécessite un temps total de malaxage d'environ 11 minutes.



Figure III. 1: Malaxeur

b. Moules

Les moules utilisés sont en acier (**figure III.2**), les différents corps d'éprouvettes sont:

- Cubiques: $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ pour l'essai de compression,
- Prismatiques: $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ pour l'essai de traction par flexion,
- Cubique: $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ pour l'essai au scléromètre et ultrason,
- Cubiques: $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ pour l'essai d'absorption par immersion.
- Cubiques: $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ pour l'essai de porosité accessible à l'eau.
- Prismatiques: $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ pour l'essai d'absorption capillaire,
- Cubiques: $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ pour l'essai pénétration de chlorure.
- Cubiques: $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ pour l'essai de l'attaque chimique et porosité.



Figure III. 2: Moules

c. Remplissage et vibration

Le remplissage est effectué en une seule couche, car notre BFUP est potentiellement autoplaçant, c'est-à-dire qu'il peut généralement être mis en place sans nécessiter de vibration ni d'assistance mécanique pour l'écoulement (Patrick, 2020).

d. Conservation des éprouvettes

Avant le démoulage, les éprouvettes sont conservées pendant $24h \pm 1h$ à une température de $20C^\circ \pm 2$: humidité relative $60\% \pm 5$.

Après le démoulage, les éprouvettes sont conservées:

- A l'eau jusqu'à le jour de l'essai pour les essais de compression et de traction par flexion,
- A l'eau jusqu'à 28 jours pour les essais au scléromètre et ultrason et d'absorption par immersion et capillaire et pénétration de chlorure et attaque chimique.

III.3 Méthodes d'essais

III.3.1 Essai sur béton frais

III.3.1.1 Etalement au cône d'Abrams

On insère un échantillon conforme à la norme **NF EN 12350-1** dans un moule conique sans piquage. Le moule, reposant sur une surface horizontale préalablement humidifiée, est ensuite retiré verticalement en 1 à 3 secondes. Selon la norme **NF EN 12350-8**, l'étalement maximum stabilisé est mesuré avec une précision de 10mm. La mesure de l'étalement est effectuée perpendiculairement et la valeur finale correspond à la moyenne de ces deux mesures (figure III.3).

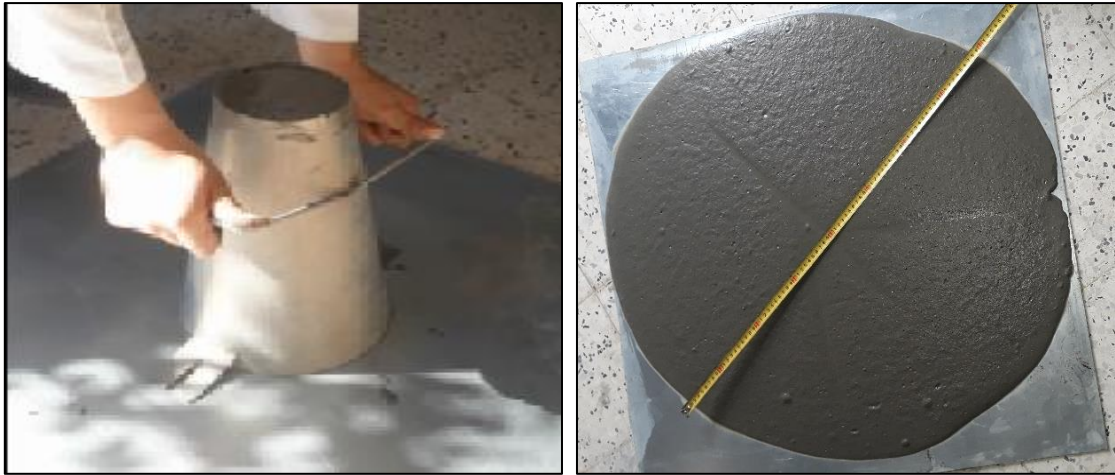


Figure III. 3: Etallement au cône d'Abrams

III.3.1.2 Air occlus

La mesure de la teneur en air a été réalisée à l'aide d'un aéromètre à béton de huit litres (figure III.4), conformément à la norme NF EN 12350-7. Une fois que l'on a rempli le récipient de l'aéromètre de la même manière que pour les moules, le couvercle est soigneusement fixé. Ensuite, une pression est appliquée à l'aide de la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille de l'appareil indique 0%. À ce moment-là, la valve qui sépare les deux chambres est ouverte, comprimant ainsi le béton, et le pourcentage d'air occlus est directement affiché par le manomètre intégré à l'aéromètre.



Figure III. 4: Aéromètre à béton

III.3.1.3 Densité

Conformément à la norme NF EN 12350-6, on se sert du récipient inférieur de l'aéromètre (figure III.5), si les poids du récipient plein et vide sont successivement P et P0, la densité du mélange frais est donnée par la formule III.1.

$$\rho = (P-P_0)/v \quad (v = 8 \text{ litres, volume du récipient}) \quad (\text{III.1})$$



Figure III. 5: Mesure de la densité

III.3.2 Essai sur béton durci

III.3.2.1 Essai de compression

L'essai de compression consiste à écraser une éprouvette entre les plateaux d'une machine d'essai de compression d'une capacité de 2000KN conformément à la norme **NF EN 12390-3** (figure III.6). Après avoir correctement centré l'éprouvette, la mise en charge est lancée. Lorsque la rupture se produit, la machine s'arrête automatiquement, et la contrainte en compression, correspondant à la charge de rupture, est alors enregistrée.



Figure III. 6: Essai de compression

III.3.2.2 Essai de traction par flexion

La résistance à la traction par flexion a été mesurée à l'aide d'une machine de flexion 3 points, conformément à la norme **NF EN 12390-5**, sur des éprouvettes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$. Les éprouvettes ont été disposés dans la machine d'essai comme illustré sur la (Figure III.7).

Après un bon centrage, la mise en charge est lancée, au moment de la rupture, la contrainte de traction par flexion est obtenue.

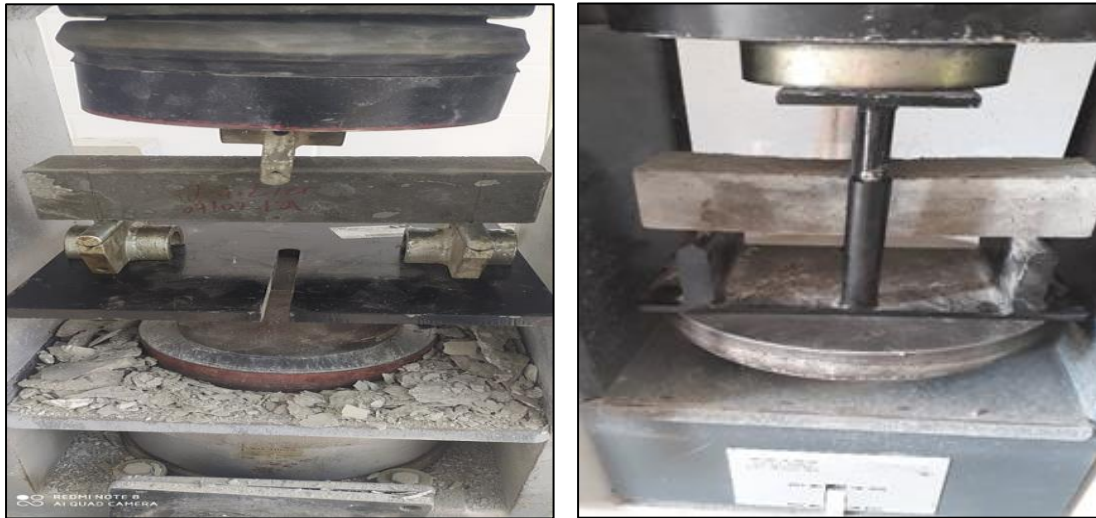


Figure III. 7: Essai de traction par flexion

III.3.2.3 Essai au scléromètre

L'essai au scléromètre (**figure III.8**) selon la norme **NF EN12504-2** est une méthode non destructive qui permet d'estimer la dureté de la surface du béton. Cet essai est simple, rapide à réaliser, et offre une meilleure représentativité de la qualité globale de l'ouvrage.

Le scléromètre est un appareil simple qui mesure la dureté de la surface du béton. Après avoir déterminé les points de mesure sur la surface de l'éprouvette, celle-ci est bloquée entre les plateaux d'une machine d'essai de compression. Le scléromètre est ensuite appliqué sur les points de mesure. La tige en acier sort du cylindre et exerce une pression sur le béton, comprimant un ressort. Ce ressort projette une masse contre la tige, et lorsque la masse revient à la surface du béton, elle déplace un curseur, permettant ainsi de lire l'indice de rebondissement.



Figure III. 8: Essai au scléromètre

III.3.2.4 Essai d'ultrason



Figure III. 9: Essai d'ultrason

Cet essai (**figure III.9**) est une méthode utilisée pour déterminer la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales dans le béton durci. Il consiste à mesurer le temps de propagation entre deux points spécifiques sur la surface de l'objet à tester. En connaissant la distance entre ces deux points, la vitesse d'impulsion peut être calculée.

La mesure de la vitesse de propagation des ultrasons peut être réalisée de trois manières, en transparence, en surface, ou en semi-direct. Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode de mesure en transparence (directe), conformément à la norme **NF EN 12504-4**.

III.3.2.5 Essai d'absorption par immersion

Le coefficient d'absorption est déterminé comme étant le rapport entre l'augmentation de la masse de l'échantillon après une immersion de 24 heures et sa masse sèche (**figure III.10**), séchée dans une étuve, conformément à la norme **NF P 18-555**. Le coefficient d'absorption est calculé à l'aide de la **formule III.2**.

$$Ab = (Ma - Ms) / Ms \times 100 \quad (III.2)$$

Ms: masse de l'éprouvette après passage à l'étuve (105°C) jusqu'à 24 heures,

Ma: masse de l'éprouvette après immersion 24 heures dans l'eau.



Figure III. 10: Etuves pour l'essai d'absorption par immersion

III.3.2.6 Essai de porosité accessible à l'eau

La porosité correspond au rapport entre le volume des pores d'une éprouvette et son volume apparent, et elle s'exprime en pourcentage. La porosité peut être de trois types:

- Ouverte (accessible à l'eau), qui est l'objet de cet essai,
- Fermée,
- Totale (somme des porosités ouverte et fermée) (NF P 18-459, 2010).

La mesure de la porosité ouverte, accessible à l'eau, dans le béton durci (figure III.11), conforme à la norme NF P 18-459, nécessite la détermination, par pesées, des éléments suivants:

- M_{eau} : la masse apparente dans l'eau après immersion (pesée hydrostatique) d'un corps d'épreuve de béton préalablement imprégné d'eau,
- M_{air} : la masse dans l'air libre du même corps d'épreuve imbibé,
- M_{sec} : la masse à l'état sec.

La porosité ouverte est ensuite calculée à partir la formule III.3.

$$\varepsilon = (M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}) \times 100 / (M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}) \quad (\text{III.3})$$



Figure III. 11: Essai de porosité

III.3.2.7 Essai d'absorption capillaire

Cette caractéristique indique la quantité d'eau que l'éprouvette en béton peut absorber lorsqu'une seule de ses faces est en contact avec de l'eau. Elle est exprimée par le coefficient de capillarité C en $g/(m^2.s^{1/2})$.

Les éprouvettes sont d'abord séchées à $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ afin de déterminer leur masse sèche. Elles sont ensuite mises en contact avec 3mm d'eau sur l'une de leurs faces (**figure III.12**). L'évolution de leur masse est suivie à intervalles réguliers et reportée sur un graphique en fonction de \sqrt{t} . Généralement, cette évolution est linéaire par rapport à \sqrt{t} . Le coefficient de capillarité (C) est alors calculé comme la pente de la droite de régression correspondant à la première phase d'absorption, (**équation III.4**).

$$C = (m_i - m_d) \times 100 / (A \times \sqrt{t}) \quad (\text{III.4})$$

Avec:

- m_i : la masse au temps i ,
- m_d : la masse sèche,
- A : la surface en contact avec l'eau.



Figure III. 12: Essai d'absorption par capillarité

III.3.2.8 Essai pénétration de chlorures

Les éprouvettes sont démoulées et conservées dans l'eau à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 28 jours. Après cette période, elles sont immergées dans une solution de NaCl concentrée à 5%. Au bout de 28 jours d'immersion dans cette solution, la résistance à la pénétration des chlorures est déterminée selon les normes **UNI 7928** et **JIS A 1171**.

Pour chaque essai (après 28 jours), l'éprouvette est coupée en deux afin d'obtenir des mini-prismes. Ensuite, une solution de nitrate d'argent (AgNO_3) est appliquée sur chaque section coupée, conformément à la norme **UNI 7928**, en attendant que les sections absorbent la solution. Le bord de chaque section change de couleur, laissant apparaître une zone blanche qui indique la profondeur de pénétration des chlorures.

L'épaisseur de la zone colorée est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse à plusieurs endroits (**figure III.13**). La profondeur de pénétration (X) est calculée comme étant la moyenne de toutes les mesures effectuées.



Figure III. 13: Essai pénétration des chlorures

III.3.2.9 Attaques chimiques

Cet essai, conforme à la norme **ASTM C267-96**, est réalisé après 28 jours de cure dans l'eau. Les éprouvettes, de dimensions $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$, sont pesées afin de déterminer une masse initiale M_1 . Elles sont ensuite immergées dans les solutions suivantes:

- 5% d'acide chlorhydrique (HCl) acide fort,
- 5% d'acide sulfurique (H_2SO_4) acide for,
- 5% d'acide acétique (CH_3COOH) acide faible,
- 5% hydroxyde de sodium (NaOH) solution basique.

La résistance des échantillons (**figure III.14**) soumis à des agressions chimiques, immergés dans différentes solutions, est évaluée selon la norme **ASTM C267-96**. Les éprouvettes sont nettoyées trois fois avec de l'eau douce pour éliminer le béton altéré, puis laissées à sécher pendant 30 minutes. Ensuite, elles sont pesées pour obtenir une masse M_2 . Cette opération est répétée après 1, 7, 14, 21, 28, 42, 60 et 90 jours d'immersion.



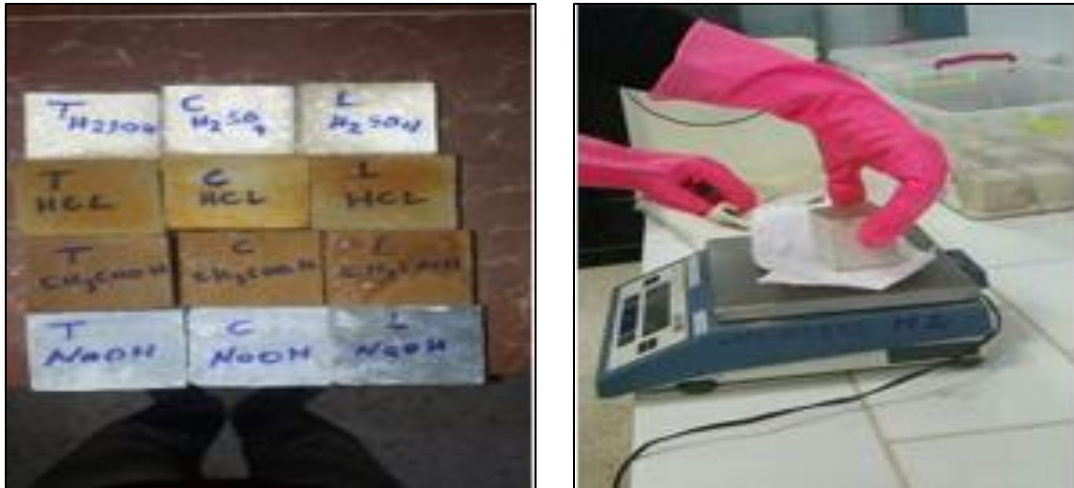


Figure III. 14: Essai des attaques chimiques

Les solutions utilisées sont renouvelées tous les 14 jours en fonction de la variation du pH. La résistance chimique est évaluée en mesurant la perte de masse des éprouvettes.

L'attaque chimique est calculée à l'aide de la **formule III.5**.

$$\text{Variation de la masse (\%)} = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100 \quad (\text{III.5})$$

Avec, M_1 et M_2 les masses des éprouvettes avant et après immersion dans la solution chimique.

III.3.2.10 Microstructure

Les échantillons destinés à l'analyse par MEB sont effectués par un appareil de type Quanta 650 – FEI, USA, assisté par la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDAX).

III.4. Conclusion

Ce chapitre a successivement traité les points suivants:

- Les programmes expérimentaux utilisés au cours de cette recherche,
- L'étude préliminaire visant à définir la formulation,
- Les compositions des mélanges de béton,
- Les formulations correspondant à chaque composition,
- L'ensemble des essais réalisés sur le béton,
- Les méthodes d'essais, ainsi que le mode de fabrication et de conservation des éprouvettes.

Chapitre IV

**Influence du type de fillers sur les
propriétés des BFUP**

IV. Influence du type de fillers sur les propriétés des BFUP

IV.1 Introduction

On présente dans ce chapitre les résultats des essais à l'état frais des BFUP réalisés à savoir la consistance, la densité et la teneur en air occlus ainsi que les résultats à l'état durci des BFUP à savoir la résistance en compression et en traction par flexion à l'âge de 3, 7, 28 et 90 jours, ainsi que les résultats des essais non destructifs et microstructurales. L'ensemble des résultats sont interprétés et analysés.

IV.2 Influence du type de fillers sur les propriétés des BFUP à l'état frais

IV.2.1 Densité

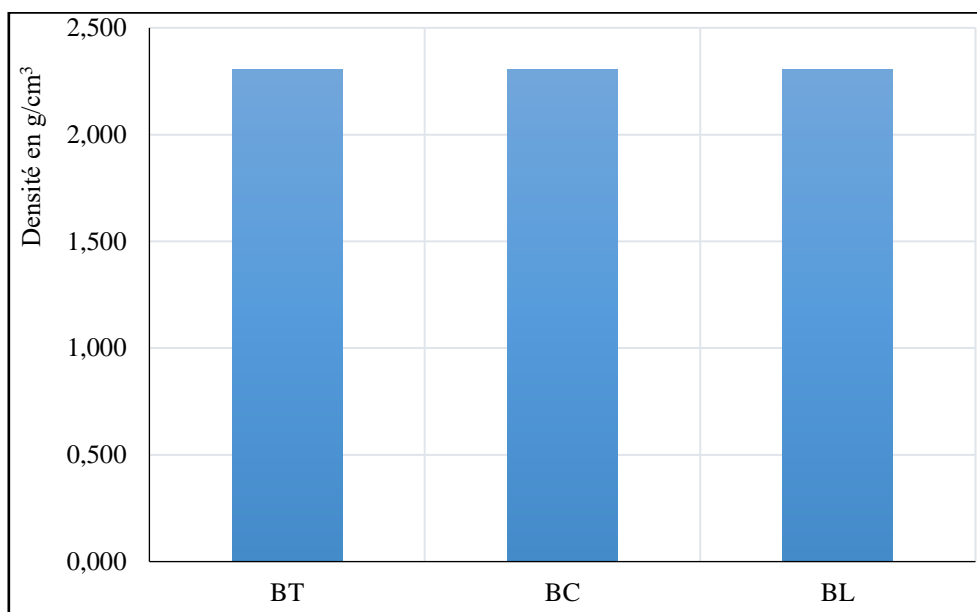


Figure IV. 1: Variation de la densité des BFUP

La figure IV.1 montre une légère augmentation de la densité des BFUP avec les fillers de laitier et céramique successivement, cette augmentation est causée par la densité élevée des fillers de laitier (2.880) et de céramique (2.920).

IV.2.2 Consistance

L'ajout des fillers recyclées de céramique dans la formulation du BFUP (figure IV.2) entraîne une amélioration de l'ouvrabilité du mélange, ceci peut être expliqué par la finesse élevée des fillers recyclées de céramique, par contre, l'ajout de fillers de laitier influe négativement sur la consistance du mélange. En général, l'utilisation de laitiers dans le béton réduit l'ouvrabilité par rapport à un béton contenant des granulats naturels, même avec un rapport E/C identique (Lionel, 2015). Le laitier finement broyé présente une absorption beaucoup plus élevée, ce qui entraîne une demande accrue en eau supplémentaire (Bousslama & Jelidi, 2003). L'ouvrabilité des bétons reste acceptable quel que soit le type de fillers.

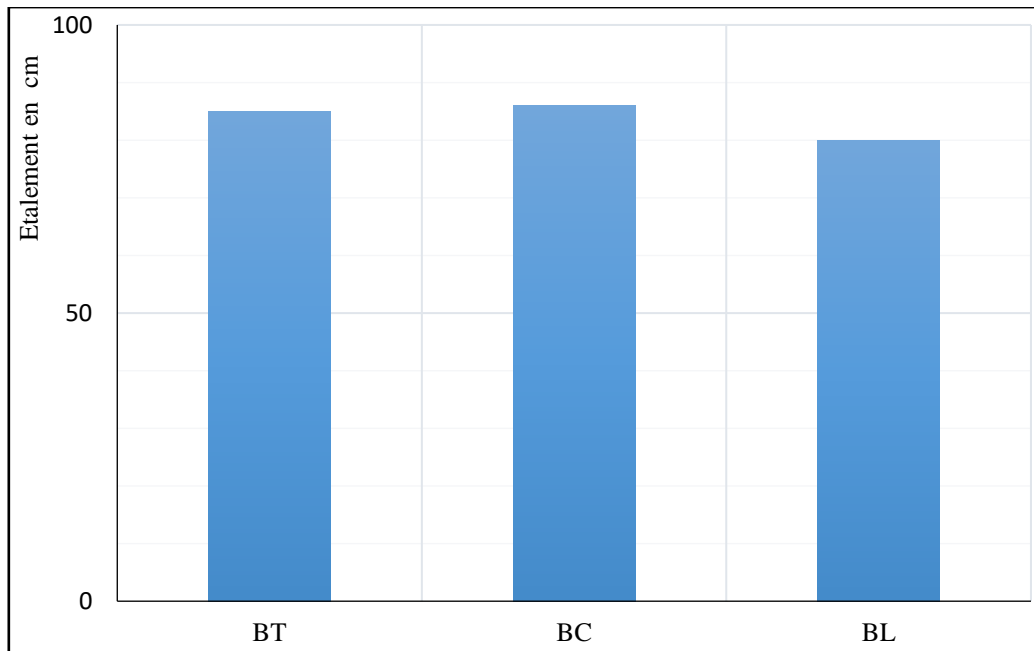


Figure IV. 2: Variation de la consistance des BFUP

IV.2.3 Teneur en air occlus

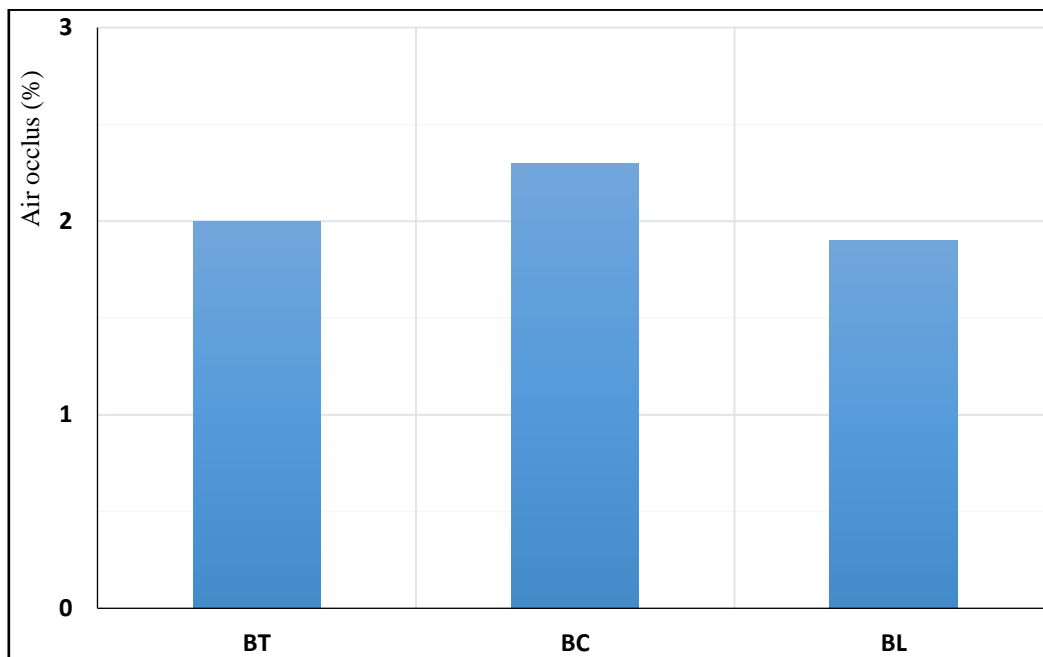


Figure IV. 3: Variation de la teneur en air

L'introduction des fillers de laitiers engendre une légère réduction de la quantité d'air occlus par rapport au béton témoin (**figure IV.3**). En revanche, on observe une légère augmentation de la teneur en air lorsque les fillers recyclés de céramique sont ajoutés. L'allure de ces résultats correspond à celui des résultats des tests d'ouvrabilité. Cette augmentation demeure acceptable et est provoquée par la plus grande fluidité de la pâte, qui résulte en partie de la consistance élevée. En effet, une pâte de ciment plus liquide a la

capacité accrue d'incorporer de l'air au cours du processus de mélange. À mesure que la consistance s'accroît, la pâte de ciment devient plus fluide, favorisant ainsi une plus grande capture d'air (s. n, 1966).

IV.3 Influence du type de fillers sur les propriétés des BFUP à l'état durci

IV.3.1 Résistance à la compression

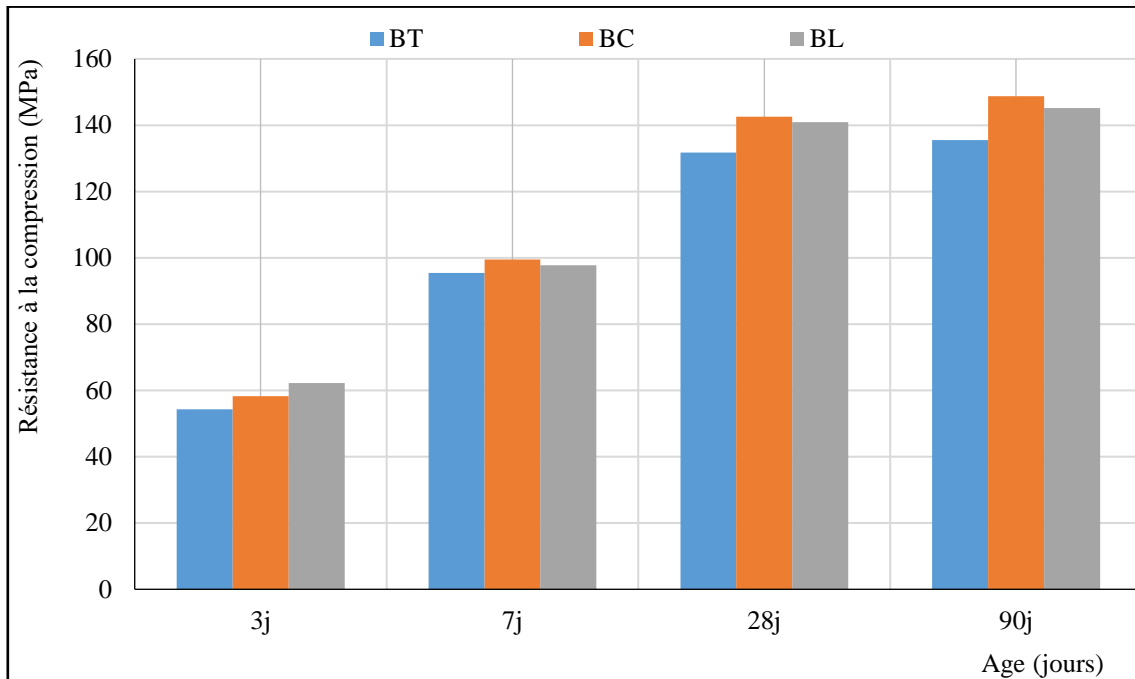


Figure IV. 4: Variation de la résistance à la compression

L'introduction des fillers de déchets de céramique et laitier entraînent une augmentation de résistance à la compression à court terme comme à long terme en comparaison avec le béton témoin (**figure IV.4**).

A 3 jours la meilleure résistance en compression est donnée par le béton à base de fillers de laitier. Il est intéressant de souligner que lorsque le rapport E/C (eau/ciment) est constant et que le laitier n'est pas saturé au moment de la formulation, il est possible que leur absorption plus importante réduise le rapport E/C effectif. Par conséquent, cela améliore les propriétés mécaniques du béton fabriqué (**Khanzadi & Behnood, 2009; Lionel, 2015**).

Au delà de 3 jours, l'augmentation des résistances du BFUP avec fillers de déchet de céramique est attribuée à l'augmentation de la présence de calcite et d'oxyde d'aluminium dans la composition du mélange. Ces composants favorisent la granulation et améliorent la qualité des hydrates formés (**Hebhoub et al., 2020**).

En plus lorsque les additions riches en aluminium la structure des silicates de calcaire hydratés est plus marquée, d'où des résistances plus élevées (**Berthomier, 2019**). La résistance du béton contenant des fillers de laitier est plus importante par rapport au béton de

référence à moyen et long terme est dû principalement à la présence des composés hydratés très massifs (Chaid et al., 2012).

Après 28 jours, l'ajout de filler de déchets de céramique a provoqué une réaction pouzzolanique, ce qui a entraîné une augmentation significative des résistances au fil du temps (Hebhoub et al., 2020). A long terme les bétons contenant les fillers recyclés de céramique affichent la résistance la plus élevée en comparaison avec le béton à base de fillers recyclés de laitier, ceci est dû à la finesse élevée de fillers de céramique qui favorise la réaction d'hydratation et rend le béton plus résistant.

IV.3.2 Résistance à la traction par flexion

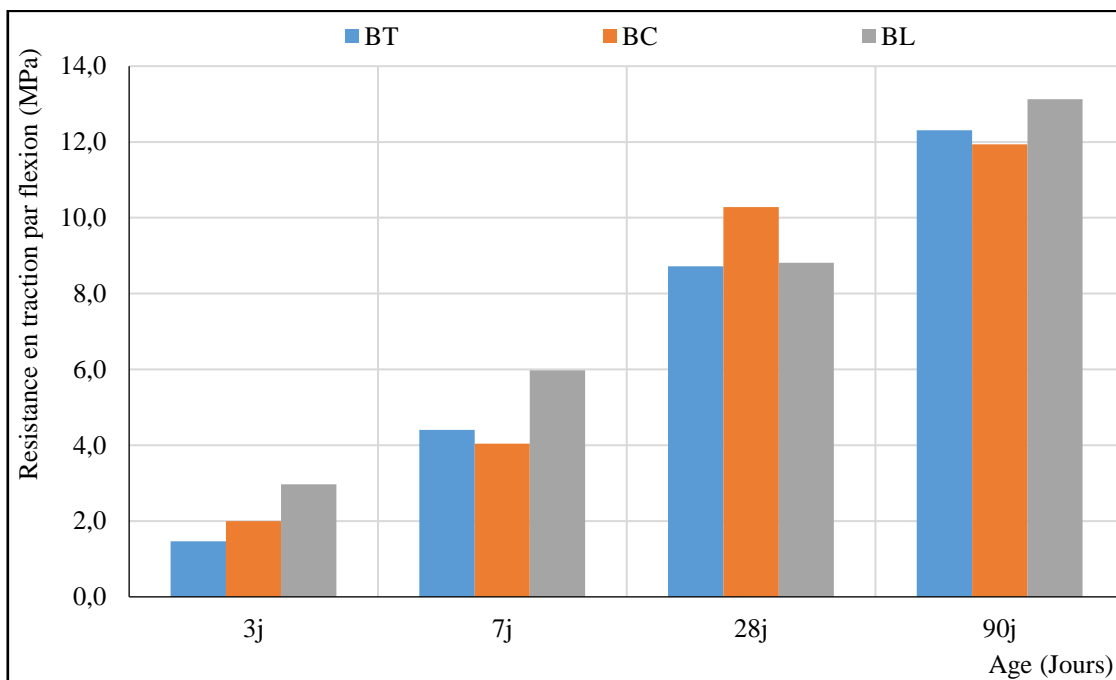


Figure IV. 5: Variation de la résistance à la traction par flexion

D'une manière générale l'incorporation des fillers recyclés de déchets de céramiques et laitier rend le béton plus résistant en traction par flexion (figure IV.5). A 3 jours de durcissement le BFUP à base de fillers de laitier affiche la meilleure résistance, la présence de CaO dans ces fillers augmente la cohésion à cet âge (Rihia & Hebhoub, 2020).

A long terme le béton à base de fillers de laitier donne la meilleure résistance en traction par flexion qui peut être expliqué par l'activation du laitier d'el-hadjar qui se caractérise par une réaction d'hydratation très lente (Boubekour & Boulekbache, 2015), 2015). La résistance augmente avec l'âge.

IV.3.3 Indice sclérométrique

Les résultats montrent que l'ajout des fillers de déchets de céramique et laitier augmentent l'indice sclérométrique ce qui implique que la présence de ces ajouts dans la formulation des bétons augmente la dureté de surface (figure IV.6).

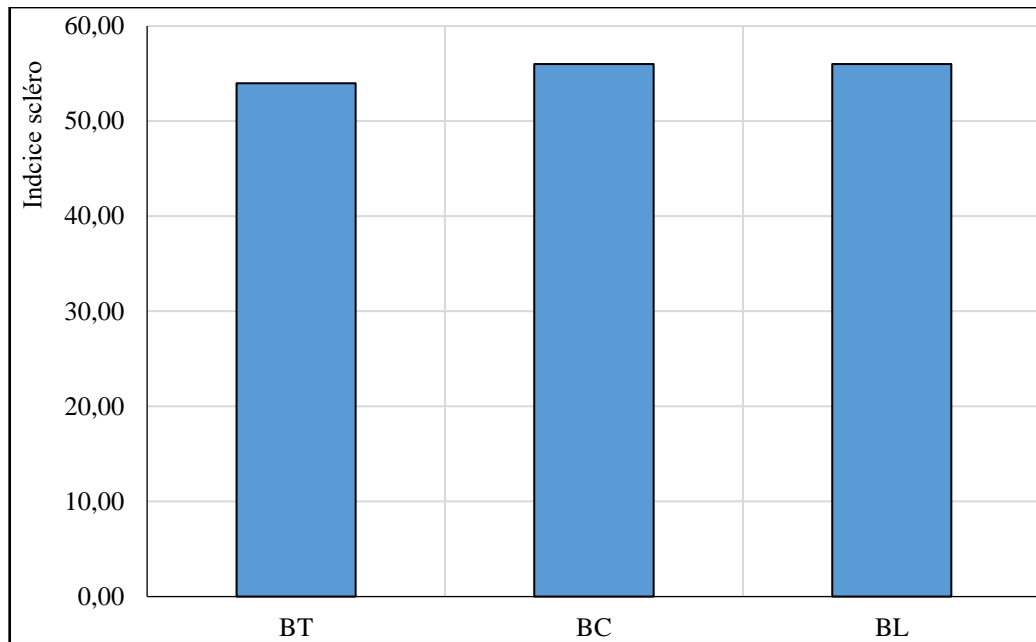


Figure IV. 6: Variation de l'indice de rebondissement

IV.3.4 Vitesse ultrasonique

Le contrôle non destructif par ultrasons est l'une des méthodes les plus adaptées pour évaluer les propriétés mécaniques d'un matériau ou d'une structure. En général, cette évaluation repose sur la mesure des variations des vitesses de propagation des ondes d'ultrason. Dans le cas du béton, les ondes ultrasonores interagissent constamment avec les granulats et les éventuels défauts structurels, comme les microfissures ou la porosité. Ces interactions provoquent une diffusion des ondes, et la dispersion du milieu entraîne une modification de leur vitesse de propagation (Chaid et al., 2012).

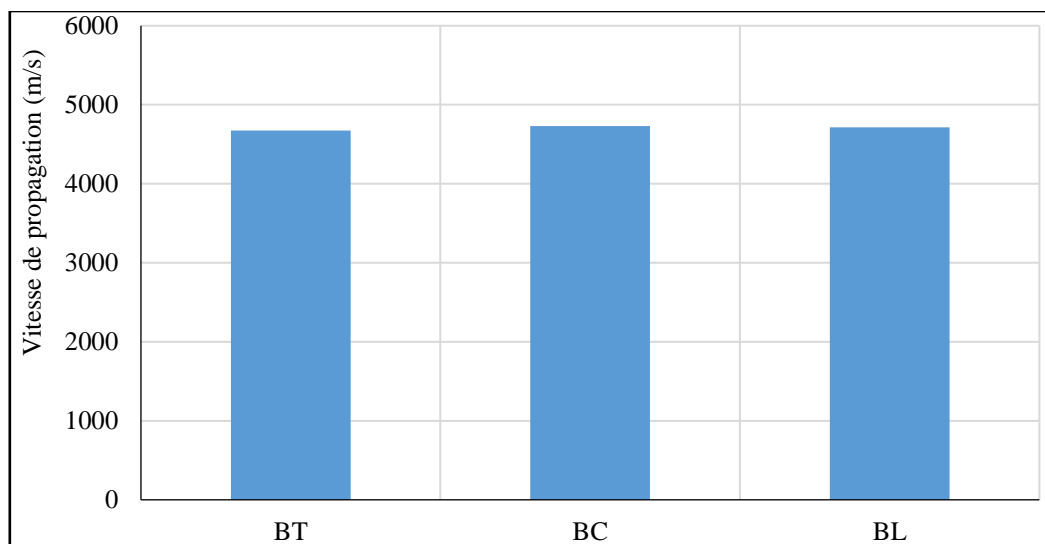


Figure IV. 7: Variation de la vitesse de propagation

D'après ces mesures (**figure IV.7**), on peut conclure que les bétons étudiés appartiennent à une classe de qualité supérieure, grâce à leur grande compacité et l'absence de fissures. De plus, les mesures effectuées à différents points montrent une bonne répartition des granulats. Comme mentionné par **Chaïd et al., (2012)**, l'incorporation de laitier finement broyé induit également un effet granulaire en modifiant la compacité du squelette granulaire. Cet effet intervient lors du durcissement du béton et influence les changements dans la porosité de la matrice cimentaire. Cela explique les vitesses de propagation des ondes relativement élevées observées sur les échantillons de béton de laitier, comparées au béton témoin et au béton contenant des fillers issus de déchets de céramique.

IV.3.5 Module d'élasticité dynamique

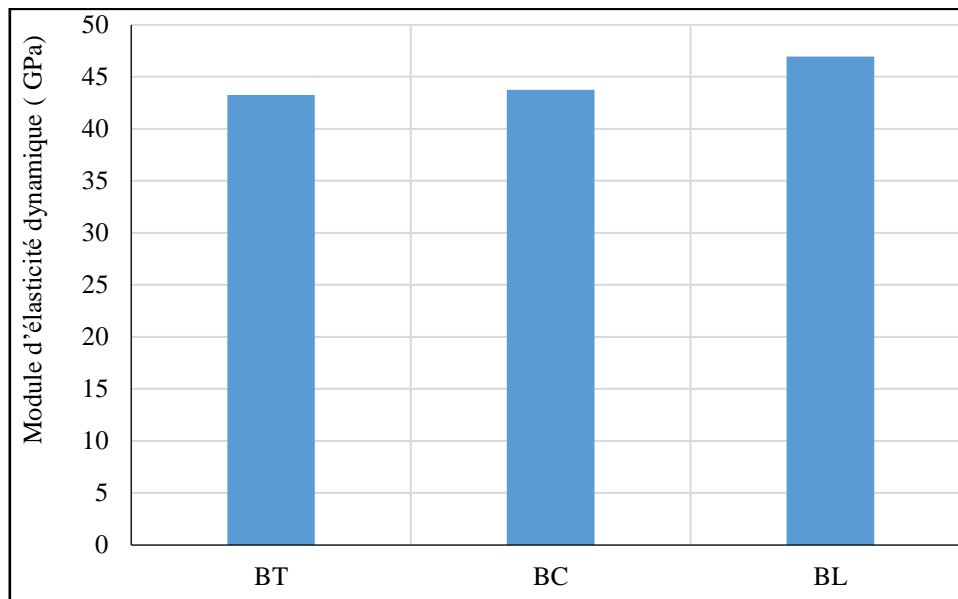
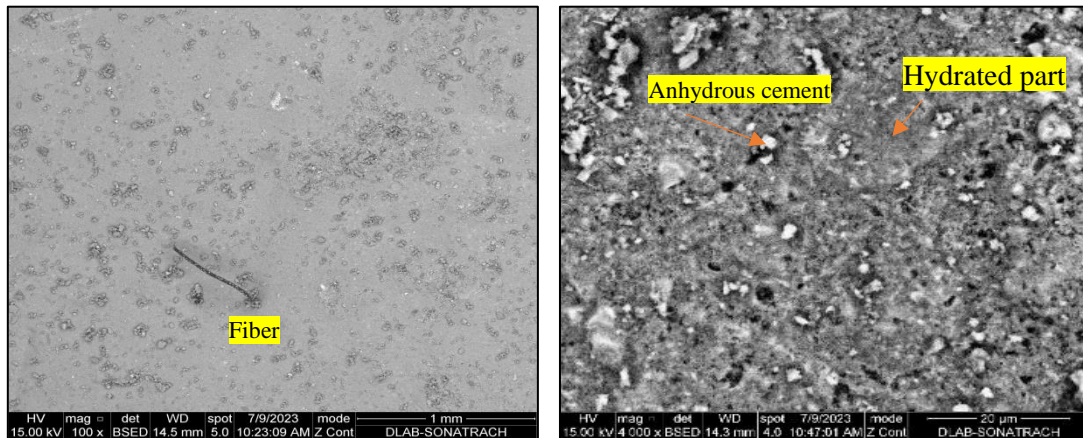


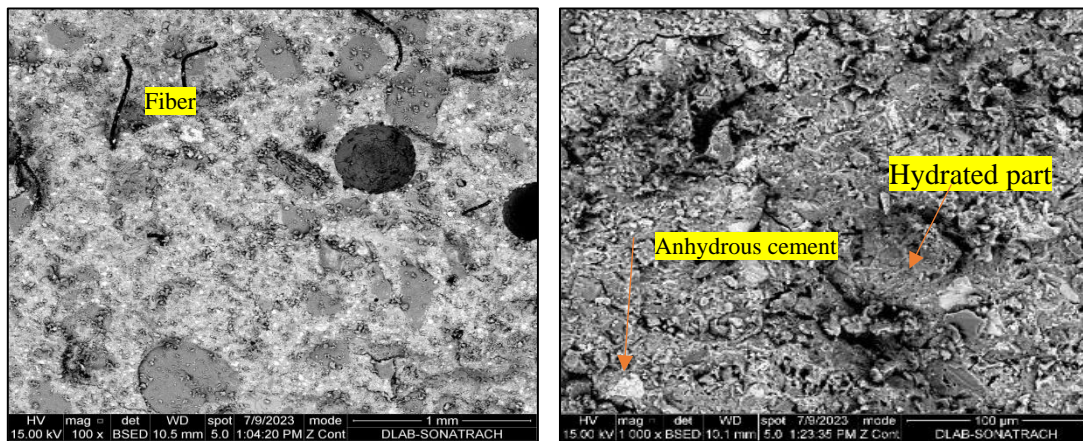
Figure IV. 8: Variation du module d'élasticité selon la vitesse d'ultrason

D'après les résultats présentés dans la **figure IV.8**, l'estimation du module d'élasticité par la vitesse d'ultrasons, montre que le module Md le plus élevé est du BFUP de laitier, qui a la plus faible porosité (1.82%) et une vitesse de propagation d'ultrasons maximale, et en raison de sa densité élevée aussi. En revanche, le BFUP témoin a la valeur la plus faible de Md, ce qui correspond aux valeurs de la porosité élevée (2.41%) et de la vitesse de propagation d'ultrasons minimales.

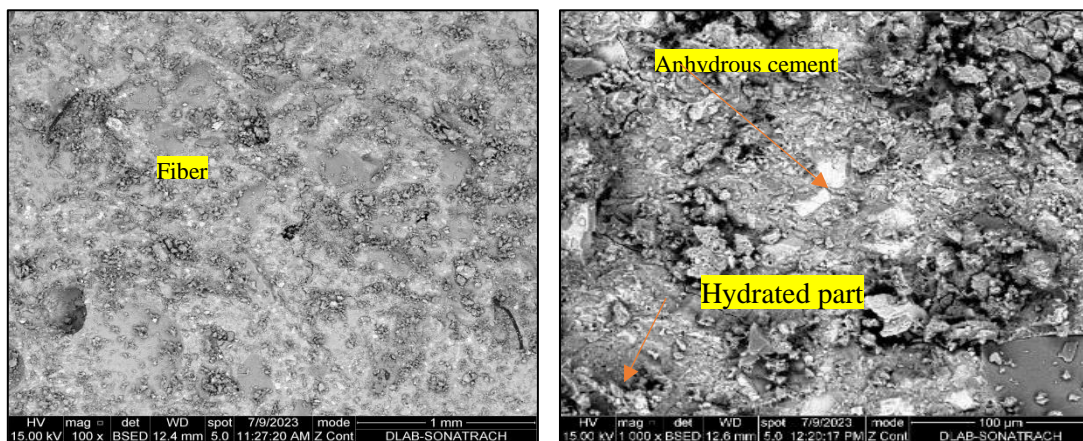
IV.4 Etude microstructurale



a) MEB BT

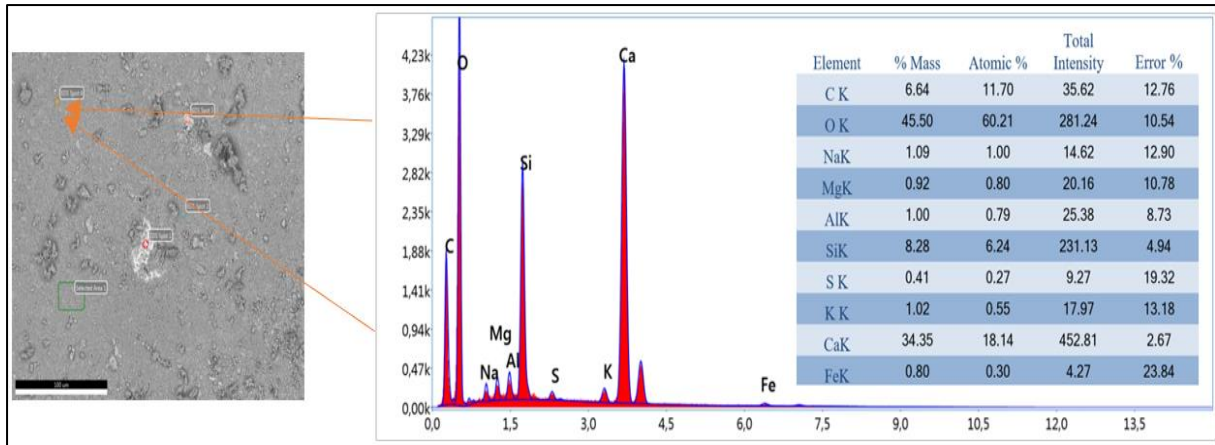


b) MEB BC

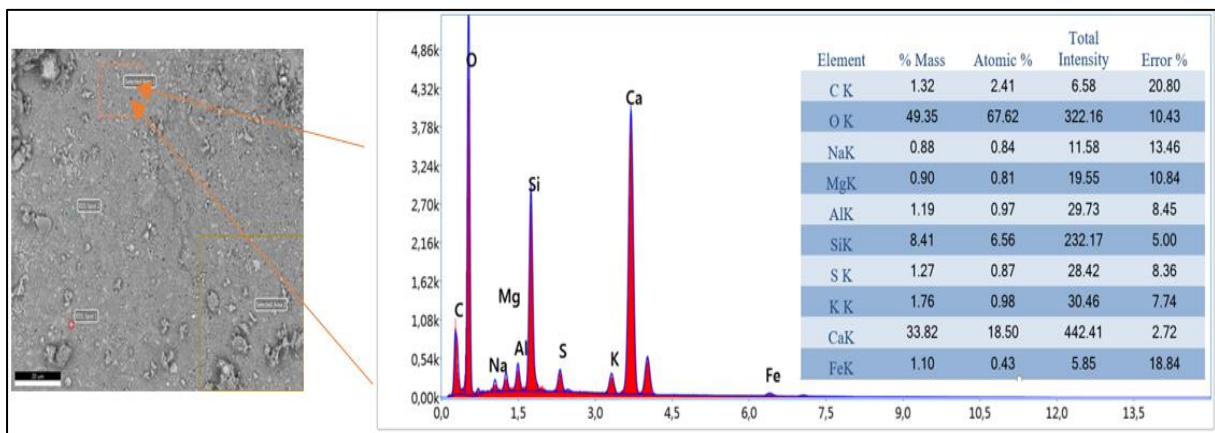


c) MEB BL

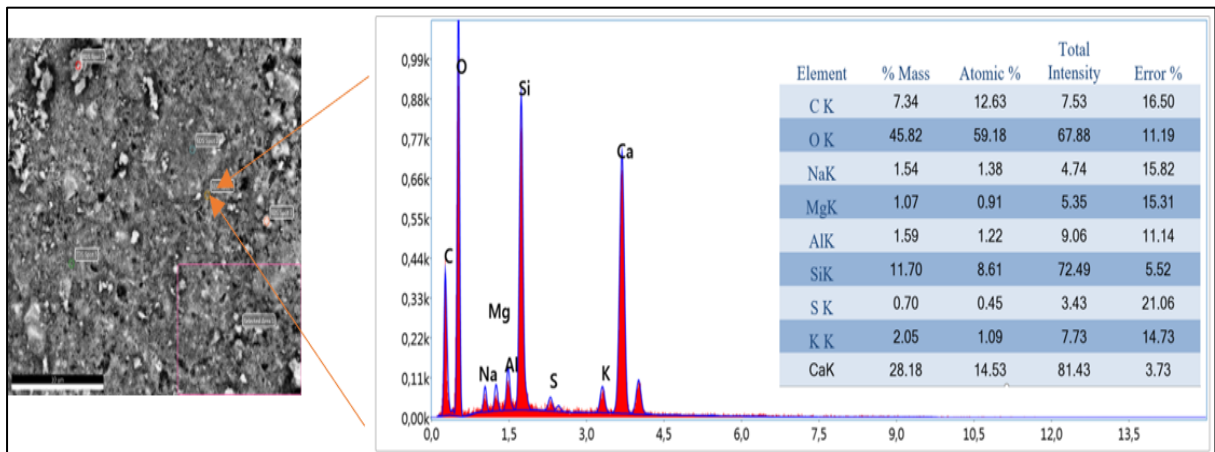
Figure IV. 9: Image MEB des BFUP BT, BC, BL



a) MEB /EDAX BFUP BT

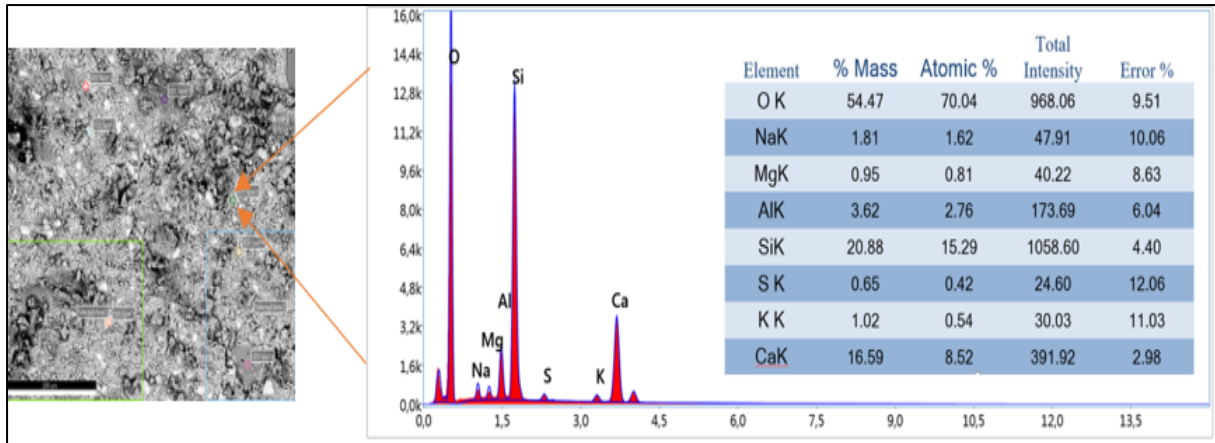


b) MEB /EDAX BFUP BT

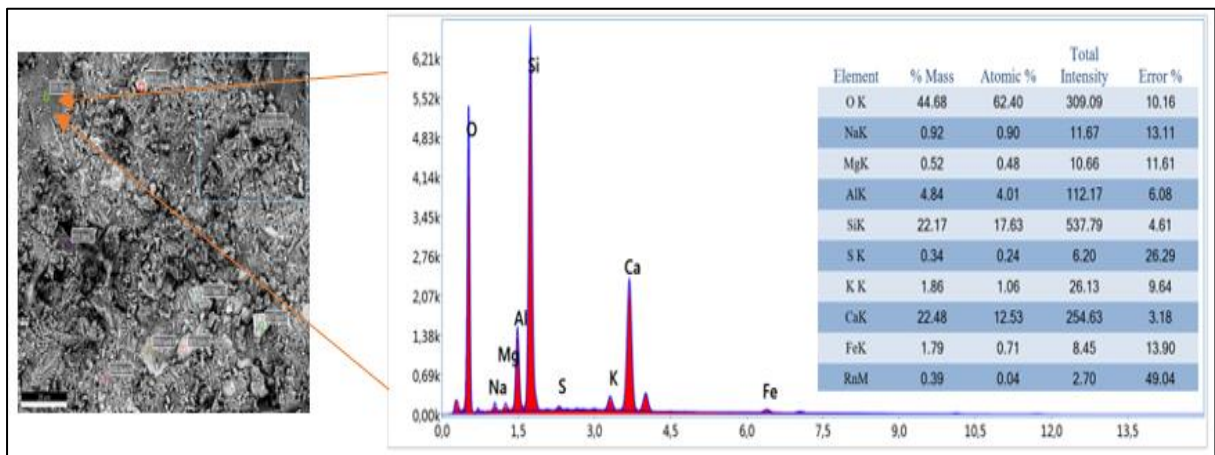


c) MEB /EDAX BFUP BT

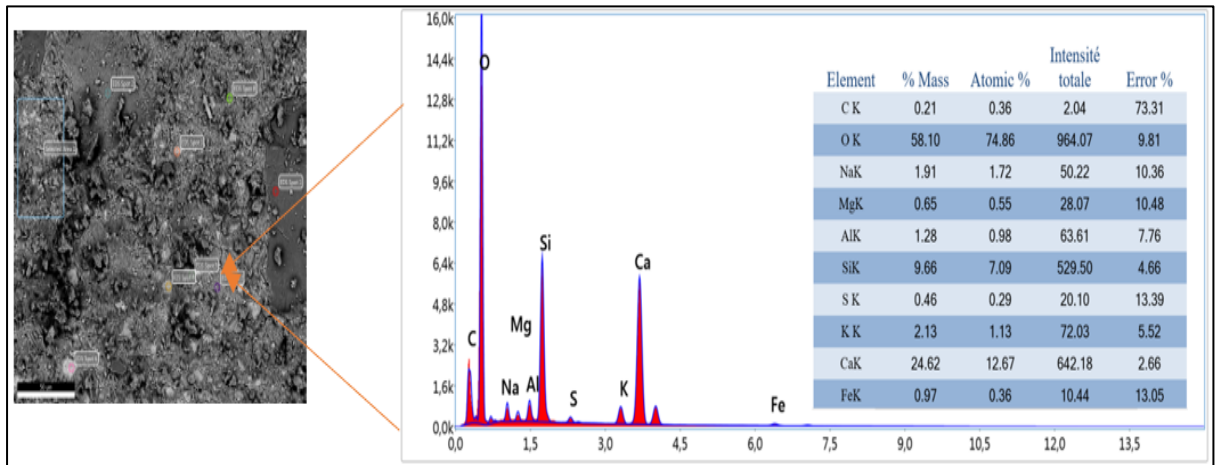
Figure IV. 10: Les micrographies MEB et les spectres EDAX du BT



a) MEB /EDAX BFUP BC

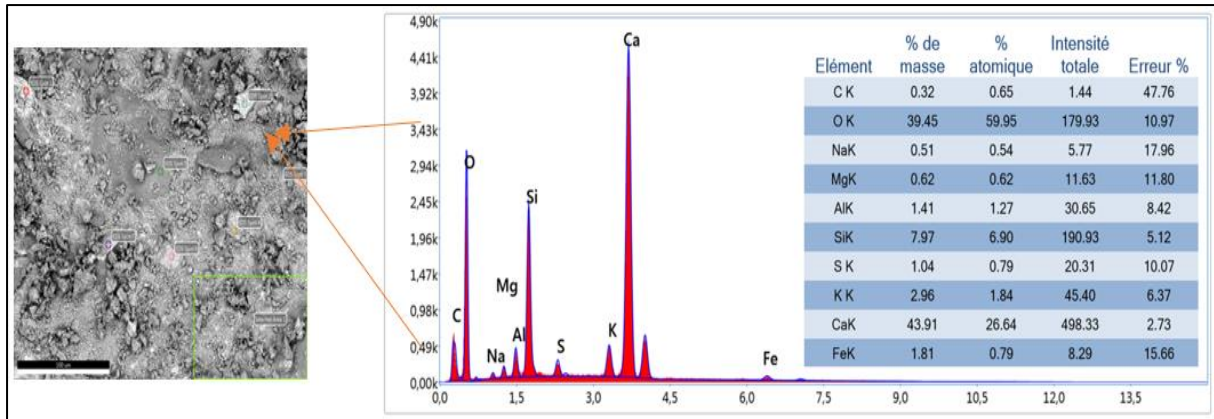


b) MEB /EDAX BFUP BC

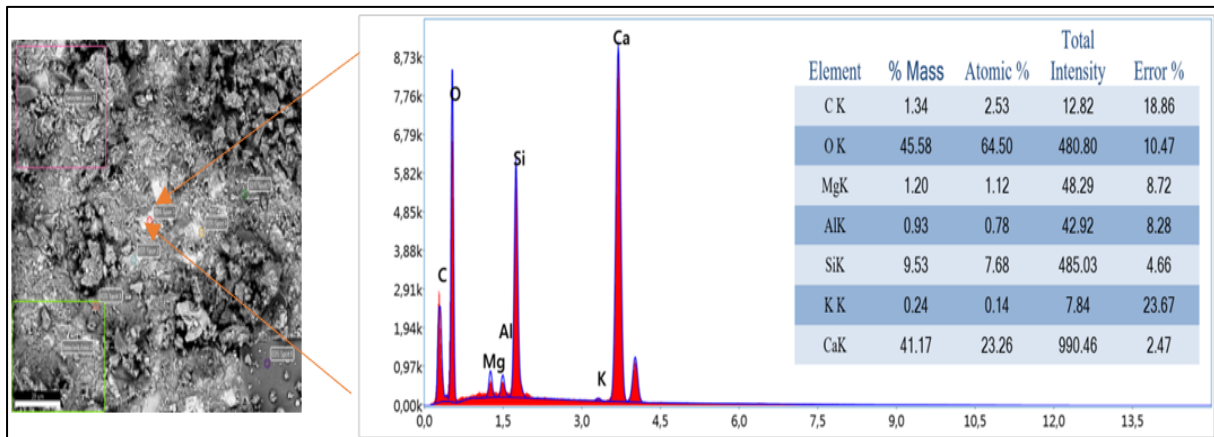


c) MEB /EDAX BFUP BC

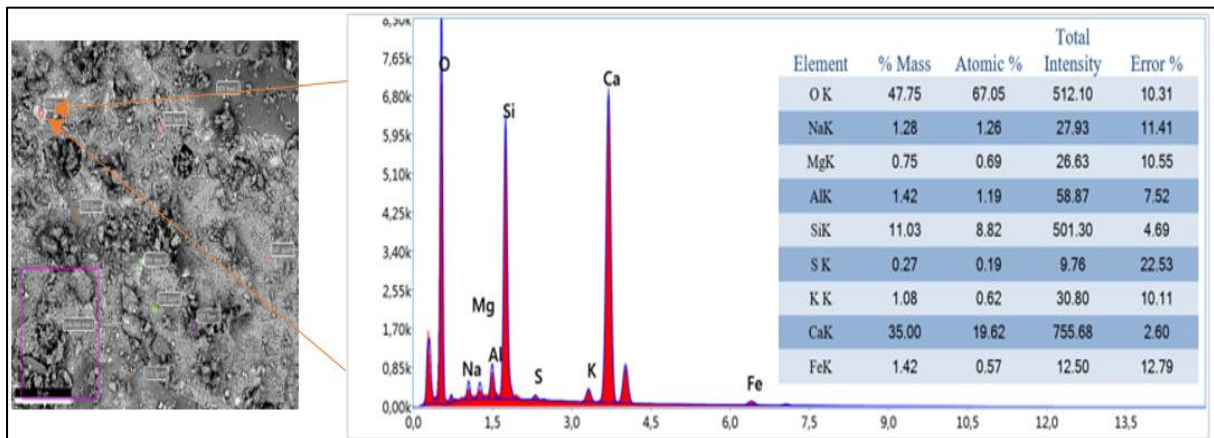
Figure IV. 11: Les micrographies MEB et les spectres EDAX du BC



a) MEB /EDAX BFUP BL



b) MEB /EDAX BFUP BL



c) MEB /EDAX BFUP BL

Figure IV. 12: Les micrographies MEB et les spectres EDAX du BL

La **figure IV.9** offre un aperçu des photographies capturées lors de l'observation au microscope électronique à balayage (MEB). Les grains de ciment anhydre sont visibles sous forme de grains d'une teinte blanche ou grise très claire. Les zones grises indiquent la présence d'hydrates, pouvant être de la portlandite ou du C-S-H. En outre, les grains très

sombres sont des grains de fumée de silice. Quant aux zones noires, elles correspondent à des bulles d'air (Mouallif et al., 2013).

La technique d'analyse MEB-EDAX (figures IV.10, IV.11, et IV.12) permet d'observer la structure de la surface et la composition chimique des matériaux à des grossissements élevés. Cette combinaison de techniques permet une étude détaillée des particules individuelles et des caractéristiques de la surface du matériau, avec une résolution pouvant atteindre 1 nanomètre.

Une analyse EDAX des BFUP a montré la présence des éléments Oxygène (O), Carbone(C), Silice (Si), Calcium (Ca), d'une façon prépondérante, avec des quantités variables d'une zone à l'autre et de BFUP à l'autre, d'une manière compatible à la composition initiale des composants, comme présente des traces de Sodium (Na), Magnésium (Mg), Soufre (S), Potassium (K), Alumine (Al), et le Fer (Fe), avec des quantités minimales.

Le BFUP BC est caractérisé par un rapport C/S plus faible ($0.6 \leq C/S \leq 1.8$) que le BFUP BT ($1.7 \leq C/S \leq 2.9$), (ce qui correspond probablement aux C-S-H en mélange submicronique avec de la portlandite) (Codina, 2007).

Les C-S-H dans la pâte du BFUP BC sont donc enrichis en silice, par contre au BFUP BL on constate un rapport C/S ($2.2 \leq C/S \leq 3.9$) plus élevé par rapport aux deux BFUP, est probablement dû à la richesse du laitier avec CaO.

Les analyses effectuées sur le BFUP BC sont plus dispersées. Il présente des rapports Si/Ca et Al/Ca plus élevés que dans les deux BFUP (Figure IV.13), ce qui résulte de leur teneur accrue en silice et alumine.

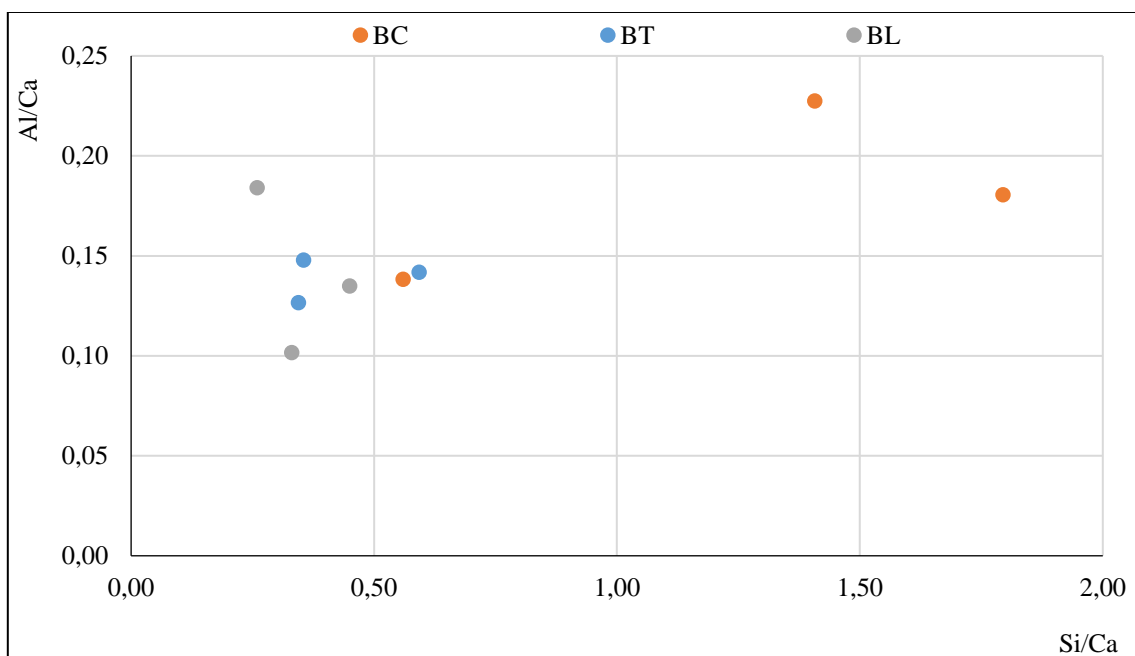


Figure IV. 13: Représentation Si/Ca et Al/Ca

IV.5 Conclusion

Après la réalisation de ce travail on peut tirer les conclusions suivantes

- L'ajout des fillers recyclés rend le béton plus dense. Les fillers de déchets de céramique améliorent l'ouvrabilité du BFUP, contrairement au filler de laitier, mais restent acceptables. Une légère diminution de la teneur en air occlus a été marquée dans le béton contenant des fillers de laitiers.

-L'introduction des fillers recyclés dans la formulation du BFUP entraînent une augmentation de la résistance en compression et en traction par flexion à court terme comme à long terme en comparaison avec le béton de référence et les valeurs maximales en compression sont données par le béton a base de déchets de céramique quelque soit l'âge.

-La dureté a la surface et l'homogénéité sont améliorés par l'ajout des fillers recyclés et la vitesse de propagation des ondes ultrasonique maximale sont données par le BFUP a base de laitier.

-Les analyses effectuées par MEB-EDAX ont mis en lumière une optimisation de la microstructure du BFUP intégrant des fillers recyclés. Cette structure s'est avérée plus dense et plus compacte que celle du BFUP témoin. Cette amélioration découle de l'effet pouzzolanique induit par les fillers recyclés, favorisant le développement des nouveaux C-S-H minimisant la quantité de portlandite. Simultanément, la phase ettringite a également diminué, ce qui justifie les améliorations enregistrées au niveau des propriétés physiques et mécaniques.

Chapitre V
**Effet des fillers recyclés sur les paramètres
de durabilité**

V. Effet des fillers recyclés sur les paramètres de durabilité

V.1 Introduction

On étudie dans ce chapitre l'effet des fillers recyclés sur les paramètres de durabilité à savoir, la porosité accessible à l'eau, l'absorption d'eau par immersion et capillaire, la résistance aux attaques chimiques dans les différentes solutions ainsi que la pénétration des ions de chlorures.

V.2 Effet des fillers recyclés sur les paramètres de durabilité

V.2.1 Porosité accessible à l'eau

On peut nettement remarquer que la porosité des bétons diminue avec l'utilisation des fillers de déchets de céramique et laitier (**figure V.1**), et que l'introduction des fillers de laitier donne les plus faibles porosités par rapport aux fillers de déchets de céramique, avec une diminution de l'ordre de 24%. Cela est attribué à l'effet de remplissage et la formation des C-S-H secondaires obtenus grâce à la réactivité pouzzolanique de ces fillers qui améliorent la compacité (**Savado et al., 2015**).

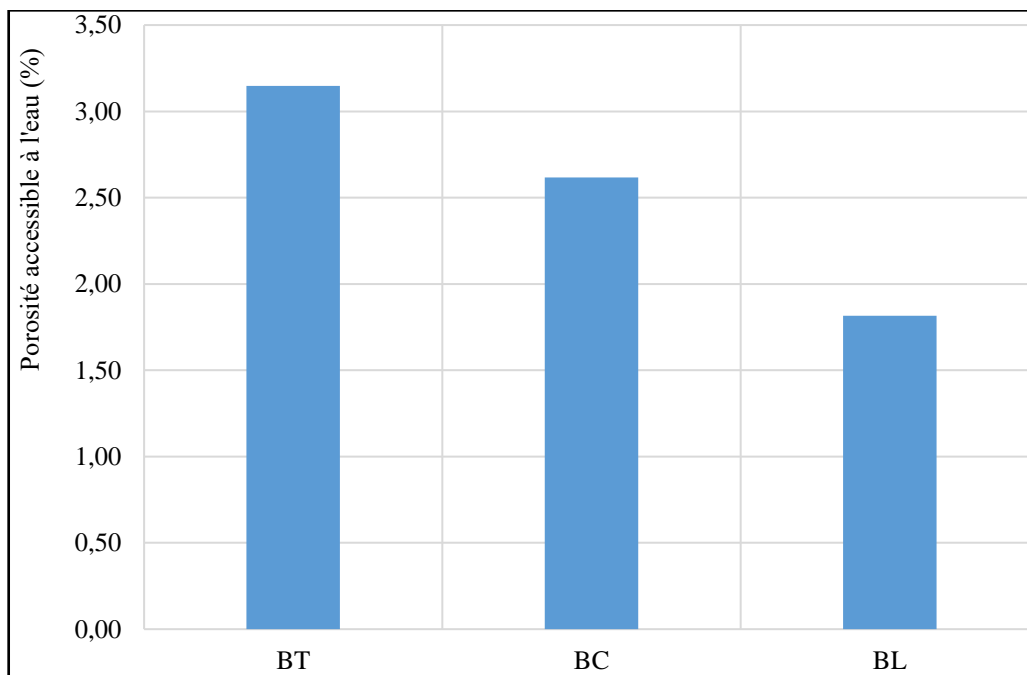


Figure V. 1: Variation de la porosité accessible à l'eau

V.2.2 Absorption d'eau par immersion

L'absorption d'eau par immersion (**figure IV.10**) est diminuée par l'introduction des fillers recyclés de laitier, et fillers de déchets de céramique, cette diminution est de l'ordre de 18.56% et 42.62% respectivement par rapport au BFUP témoin. L'absorption maximale est donnée par le BFUP témoins. Ces résultats sont similaires à ceux de la porosité accessible à l'eau.

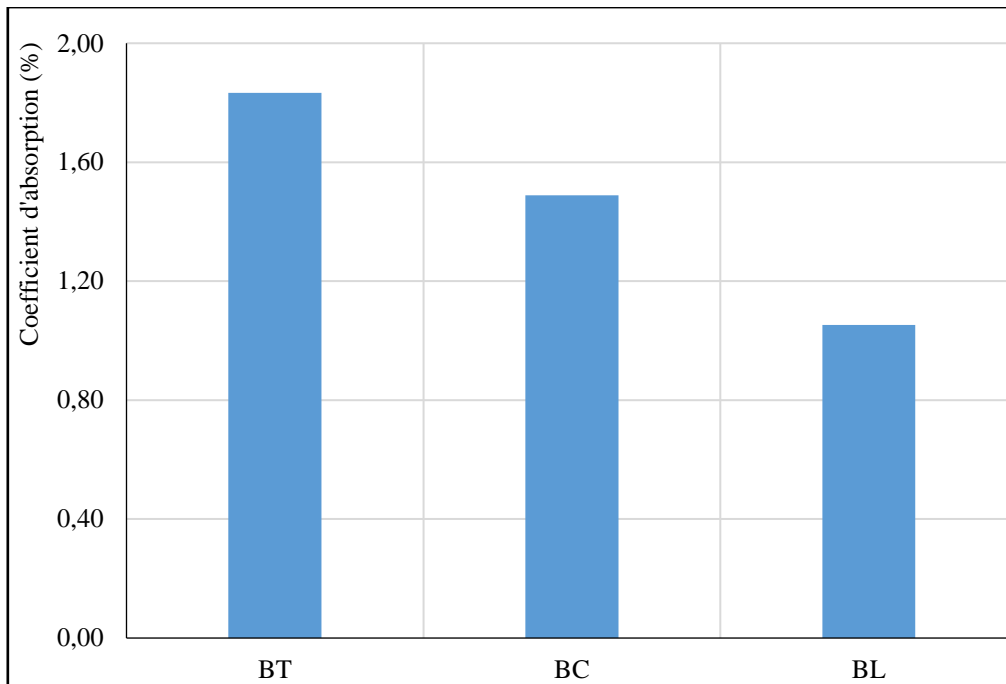


Figure V. 2: Variation de l'absorption par immersion

L'ajout des fillers recyclés entraîne un arrangement dans la matrice cimentaire est rend le béton plus compact par rapport au témoin ce qui explique la diminution de l'absorption dans les BFUP à base de fillers recyclés.

Le BFUP contenant des fillers recyclés de laitier affiche une absorption par immersion plus faible par rapport au BFUP à base de filler recyclé de céramique, ceci est dû à la possibilité d'une libération de gaz résultant d'une réaction entre l'alumine et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formé par l'hydratation (Van et al., 2019). Ce gaz se traduit par des vides qui rend la structure plus poreuse par rapport au BFUP contenant des fillers recyclés de laitiers (Van et al., 2019).

V.2.3 Absorption d'eau par capillarité

L'absorption d'eau par capillarité augmente avec le temps d'immersion (figure V.3), les courbes sont très rapprochées avant (327min), après ce temps la variation de l'absorption par capillarité est remarquable d'un type de béton a un autre.

L'introduction des fillers recyclés dans la formulation du BFUP entraîne une diminution de l'absorption, et le BFUP à base de fillers recyclés de laitier donne la plus faible absorption capillaire par rapport au BFUP à base de fillers de céramique et de référence respectivement. Ceci pourrait être attribué à la réaction pouzzolanique, laquelle génère de nouveaux produits, rendant ainsi la structure du réseau capillaire plus complexe, ce qui entraîne une réduction de la vitesse et de la facilité de la pénétration de l'eau (Savadogo et al., 2015) d'une part et à la formation des pores dans la formulation à base de fillers de céramique qui est une conséquence d'une réaction entre l'alumine et la portlandite d'autre part laitiers (Van et al., 2019).

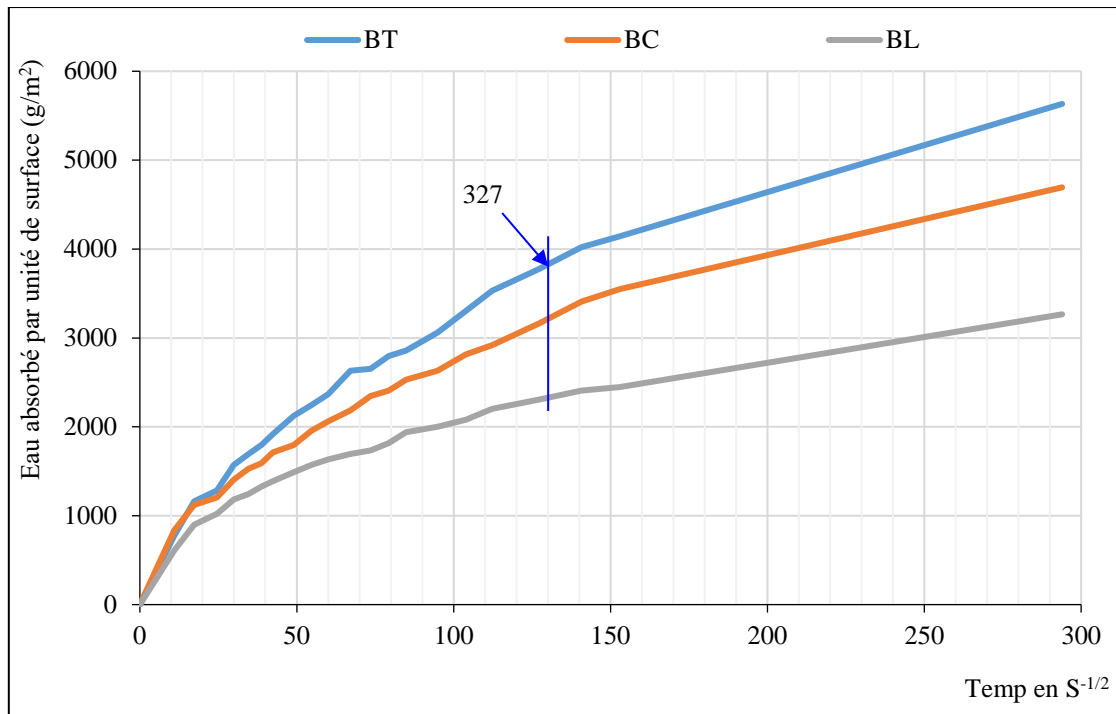


Figure V. 3: Variation de l'absorption par capillarité en fonction du temps

Le coefficient de capillarité C en g/(m².s^{1/2}), est donné par la **figure V.4**

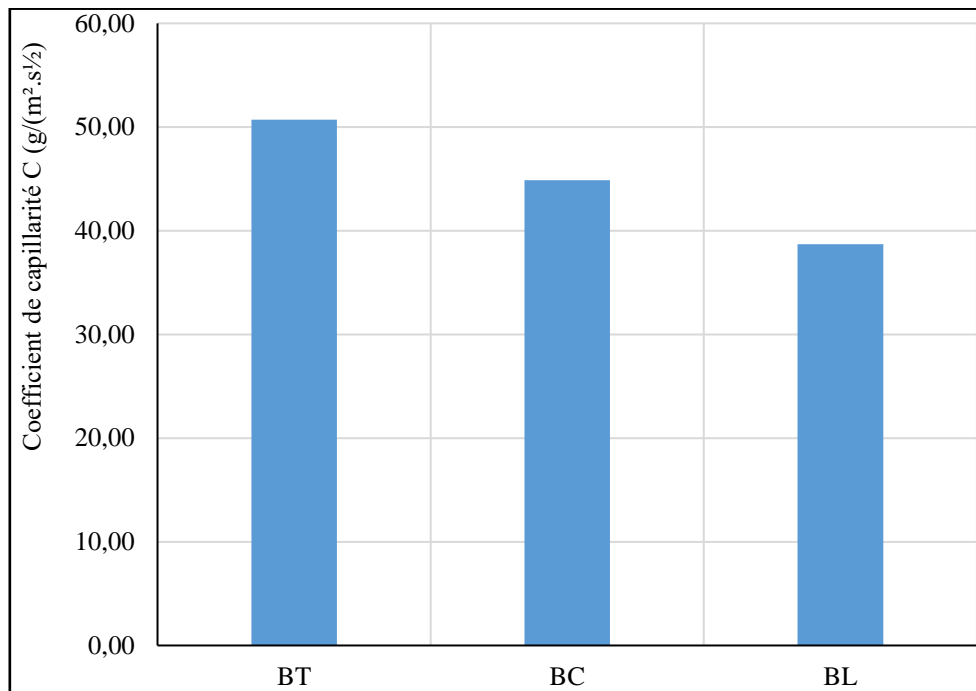


Figure V. 4: Variation du coefficient de capillarité C

D'après la **figure V.4**, on peut observer que la pente de la courbe d'absorption des BFUP avec fillers de laitier et avec fillers de déchets de céramique est plus faible que celle du béton témoin. Cette différence est due à la faible porosité accessible à l'eau.

V.2.4 Pénétration des chlorures

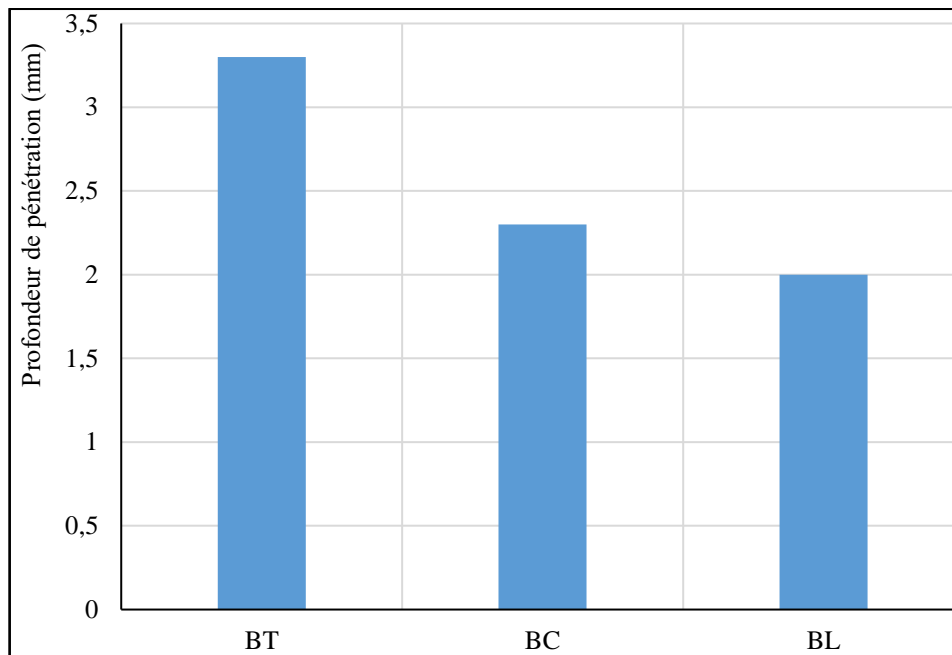


Figure V. 5: Variation de la profondeur de pénétration des chlorures en fonction du type de BFUP

La profondeur de pénétration des chlorures diminue avec l'introduction de fillers recyclés de céramique et de laitier, respectivement (**figure V.5**). Cette réduction est d'environ 30.30% dans le BFUP contenant des fillers de déchets de céramique et de 39.39% avec des fillers de laitier. Ces résultats suivent la même tendance que la porosité accessible à l'eau, où l'augmentation de la porosité accessible à l'eau entraîne une pénétration accrue des ions chlorures (**Rabehi, 2014**).

Les résultats indiquent que la profondeur de pénétration des chlorures dans notre BFUP est relativement faible. Cela s'explique par la densité de la matrice obtenue grâce au faible rapport E/C, ce qui confère au matériau un réseau poreux peu connecté, limitant ainsi la pénétration des ions chlorure (**Elsa NGUYEN, 2015**). De plus, l'utilisation du FPP améliore la compacité du béton et réduit la taille des micropores, contribuant à limiter la migration des ions chlorure (**Hassan et al., 2022**).

V.2.5 Attaque chimique dans les milieux agressifs

V.2.5.1 Attaque chimique par l'acide chlorhydrique (HCl)

L'incorporation des fillers recyclés de laitier et céramique augmente la résistance du béton témoin dans la solution HCl respectivement (**figure V.6**), cette résistance diminue avec l'âge. Les courbes des pertes de masse présentent la même allure et la variation de ces pertes est très importantes entre le béton à base de fillers de céramique et laitier en comparaison avec les pertes de masse entre le béton à base de fillers de laitier et témoin.

On comparation des BFUP à base de fillers recyclés, le BFUP à base de fillers de déchets de céramique est le plus résistant dans le milieu HCL que le BFUP à base de fillers de laitier ce qui est expliqué par la formation d'un chlorure de calcium hydraté ($\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)

provoqué par la solution d'acide chlorhydrique. Ce qui est très soluble (Achoura et al., 2004).

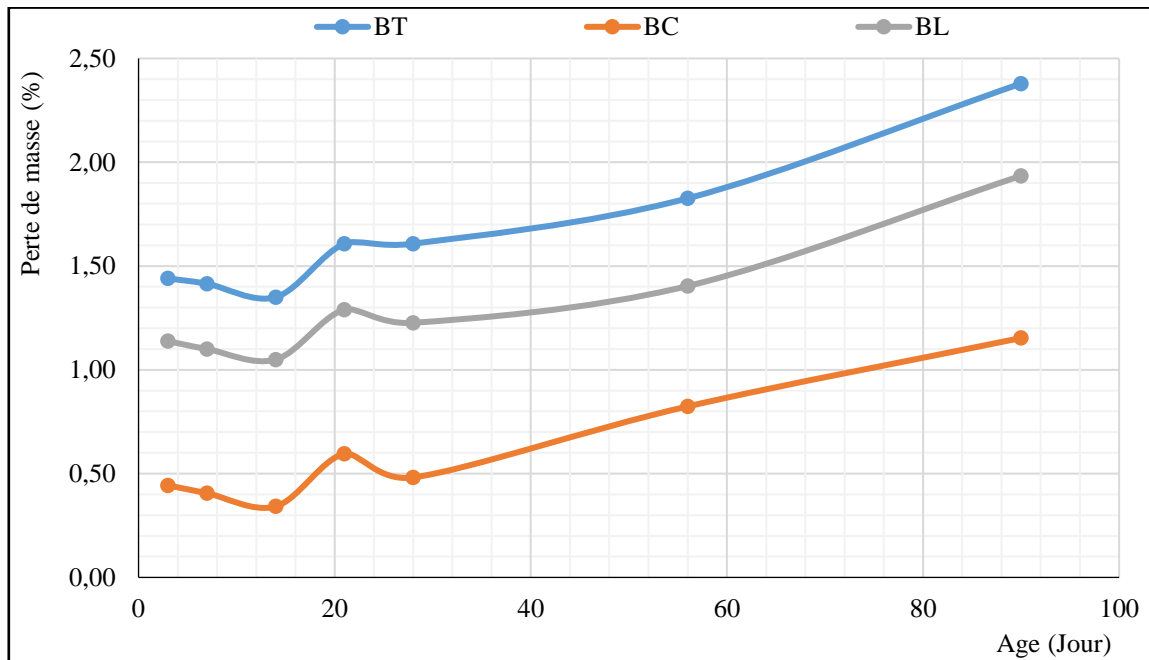


Figure V. 6: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans 5% de HCL

V.2.5.2 Attaque chimique par l'acide sulfurique (H_2SO_4)

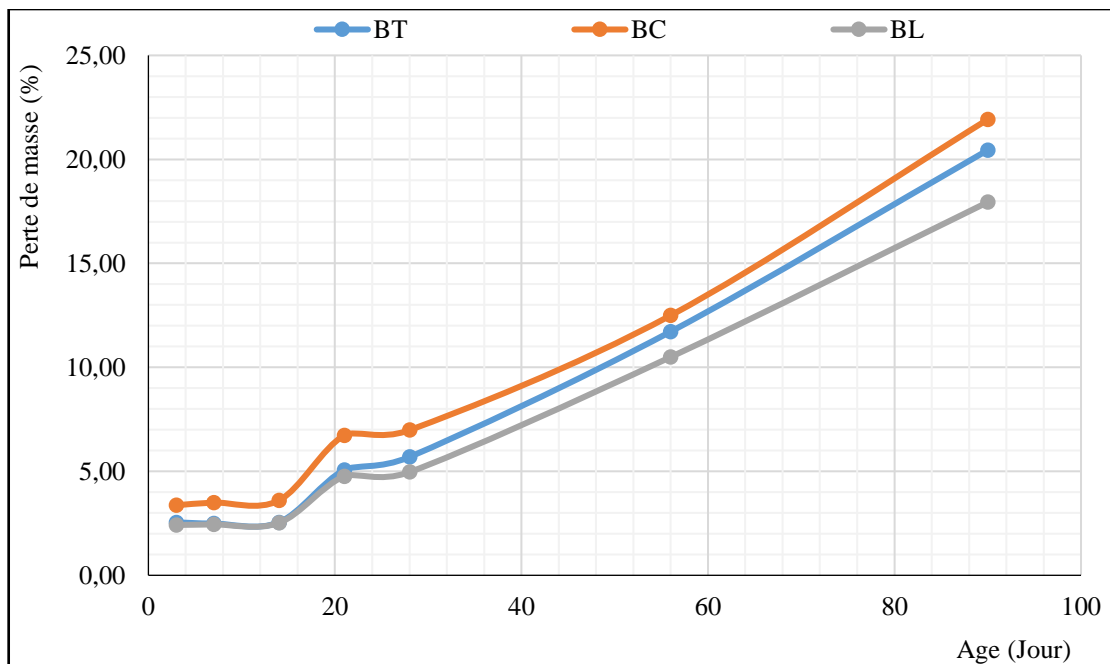


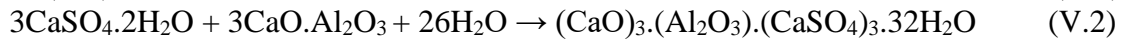
Figure V. 7: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans 5% de H_2SO_4

Après une immersion pendant 90 jours dans la solution H_2SO_4 (figure V.7), tous les bétons enregistrent des pertes de masse avec une sinitique de variation faible dans les premiers 14 jours, au-delà la variation est plus accentuée pour atteindre des valeurs maximales a l'âge 90 jours et les courbes sont très rapprochées. Le béton à base de fillers recyclés de déchets de céramique affiche la perte maximale qui est de l'ordre de 21.92% par contre la

perte minimale est de 17.94%. donnée par le béton contenant des fillers recyclées de laitier, ce qui explique l'effet conjugué bénéfique des fillers de laitier dans la densification de la structure poreuse du mélange et dans l'évolution des réactions d'hydratation pouzzolaniques (Bederina et al., 2012).

Les observations révèlent une plus grande agressivité de l'acide sulfurique par rapport à l'acide chlorhydrique. Cette différence s'explique par le fait que lors de l'attaque par l'acide sulfurique, en plus du phénomène de lixiviation, de l'ettringite expansive se forme dans les pores du béton, ce qui entraîne l'apparition de fissures (Savadojo et al., 2015).

Le mécanisme d'attaque s'effectue de la manière suivante: l'acide réagit avec le Ca(OH)_2 (portlandite), formant ainsi du sulfate de calcium (équation V.1). Ensuite, le gypse, qui est le sulfate de calcium hydraté, réagit avec les aluminates tricalcique (C3A) non hydraté, créant ainsi de l'ettringite (équation V.2) (Mouallif et al., 2013).



D'après (Mouallif et al., 2013), cette perte de masse est attribuée à un phénomène de lixiviation qui s'intensifie avec le temps.

En effet, la perte de masse est faible aux premiers âges d'immersion, comparativement aux périodes plus longues. Par exemple, pour le BFUP témoin, après 28 jours d'immersion dans une solution à 5% d'acide sulfurique, la perte de masse est d'environ 5.6%, tandis qu'elle atteint environ 20.44% après 90 jours d'immersion (Codina, 2007).

V.2.5.3 Attaque chimique par l'acide acétique (CH_3COOH)

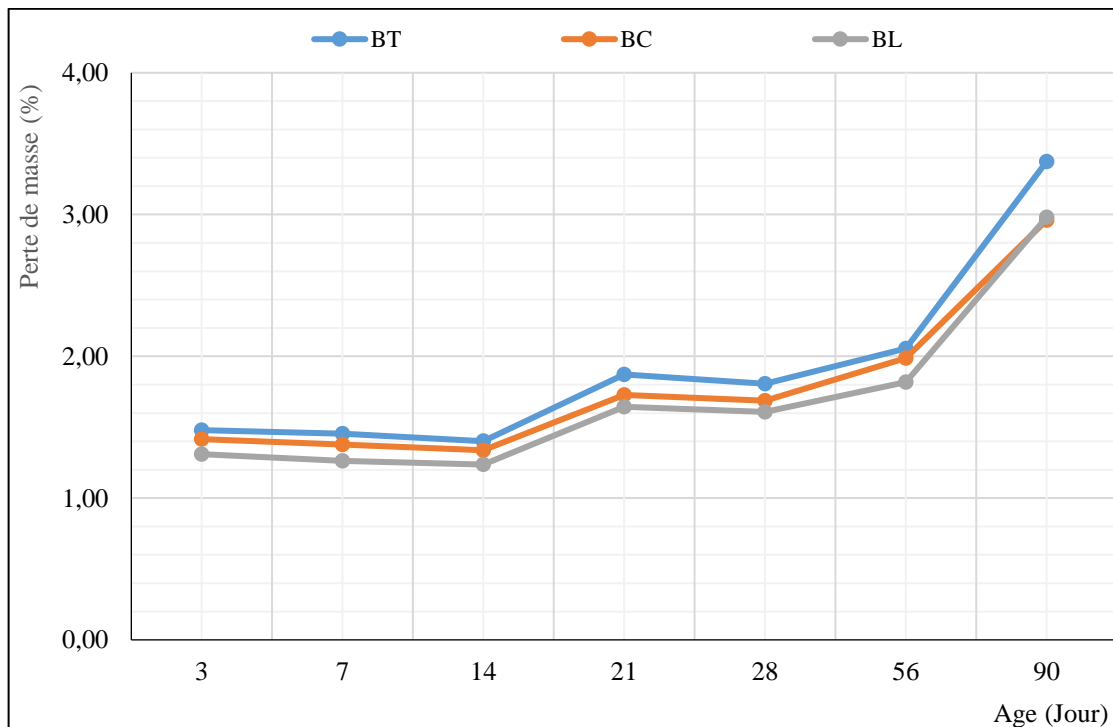


Figure V. 8: Perte de masse en fonction de la période d'immersion dans 5% CH_3COOH

Les BFUP à base de fillers recyclés présentent des pertes de masse dans CH_3COOH inférieur à celle du BFUP témoin.

Le BFUP à base de fillers de laitier plus résistant dans le milieu CH_3COOH que le BFUP à base de déchets de céramique qui est expliqué par la densification de la matrice résultant de l'évolution de la réaction pouzzolanique. La perte maximale est de l'ordre de 3.37% donnée par le béton témoin à l'âge 90 jours.

La perte minimale est donnée par le BFUP à base de fillers recyclés tandis que la perte maximale est donnée par le BFUP témoin, donc l'introduction des fillers recyclés améliore la résistance chimique dans le milieu CH_3COOH .

V.2.5.4 Attaque chimique par hydroxyde de sodium (NaOH)

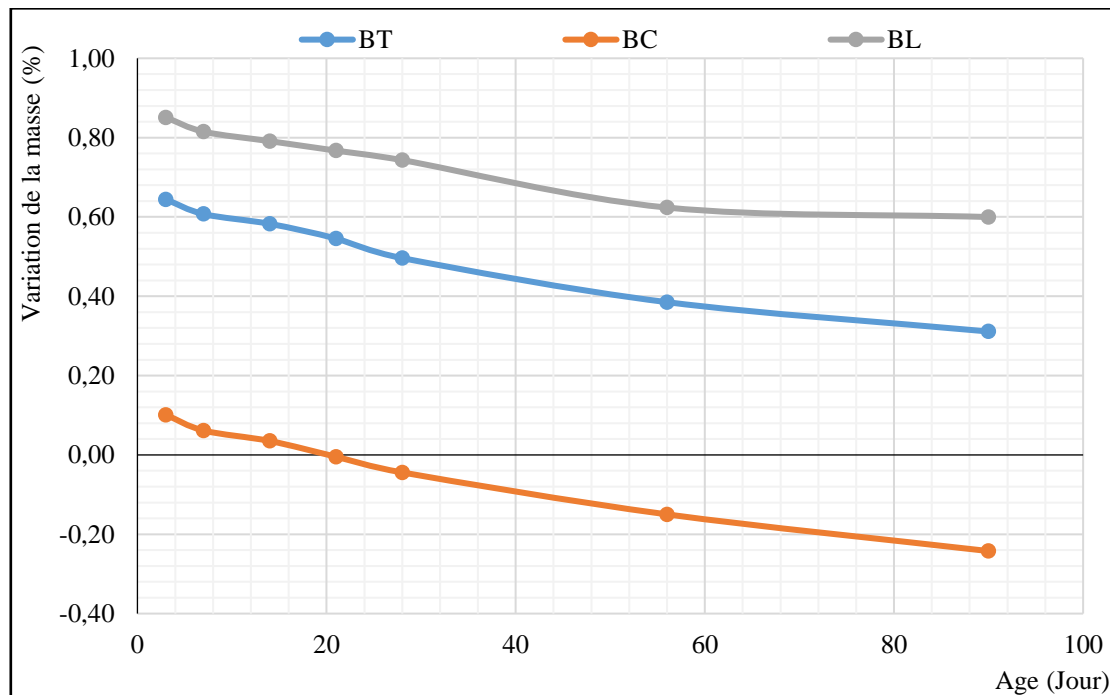


Figure V. 9: Variation de masse en fonction de la période d'immersion dans 5% NaOH

Le BFUP témoin présente une perte de masse inférieure par rapport au BFUP à base de fillers de laitier, par contre le BFUP à base de fillers de déchets céramique présente un léger gonflement.

Dans le milieu NaOH on constate que la perte de masse se diminue dans le temps, à l'âge de 7 jours on remarque un gain de masse qui progresse dans le temps, pour le BFUP à base de fillers de déchets de céramique il atteint un gonflement de 0.24% à 90 jours, mais les autres BFUP si on a laissé encore dans la solution pendant quelques jours possibles qu'ils atteindraient un gonflement aussi.

V.3 Conclusion

L'analyse des résultats nous a permis de tirer les conclusions suivantes:

- L'absorption d'eau par immersion et la porosité accessible à l'eau sont plus faibles dans les bétons à base de fillers recyclés, et le BFUP contenant des fillers de déchets de céramique absorbe plus d'eau par immersion en comparaison avec le BFUP à base de laitier. La même tendance a été marquée pour l'absorption d'eau par capillarité et sorptivité,

- L'ajout des fillers recyclés dans la masse du béton ralentit la pénétration des ions des chlorures et la faible pénétration est donnée par le BFUP à base de fillers de laitier,

- Les fillers recyclés augmentent la résistance du BFUP vis-à-vis de l'attaque chimique par l'acide chlorhydrique et acétique, par contre l'introduction des fillers de déchets de céramique influe négativement sur la résistance du béton attaqué par l'acide sulfurique. Un gonflement maximal a été observé sur le béton contenant des fillers de laitier immergé dans une solution alcaline.

Conclusions générales

Conclusions générales

L'analyse des résultats nous a permis de tirer les conclusions suivantes:

-L'ajout des fillers recyclés rend le béton plus dense. Le filler de déchets de céramique améliore l'ouvrabilité du BFUP contrairement au filler de laitier mais reste acceptable. Une légère diminution de la teneur en air occlus a été marquée dans le béton contenant des fillers de laitiers.

-L'introduction des fillers recyclés dans la formulation du BFUP entraînent une augmentation de la résistance en compression et en traction par flexion à court terme comme à long terme en comparaison avec le béton de référence et les valeurs maximales en compression sont données par le béton à base de déchets de céramique quelque soit l'âge. La dureté à la surface et l'homogénéité sont améliorés par l'ajout des fillers recyclés et la vitesse de propagation des ondes ultrasonique maximale sont données par le BFUP à base de laitier.

-L'absorption d'eau par immersion et la porosité accessible à l'eau sont plus faibles dans les bétons à base des fillers recyclés, et le BFUP contenant des fillers de déchets de céramique absorbe plus d'eau par immersion en comparaison avec le BFUP à base de laitier. La même tendance a été marquée pour l'absorption d'eau par capillarité et sportivité.

-Une bonne corrélation entre les résultats de la résistance en compression et la densité et également entre l'absorption et la porosité.

-L'ajout des fillers recyclés dans la masse du béton ralentie la pénétration des ions des chlorures et la faible pénétration est données par le BFUP à base de fillers de laitier.

-Les fillers recyclés augmentent la résistance du BFUP vis-à-vis de l'attaque chimique par l'acide chlorhydrique et acétique ; par contre, l'introduction des fillers de déchets de céramique influe négativement sur la résistance du béton attaqué par l'acide sulfurique. Un gonflement maximal a été marqué sur le béton contenant des fillers de laitier immergé dans une solution alcaline.

-microstructure

Les analyses effectuées par MEB-EDAX ont mis en lumière une optimisation de la microstructure du BFUP intégrant des fillers recyclés. Cette structure s'est avérée plus dense et plus compacte que celle du BFUP témoin. Cette amélioration découle de l'effet pouzzolanique induit par les fillers recyclés, favorisant le développement des nouveaux CSH minimisant la quantité de portlandite. Simultanément, la phase ettringite a également diminué, ce qui justifie les améliorations enregistrées au niveau des propriétés physiques et mécaniques.

D'une manière générale, ce travail nous a permis d'obtenir une formulation du BFUP a base des granulats locaux disponible en Algérie et l'ajout des fillers recyclés de déchets de céramique et laitier dans la masse de cette formulation est positif et encourage la recherche dans cet axe.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abellán-García, J., & García-Castaño, E. (2022). Development and Research on Ultra-High-Performance Concrete Dosages in Colombia: A Review. *ACI Materials Journal*, 119(3). <https://doi.org/10.14359/51734617>
- Achoura, D., Lanos, Ch., Jauberthie, R., & Redjel, B. (2004). Influence d'une substitution partielle du ciment par du laitier de hauts fourneaux sur la résistance des mortiers en milieu acide. *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 118, 159-164. <https://doi.org/10.1051/jp4:2004118019>
- AFGC, S. (2002). Bétons fibrés à ultra-hautes performances – Recommandations provisoires.
- Ait Medjber, F., & Saidi, M. (2019). Evaluation de degré de dégradation des BFUP dans deux milieux. *Algerian Journal of Materials Chemistry*, 2(2), 44-48.
- Akeed, M. H., Qaidi, S., Ahmed, H. U., Faraj, R. H., Mohammed, A. S., Emad, W., Tayeh, B. A., & Azevedo, A. R. G. (2022). Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part II: Hydration and microstructure. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01289. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01289>
- Arab, A., & Rafai, H. (2017). Elaboration et étude des caractéristiques physico-mécaniques des Bétons fibrés à ultra hautes performances avec ajouts de pouzzolane naturelle et de fumées de silice.
- Article L541-1. (s. d.). Article L541-1—Code de l'environnement—Légifrance. Consulté 26 juillet 2024, à l'adresse https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000006834444/2009-02-10
- ASTM C267-20. (2020). Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes. ASTM International.
- Baby, F. (2012). Contribution à l'identification et la prise en compte du comportement en traction des BFUP à l'échelle de la structure [Thèse de doctorat]. Université Paris-Est.
- Bederina, M., Bouziani, T., Khenfer, M., & Quéneudec, M. (2012). Absorption de l'eau et son effet sur la durabilité des bétons de sable allégés par ajout de copeaux de bois. *MATEC Web of Conferences*, 2, 01006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20120201006>
- Berthomier, M. (2019). Etude de la lixiviation de l'aluminium de matériaux cimentaires à base de CEM III utilisés dans les canalisations d'eau potable: Approche expérimentale et numérique [Thèse de Doctorat]. INSA.
- Boubekour, T., & Boulekbache, B. (2015). Propriétés mécaniques et durabilité des ciments ternaires à base de calcaire et de laitier granulé. *Algérie Équipement*, 55, 28-33.
- Bousslama, S., & Jelidi, A. (2003). Élaboration de bétons hydrauliques à base de laitiers de haut fourneau tunisien. *Materials and Structures*, 36(1), 59-67. <https://doi.org/10.1007/BF02481572>

- Chaïd, R., Bali, A., Jauberthie, R., & Talah, A. (2012). Comportement d'un béton à hautes performances à base de laitier en milieu sulfatique. *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 24, 91-99.
- Chan, Y.-W., & Chu, S.-H. (2004). Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1167-1172. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.023>
- Codina, M. (2007). La chimie de liants « bas pH » lors de l'hydratation. XXV^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil.
- De Larrard, F., & Sedran, T. (1999). Une nouvelle approche de la formulation des bétons. *Annale du BTP*, 6, 39-54.
- Doiron, G. (2009). Béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) et les ouvrages d'art en Amérique du Nord.
- Edouard, P. (2003). Mécanismes d'endommagement et comportements mécaniques d'un composite cimentaire fibré multi-échelles sous sollicitations sévères: Fatigue, choc, corrosion [Thèse de doctorat]. Ecole des Ponts ParisTech.
- Elsa NGUYEN, P. A. (2015). Développement de Bétons Fibrés Ultra Performants pour la réalisation d'éléments de structure préfabriqués. Université Toulouse 3 Paul Sabatier.
- EN 1008. (2003). Eau de gâchage pour bétons—Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton. Afnor EDITIONS.
- Fabrice, D. (2014, mars 22). Le pont de la République à Montpellier ouvert aux piétons et aux vélos. France 3 Occitanie. <https://france3-regions.francetvinfo.fr/occitanie/herault/montpellier-metropole/montpellier/pont-republique-montpellier-ouvert-aux-pietons-aux-velos-438247.html>
- François, T., Myriam, C., & Maxime, L. (2009). Durabilité et évolution in-situ des caractéristiques d'un BFUP: Retour d'expérience sur poutrelles dans un aéroréfrigérant.
- Ghani, A., Li, P., Alam, J., Khan, A. H., & Ahmad, M. (2023). Optimization of steel rebar and fibre contents in Ultra-high-performance concrete beam. <https://doi.org/doi:10.13140/RG.2.2.19215.05283>
- Granger, S. (2006). Caractérisation expérimentale et modélisation du phénomène d'auto-cicatrisation des fissures dans les bétons. Ecole Centrale de Nantes (ECN).
- Gu, C., Yu, G., & Sun, W. (2013). Simulation of hydration process and microstructure development of UHPC paste containing fly ash and silica fume. 767-776.
- Habel, K. (2004). Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete [Doctoral thesis]. École Polytechnique Fédérale De Lausanne.

- Hassan, M., Elahi, A., & Asad, M. (2022). Performance of Fibre Reinforced Self Compacting Concrete against Chloride Attack. *Engineering Proceedings*, 22(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/engproc2022022005>
- Hebhoub, H., KHERRAF, L., MOUATS, W., ABDELOUAHED, A., & BOUGHAMSA, W. (2020). Effets du taux de substitution de 15% de sable de déchets de céramiques sur les propriétés d'un béton hydraulique. *Algérie Équipement*, 62, 18-26.
- Jacques, R., & Ziad, H. (2015). Structures en Bétons Fibrés à Ultra-hautes Performances (BFUP)—État de l'art et perspectives. 920, 12-19.
- JIS A 1171. (2016). Test methods for polymer-modified mortar. Japanese Industrial Standards.
- Kang, C., Shukai, C., Qiaoyun, W., Cheng, Z., Shunkai, L., & Jianxin, L. (2024). Utilization of recycled fine aggregate in ultra-high performance concrete: Mechanical strength, microstructure and environment impacts. 439(137364). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137364>
- Khanzadi, M., & Behnood, A. (2009). Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2183-2188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.005>
- Khelil, N., Ould Ouali, M., & Meziane, L. (2023). On the use of fine dune sand in Reactive Powder Concrete: Effect on resistance, water absorption and UPV properties. *Construction and Building Materials*, 388, 131684. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131684>
- Kou, S.-C., & Poon, C.-S. (2009). Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2877-2886.
- Kou, S.-C., & Poon, C.-S. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 69-76.
- Li, L. G., Ouyang, Y., Zhuo, Z.-Y., & Kwan, A. K. H. (2021). Adding ceramic polishing waste as filler to reduce paste volume and improve carbonation and water resistances of mortar. *Advances in Bridge Engineering*, 2(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s43251-020-00019-2>
- Lionel, M. (2015). Valorisation de scories cristallines dans le béton de ciment. Université De Sherbrooke.
- Loi du 13 juillet 1992, français. (s. d.). Les nouvelles techniques de recyclage et de valorisation des déchets ménagers et des déchets industriels banals. Sénat. Consulté 26 août 2024, à l'adresse <https://www.senat.fr/rap/o98-415/o98-415.html>
- Loi n° 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement (1). Consulté 2 août 2024, à l'adresse <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT0000000345400/>

- Malier, Y. (. (1992). Les bétons à hautes performances - caractérisation, durabilité, applications - compte rendu des travaux scientifiques du projet national voies nouvelles du matériau béton. Ecole Française Du Béton.
- Mouallif, I., Lasfar, S., Latrach, A., Chergui, M., & Barbe, N. (2013). Influence du vieillissement sulfatique sur la résistance mécanique et la microstructure du béton. In A. F. de Mécanique (Éd.), CFM 2013—21ème Congrès Français de Mécanique. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc - 92400 Courbevoie. <https://hal.science/hal-03441207>
- Moula, S. (2023). Comportement à court et long termes des bétons à ultra-hautes performances (BUHP) à base de laitiers des hauts fourneaux. Université d'Orléans; Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis. El Amar, Tunisie.
- Moula, S. (2023). Comportement à court et long termes des bétons à ultra-hautes performances (BUHP) à base de laitiers des hauts fourneaux. Université d'Orléans; Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis. El Amar, Tunisie.
- Myriam, C. (2009). Bétons Fibrés Ultra Performant (BFUP) Les nouvelles recommandations AFGC chapitre 3 durabilité des BFUP.
- NA 442. (2013). Ciment -Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. Norme ALGERIENNE.
- NF EN 1097-3. (1998). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats—Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire. Afnor EDITIONS.
- NF EN 1097-6. (2022). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats—Partie 6: Détermination de la masse volumique et du coefficient d'absorption d'eau. Afnor EDITIONS.
- NF EN 12350-1. (2019). Essais pour béton frais—Partie 1: Prélèvement et appareillage commun. Afnor EDITIONS.
- NF EN 12350-6. (2019). Essais pour béton frais—Partie 6: Masse volumique. Afnor EDITIONS.
- NF EN 12350-7. (2019). Essais pour béton frais—Partie 7: Teneur en air—Méthode de la compressibilité. Afnor EDITIONS.
- NF EN 12350-8. (2019). Essai pour béton frais—Partie 8: Béton auto-plaçant—Essai détalé au cône d'Abrams. Afnor EDITIONS.
- NF EN 12390-1. (2021). Essais pour béton durci—Partie 1: Forme, dimensions et autres exigences aux éprouvettes et aux moules. Afnor EDITIONS.
- NF EN 12390-2. (2019). Essais pour béton durci—Partie 2: Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance. Afnor EDITIONS.

- NF EN 12390-3. (2019). Essais pour béton durci—Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes. Afnor EDITIONS.
- NF EN 12390-5. (2019). Essais pour béton durci—Partie 5: Résistance à la flexion des éprouvettes. Afnor EDITIONS.
- NF EN 12504-2. (2021). Essais pour béton dans les structures—Partie 2: Essais non destructifs—Détermination de l'indice de rebondissement. Afnor EDITIONS.
- NF EN 12504-4. (2021). Essais pour béton dans les structures—Partie 4: Détermination de la vitesse de propagation des ultrasons. Afnor EDITIONS.
- NF EN 13263-1+A1. (2009). Fumée de silice pour béton—Partie 1: Définitions, exigences et critères de conformité. Afnor EDITIONS.
- NF EN 196-6. (2018). Méthodes d'essai des ciments—Détermination de la finesse. Afnor EDITIONS.
- NF EN 197-1. (2012). Ciment—Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. Afnor EDITIONS.
- NF EN 206/CN. (2014). Béton—Spécification, performance, production et conformité. Afnor EDITIONS.
- NF EN 933-1. (2012). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats—Partie 1: Détermination de la granularité—Analyse granulométrique par tamisage. Afnor EDITIONS. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/resultats?Keywords=NF+EN+933-1&StandardStateIds=1>
- NF EN 933-8+A1. (2015). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats—Partie 8: Évaluation des fines—Équivalent de sable. Afnor EDITIONS.
- NF EN 933-9. (2022). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats—Partie 9: Qualification des fines—Essais au bleu de méthylène. Afnor EDITIONS.
- NF EN 934-2+A1. (2012). Adjuvants pour bétons, mortier et coulis—Partie 2: Adjuvants pour béton—Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage. Afnor EDITIONS.
- NF P 18-470. (2016). Bétons fibrés à Ultra Hautes Performances Spécification, performance, production et conformité.
- NF P15-435. (2021). Méthodes d'essais des ciments—Détermination de la masse volumique. Afnor EDITIONS.
- NF P18-459. (2022). Béton—Essai pour béton durci—Essai de porosité et de masse volumique. Afnor EDITIONS.
- P18-555. (1990). Granulats—Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables. Afnor EDITIONS.

- Parant, E. (2003). Mécanismes d'endommagement et comportements mécaniques d'un composite cimentaire fibré multi-échelles sous sollicitations sévères: Fatigue, choc, corrosion. Ecole des Ponts ParisTech.
- Patrick, G. (2018). BFUP - Résistance Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances | Infociments. <https://www.infociments.fr/betons/bfup>
- Rabehi, M. (2014). Apport à la caractérisation de la porosité ouverte du béton d'enrobage par l'utilisation des tests d'absorption capillaire [Thèse de doctorat]. Université Mohamed Khider Biskra. <http://thesis.univ-biskra.dz/1172/>
- RESPLENDINO, J. (2006). Les bétons fibrés ultra performants (BFUP). Perspectives offertes vis-à-vis de la pérennité et la maintenance des ouvrages. Colloques sur les Ouvrages d'Art, Toulouse.
- Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501-1511. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)
- Rihia, C., & Hebhouh, H. (2020). The percentage effect of slag on the behavior of a high performance concrete. *MATEC Web of Conferences*, 330, 01040.
- Roig-Flores, M., Borg, R. P., Ruiz-Muñoz, C., Mezquida-Alcaraz, E. J., Giménez-Carbó, E., Lozano Násner, A. M., & Serna, P. (2021). Preliminary study on the fresh and mechanical properties of UHPC made with recycled UHPC aggregates. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(15), 7427-7442. <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1997826>
- S. N. (1966). Béton à air occlu 1966, 34–35(6): 1–8. <https://doi.org/10.5169/SEALS-145703>
- Savadogo, N., Messan, A., Hannawi, K., Tsobnang, F., & Prince, W. (2015). Durabilité d'un ciment composé à base de mâchefer de Tefereyre (Niger): Absorption capillaire, porosité accessible à l'eau et attaque acide. *JOURNAL OF MATERIALS AND ENGINEERING STRUCTURES*, 2, 213-223.
- Sévar Dilkhaz, S., James H., H., & George, W. (2022). The behavior of UHPC containing recycled glass waste in place of cementitious materials: A comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials*, 17(e01494). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01494>
- Sivakumar, N. K., Muthusamy, N., Periasamy, S., & Manivannan, V. (2024). Reinventing concrete: Exploring strength and durability with portland slag cement. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 29(2), e20240156. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2024-0156>
- UNI 7928. (1978). Concrete determination of the Ion Chloride Penetration. UNI - Ente Nazionale Italiano Di Unificazione.
- Van, L. T., Kim, D. V., Xuan, H. N., Dinh, T. V., Bulgakov, B., & Bazhenova, S. (2019). Effect of Aluminium Powder on Light-weight Aerated Concrete Properties. *E3S Web of Conferences*, 97, 02005.

- Wang, B., Yan, L., Fu, Q., & Kasal, B. (2021). A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 171, 105565. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>
- Yu, L., Huang, L., & Ding, H. (2019). Rheological and mechanical properties of ultra-high-performance concrete containing fine recycled concrete aggregates. *Materials*, 12(22), 3717. <https://doi.org/10.3390/ma12223717>
- Zeghad, M. (2018). Recyclage des déchets inorganiques dans les nouveaux bétons: Bétons autoplaçants (BAP), bétons fibrés ultra-hautes performances (BFUHP) [Thèse de doctorat]. Mouloud Mammeri, Tizi ousou.