

Université 20 Août 1955-Skikda

Faculté des Technologie

Département : Génie civil

Réf :



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم: الهندسة المدنية

المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention
du diplôme de

Doctorat 3^{eme} Cycle

En génie civil

Option : Géo-matériaux

Thème

Contribution à l'étude d'un béton de sable renforcé par des fibres recyclées

Présentée par :

ALSAYADI Hamid

Soutenue publiquement le : 29 /11 /2025

Devant le jury :

President	Dr. MOUATS Wassilla	MCA	Univ. 20 Aout 1955 - Skikda
Directeur de thèse	Pr. HEBHOUB Houria	Pr	Univ. 20 Aout 1955 - Skikda
Co-Directeur de thèse	Dr. KHALDI Nacera	MCA	Univ. 8 Mai 1945 - Guelma
Examineur	Dr. ABDELOUAHED Assia	MCA	Univ. 20 Aout 1955 - Skikda
Examineur	Dr. KECHKAR Chiraz	MCA	Univ. 8 Mai 1945 - Guelma
Exmineateur	Dr. DORBANI Meriem	MCA	Univ. 8 Mai 1945 - Guelma

Remerciements

Je rends grâce à Allah, le Très-Haut, pour Sa guidance et pour l'aide et la force qu'Il m'a accordées tout au long de la réalisation de ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à Mme Houria HEBHOUB et à Mme Nacera KHALDI pour leur encadrement bienveillant, leurs orientations précieuses et leur suivi attentif, ainsi que pour le soutien qu'elles m'ont apporté et qui a eu un impact déterminant sur l'aboutissement de ce travail.

J'exprime également ma sincère reconnaissance aux membres du jury de soutenance, et en particulier à la présidente du jury, Mme Wassila MOUAT, ainsi qu'aux autres membres : Mme Assia ABDELOUAHED, Mme Cheiraz KECHKAR et Mme Meriem DERBANI, pour l'honneur qu'elles m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail, pour le temps qu'elles y ont consacré et pour leurs remarques constructives qui ont permis d'enrichir et d'améliorer ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil de l'Université de Skikda, ainsi qu'au laboratoire LNHC et au laboratoire de l'Université, pour le soutien apporté, les moyens mis à ma disposition et la qualité de leur accueil.

À ma famille, source de force et d'affection :

À ma mère, que Dieu la préserve, pour ses prières, son soutien et son affection.

À la mémoire de mon père, qu'Allah lui fasse miséricorde, pour les valeurs qu'il m'a transmises et l'exemple qu'il m'a laissé.

À mes frères Abdelouahed, Mohib et Ahmed, ainsi qu'à ma sœur Kholoud, pour leur soutien fraternel et leurs encouragements.

J'adresse également mes remerciements les plus chaleureux à mon épouse Ehsan, pour son amour, sa patience et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce travail.

Enfin, j'exprime ma gratitude à toutes celles et tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance la plus sincère.

Dédicace

À la mémoire de mon père bien-aimé, À celui qui fut grand dans ma vie, mon premier soutien et la lumière de mon chemin. Tu me manques à chaque instant, et ton absence laisse un vide immense dans mon cœur. Ta force, ta générosité et ton intégrité resteront à jamais un modèle pour moi. Ce travail, qui a été la clé de ma réussite, t'est dédié en signe de fidélité et de profonde reconnaissance. Que Dieu t'accorde Sa miséricorde et t'enveloppe de Sa grâce. À ma chère mère, source d'amour et de force, que Dieu la protège et lui accorde longue vie. À mon épouse Ehsan, compagne de mon chemin, merci pour ton amour et ton soutien. À mes frères Abdelouahed, Mohib et Ahmed, et à ma sœur et âme jumelle Kholoud, toute mon affection et ma reconnaissance. À ma famille et à mes amis, ma profonde gratitude pour votre présence et votre appui.

Résumé

Le recyclage des déchets dans les matériaux de construction est une démarche qui s'inscrit dans le cadre du développement durable, visant à créer de nouveaux matériaux aux caractéristiques concurrentielles par rapport aux matériaux traditionnels. Dans ce contexte, cette étude vise à récupérer les déchets d'acier, de cuivre et d'aluminium résultant des travaux d'ateliers de forgeron et à les réutiliser sous forme de fibres de renforcement dans le béton de sable. Afin d'évaluer l'impact de ces déchets sur les propriétés du béton, nous les avons introduits sous forme de fibres à différentes proportions (0.4%, 0.8% et 1.2%). Ensuite, une série d'essais a été réalisée pour déterminer l'évolution des caractéristiques du béton à l'état frais (ouvrabilité et densité) et à l'état durci (résistance à la compression, traction par flexion, résistance en compression obtenue par scléromètre et la vitesse des ondes ultrasoniques), ainsi que la durabilité du béton (coefficient d'absorption par immersion, par capillarité et la porosité accessible à l'eau). En fin, le comportement du béton a été évalué face aux attaques chimiques (H_2SO_4 , HCL, CH_3COOH et NaOH) par la mesure de la perte en masse. Les résultats obtenus ont montré une évolution positive de certaines propriétés du béton de sable en fonction de type et de pourcentage de fibres intégrées dans la composition du béton.

Les fibres recyclées d'acier augmentent fortement la densité du béton et améliorent son ouvrabilité, ainsi que sa résistance en compression et en traction, sa compacité et sa résistance chimique face au H_2SO_4 , au HCL et au NaOH. Les fibres recyclées de cuivre augmentent la densité et la résistance en traction du béton, améliorent l'homogénéité interne et les performances aux ultrasons, réduisent l'absorption d'eau par capillarité et renforcent la résistance chimique face au H_2SO_4 , au HCL et au NaOH. Les fibres recyclées d'aluminium confèrent une faible résistance en compression, elles améliorent le module d'élasticité et offrent une bonne résistance face à l'acide acétique (CH_3COOH).

Mots clés: béton de sable, fibres recyclées, formulation, propriétés mécaniques, durabilité.

Abstract

Recycling waste in construction materials is part of a sustainable development approach aimed at creating new materials with characteristics that have been shown to be competitive with traditional materials. In this context, this study aims to recover steel, copper and aluminum wastes from blacksmiths' workshops together with the reuse thereof in the form of reinforcing fibers in sand concrete. However, in order to assess the impact of this waste on the concrete properties, we introduced such wastes in the form of fibers at different proportions (0.4 %, 0.8 % and 1.2 %). Further, a series of tests was then carried out to determine the evolution of the concrete characteristics in the fresh state (workability and density) and in the hardened state (compressive strength, flexural strength, compressive strength obtained using a sclerometer and the speed of ultrasonic waves), as well as the concrete's durability (absorption coefficient by immersion, by capillarity and the porosity accessible to water). In closing, the behavior of the concrete was assessed in the face of a chemical attack by H₂SO₄, HCl, CH₃COOH and NaOH by measuring mass loss. In virtue of thus, the results obtained demonstrated a positive evolution of certain properties of sand concrete as a function of the type and percentage of fibers incorporated into the composition of the concrete.

Recycled steel fibers significantly increase the density of concrete and improve its workability, as well as its compressive and tensile strength, compactness, and chemical resistance to H₂SO₄, HCl, and NaOH. Recycled copper fibers increase the density and tensile strength of concrete, enhance internal homogeneity and ultrasonic performance, reduce water absorption by capillarity, and strengthen chemical resistance to H₂SO₄, HCl, and NaOH. Recycled aluminum fibers provide low compressive strength, improve the modulus of elasticity, and offer good resistance to acetic acid (CH₃COOH).

Keywords: sand concrete, recycled fibers, formulation, mechanical properties, durability.

ملخص

يُعدّ إعادة تدوير النفايات في مواد البناء خطوةً تدرج ضمن إطار التنمية المستدامة، وتهدف إلى ابتكار مواد جديدة ذات خصائص تنافسية مقارنة بالمواد التقليدية. وفي هذا السياق، تهدف هذه الدراسة إلى استرجاع مخلفات الحديد والنحاس والألمنيوم الناتجة عن أعمال ورش الحدادة، وإعادة استخدامها على شكل ألياف تسليح في خرسانة الرمل ولتقييم أثر هذه المخلفات على خصائص الخرسانة، قمنا بإدخالها على شكل ألياف بنسب مختلفة (0.4%، 0.8%، 1.2%). بعد ذلك، أُجريت سلسلة من الاختبارات لتحديد تطور خصائص الخرسانة في الحالة الطازجة (قابلية التشغيل والكثافة) وفي الحالة المتصلبة (مقاومة الضغط، مقاومة الشد بالانحناء، مقاومة الضغط المقاسة بمطرقة شميدت، وسرعة الموجات فوق الصوتية)، إضافة إلى تقييم متانة الخرسانة (معامل الامتصاص بالغمر، والامتصاص الشعري، والمسامية القابلة لنفاذ الماء) وفي النهاية، جرى تقييم سلوك الخرسانة أمام الهجمات الكيميائية (NaOH، وHCl، وCH₃COOH، وH₂SO₄) من خلال قياس الفاقد في الكتلة.

وقد أظهرت النتائج تحسناً إيجابياً في بعض خصائص خرسانة الرمل تبعاً لنوع الألياف ونسبتها في مكونات الخرسانة.

- تزيد الألياف المعاد تدويرها من الفولاذ بشكل كبير من كثافة الخرسانة وتحسن قابلية تشغيلها، إضافة إلى رفع مقاومتها للضغط والشد، وزيادة تماسكها ومقاومتها الكيميائية في مواجهة H₂SO₄ وHCl وNaOH.

أما الألياف المعاد تدويرها من النحاس فترفع كثافة الخرسانة ومقاومتها للشد، وتحسن تجانس بنيتها الداخلية وأدائها في اختبارات الموجات فوق الصوتية، وتقلل امتصاص الماء بالشعيرات، وتعزز مقاومتها الكيميائية تجاه H₂SO₄ وHCl وNaOH.

بينما تمنح الألياف المعاد تدويرها من الألمنيوم مقاومة ضغط منخفضة، لكنها تحسن معامل المرونة وتوفر مقاومة جيدة تجاه حمض (CH₃COOH).

الكلمات المفتاحية: خرسانة الرمل، الألياف المعاد تدويرها، الخلطات، الخواص الميكانيكية، المتانة.

Sommaire

Résumé	i
Abstract	ii
ملخص	iii
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Introduction générale	1

Chapitre I: Etat de connaissance

I.1. Introduction	
I.2. Béton de sable	6
I.2.1. Introduction	6
I.2.2. Composition de béton de sable	6
I.2.3. Propriétés du béton de sable	7
I.2.3.1. Propriétés à l'état frais	7
I.2.3.2. Propriétés à l'état durci	7
I.2.4. Approche de la formulation	9
I.2.5. Avantage et inconvénients des bétons de sable	10
I.2.6. Utilisations	11
I.3. Différents types de fibres utilisées dans les matériaux de construction	12
I.3.1. Introduction	12
I.3.2. Différents types de fibres	12
I.3.2.1. Fibres métalliques	13
I.3.2.2. Fibres synthétiques	13
I.3.2.3. Fibres naturelles	14
I.3.2.4. Fibres de déchets de forgeries	14
I.4. Valorisation des déchets comme fibres dans le béton de sable	17
I.5. Conclusion	20
	23

Chapitre II: Caractérisation des matériaux

II.1. Introduction	
II.2. Caractérisation des matériaux	26
II.2.1. Ciment	26
II.2.2. Sable	26
II.2.3. Fines calcaires	28
II.2.4. Fibres recyclées	31
II.2.5. Adjuvant (superplastifiant)	31
II.2.6. Eau de gâchage	34
II.3. Conclusion	35
	35

Chapitre III: Programme expérimental et méthodologie d'essais

III.1. Introduction	
III.2. Programme expérimental	37
III.2.1. Formulation des mélanges	37
III.3. La fabrication des mélanges	38
III.3.1. Le malaxage	39

III.3.2. Types des moules	39
III.3.3. Préparation des éprouvettes	39
	40
III.3.4. Conservation des éprouvettes	41
III.4. Méthodes d'essais	42
III.4.1. Essais effectués sur le béton frais	42
III.4.1.1. Densité	42
III.4.1.2. Ouvrabilité	43
III.4.2. Essais effectués sur le béton durci	43
III.4.2.1. Essai de traction par flexion	43
III.4.2.2. Essai de compression	44
III.4.2.3. Essai au scléromètre	45
III.4.2.4. Essai de vitesse ultrasonique	46
III.4.2.5. Mesure du module d'élasticité	47
III.4.2.6. Absorption d'eau par immersion	47
III.4.2.7. Porosité accessible à l'eau	48
III.4.2.8. Essai de l'absorption d'eau par capillarité	48
III.4.2.9. Essai des attaques chimiques	49
III.5. Conclusion	51

Chapitre IV: Influence du taux et types de fibres sur les propriétés du béton de sable

IV.1. Introduction	53
IV.2. Influence du taux et de types de fibres sur les propriétés béton à l'état frais	53
IV.2.1. Densité	53
IV.2. 2. Ouvrabilité	53
IV.3. Influence du taux et de type de fibres sur les propriétés à l'état durci	54
IV.3.1. Résistance à la compression	54
IV.3.2. Résistance en traction par flexion	56
IV.3.3. Résistance en compression obtenue par l'essai scléromètre	58
IV.3.4. Vitesse de propagation du son obtenue par ultrason	59
IV.3.5. Résistance à la compression obtenue par la méthode combinée ultrason/scléromètre	60
IV.3.6. Module d'élasticité dynamique	61
IV.4. Conclusion	62

Chapitre V: Influence du taux et du type de fibres sur les paramètres de durabilité du béton de sable

V.1. Introduction	64
IV.2. Influence du taux de substitution et du type de fibres sur les paramètres de durabilité du béton	64
V.2.1. Absorption d'eau par immersion	64
V.2.2. Porosité accessible à l'eau	65
V.2.3. Absorption d'eau par capillarité	66
V.2.4. Résistances chimiques aux acides et bases	68
V.2.4.1. Attaque par l'acide sulfurique (5% H ₂ SO ₄)	68
V.2.4.2. Attaque par l'acide chlorhydrique (5%HCL)	69

V.2.4.3. Attaque par l'acide acétique (5%CH ₃ COOH)	71
V.2.4.4. Attaque par l'hydroxyde de sodium (5%NaOH)	73
V.3. Conclusion	75
Conclusions générales	77
Références bibliographiques	81

Liste des figures

Chapitre I: Etat de connaissance

Figure I.1: Cône d'Abrams	8
Figure I.2: Densité a l'état frais	8
Figure I.3: Aéromètre a béton	9
Figure I.4: Machine pour l'essai de compression	9
Figure I.5: Machine de traction par flexion	10
Figure I.6: Fibres d'acier (Sika Belgium)	13
Figure I.7: Fibres synthétiques (Sika Belgium)	14
Figure I.8: Plantes et fibres naturelles	16
Figure I.9: Métaux ferreux	17
Figure I.10: Métaux non ferreux	17
Figure I.11: Déchets d'acier	18
Figure I.12: Déchets de cuivre	19
Figure I.13: Déchets d'aluminium	20

Chapitre II: Caractérisation des matériaux

Figure II.1: Ciment CPJ-CEMII/ A (S-L) 42.5, Hdjar soud- Skikda	26
Figure II.2: Mesure de la densité du ciment	27
Figure II.3: Mesure de la finesse du ciment	27
Figure II.4: Sable de dune	29
Figure II.5: Essais de caractérisations effectués sur le sable	29
Figure II.6: Courbe granulométrique du sable	30
Figure II.7: Fines calcaires	31
Figure II.8: Déchets des forgerons	31
Figure II.9: Fibres recyclées	32
Figure II.10: Mesure de la densité ses fibres	32
Figure II.11: Machine d'essai Zwick/Roell	33
Figure II.12: Adjuvant Master Glenium 26	34

Chapitre III: Programme expérimental et méthodologie d'essais

Figure III.1: Malaxeur des bétons	39
Figure III.2: Types de moules utilisés	40
Figure III.3: Préparations des éprouvettes	40
Figure III.4: Conservation des moules après coulage	41
Figure III.5: Eprouvettes après décoffrage	41
Figure III.6: Conservation des éprouvettes après décoffrage	42
Figure III.7: Mesure de la densité du béton frais	42
Figure III.8: Affaissement au cône d'Abrams	43
Figure III.9: Essai de traction par flexion	44
Figure III.10: Etat des éprouvettes après rupture en traction par flexion	44
Figure III.11: Essai de résistance à la compression	45
Figure III.12: Essai au scléromètre	45
Figure III.13: Essai de vitesse ultrasonique	46

Figure III.14: Essai d'absorption d'eau par immersion	47
Figure Error! No text of specified style in document. .15: Essai de la porosité accessible à l'eau	48
Figure III.16: Essai de l'absorption d'eau par capillarité	49
Figure III.17: Eprouvettes conservées dans 28 jours dans l'eau	50
Figure III.18: Conservation des éprouvettes dans les solutions	50
Figure III.19: Mesure du poids après attaque	51

Chapitre IV: Influence du taux et types de fibres sur les propriétés du béton de sable

	53
Figure IV.1: Variation de la densité en fonction du taux et du type de fibres	54
Figure IV.2: Variation de l'ouvrabilité en fonction du taux et type des fibres	55
Figure IV.3: Variation de la résistance en compression en fonction du taux et de type de fibres recyclées.	56
Figure IV.4: Etat des éprouvettes après décoffrage	57
Figure IV.5: Variation de la résistance en traction par flexion en fonction du taux et de type de fibres recyclées	58
Figure IV.6: Résistance en compression obtenue par scléromètre	59
Figure IV.7: Variation de la vitesse ultrasonique en fonction du taux et type de fibres recyclées	60
Figure IV.8: Variation de la résistance en compression obtenue par la méthode combinée en fonction du taux et type de fibres recyclées	61
Figure IV.9: Variation du module d'élasticité en fonction du taux et type de fibres recyclées	

Chapitre V: Influence du taux et du type de fibres sur les paramètres de durabilité du béton de sable

	64
Figure V.1: Variation de l'absorption d'eau par immersion en fonction du taux et du type de fibres recyclées	65
Figure V.2: Variation de la porosité accessible à l'eau en fonction du taux et type de fibres recyclées	66
Figure V.3: Eau absorbée par unité de surface en fonction du temps pour la formulation à base de fibre d'acier	66
Figure V.4: Eau absorbé par unité de surface en fonction du temps pour la formulation à base de fibre de cuivre	67
Figure V.5: Eau absorbé par unité de surface en fonction du temps pour la formulation à base de fibre d'aluminium	68
Figure V.6: Variation de la perte de masse pour les différents types des bétons en fonction de temps d'immersion dans 5% de H ₂ SO ₄	70
Figure V.7: Variation de la perte de masse pour les différents types des bétons en fonction de temps d'immersion dans 5% HCl	72
Figure V.8: Variation de la perte de masse pour les différents types des bétons en fonction de temps d'immersion dans 5% CH ₃ COOH	73
Figure V.9: Variation de la perte de masse pour les différents types des bétons en fonction de du temps d'immersion dans 5% NaOH	

Liste des tableaux**Chapitre I: Etat de connaissance**

Tableau I.1: Les avantages des bétons de sable	11
Tableau I.2: Les inconvénients des bétons de sable	12

Chapitre II: Caractérisation des matériaux

Tableau II.1: Composition chimique et minéralogique du ciment	28
Tableau II.2: Caractéristiques physiques du ciment	28
Tableau II.3: Caractéristiques mécaniques du ciment	28
Tableau II.4: Propriétés physiques du sable	29
Tableau II.5: Propriétés chimiques du sable	30
Tableau II.6: Densités des fibres recyclées	33
Tableau II.7: Propriétés mécaniques et chimiques des fibres recyclées	33
Tableau II.8: Propriétés de l'adjuvant	34
Tableau II.9: Analyse chimique de l'eau de gâchage	

Chapitre III: Programme expérimental et méthodologie d'essais

Tableau III.1: Différentes compositions utilisées dans l'étude	38
Tableau III.2: Différentes compositions utilisées dans l'étude	38

Introduction générale

Introduction générale

Le béton de sable est un béton fin constitué par mélange de sable, de ciment, d'addition et d'eau; outre ces composants de base, le béton de sable comporte habituellement un ou plusieurs adjuvants. Ils ont donc les mêmes dosages en ciment que les bétons traditionnels, la compacité est atteinte par un ajout complémentaire de fines généralement calcaires. L'introduction des fibres dans ce type de béton conduit à améliorer la ductilité et limiter les différentes formes de fissuration et rend le béton plus résistant.

L'usinage des aciers, aciers inoxydables, fontes, aluminiums et pièces métalliques est toujours accompagné par des rebuts ou chutes ou des résidus solides se forme de copeaux ou de grains qui ont une incidence directe sur l'environnement et qui sont souvent enterrés dans des décharges.

Les usines et les ateliers de forgeage, de tournage des métaux ferreux (acier, fonte, fer...) et non ferreux (aluminium, cuivre et nickel ..) produits des quantités importantes des déchets et sous-produits. La gestion de ces déchets pose actuellement une problématique en raison d'un manque d'installations de collecte et de recyclage de ce type de déchets.

Le stockage de tels déchets dans les dépôts favorise la pollution de l'air et la contamination des sources d'eau et des terrains agricoles, il est donc nécessaire pour éliminer ces produits de les valoriser et de les réutiliser de nouveau.

L'utilisation de fibres, et plus particulièrement de fibres issues de déchets, comme éléments de renfort dans les matériaux de construction, présente de nombreux avantages. Tout d'abord, elle permet de valoriser une ressource locale souvent abondante et disponible à un coût bien inférieur à celui des fibres synthétiques ou artificielles. Cette approche contribue ainsi à réduire les dépenses liées à l'approvisionnement en matières premières tout en stimulant les filières locales de récupération et de transformation.

Sur le plan environnemental, l'intégration de ces fibres dans les matériaux composites permet de limiter l'empreinte écologique par rapport aux composites conventionnels, dont la fabrication est souvent énergivore et fortement émettrice de gaz à effet de serre. En outre, la réutilisation de ces déchets offre une double contribution:

-La récupération de matières qui, autrement, seraient mises en décharge ou incinérées, générant ainsi une perte de ressource et des impacts environnementaux négatifs,

-La réduction de l'exploitation des ressources naturelles en diminuant la demande en matériaux vierges, ce qui permet de préserver les réserves limitées de matières premières et de limiter la dégradation des écosystèmes.

Ainsi, la valorisation des fibres recyclées s'inscrit pleinement dans une démarche d'économie circulaire, alliant performance technique, rentabilité économique et protection de l'environnement.

Cette étude s'inscrit dans ce contexte et a pour objectif de valoriser les déchets issus du forgeage en les réutilisant sous forme de fibres dans la formulation d'un béton de sable. L'idée est de transformer ces résidus métalliques, souvent considérés comme des rebuts industriels, en un renfort potentiel pour améliorer les performances mécaniques et durables du

matériau. La problématique centrale qui se pose est la suivante: l'incorporation de ce type de fibres métalliques issues du forgeage peut-elle apporter des améliorations significatives aux propriétés du béton de sable, tant à l'état frais qu'à l'état durci? Plus précisément, il s'agit d'évaluer leur impact sur la résistance mécanique, la durabilité, la maniabilité ainsi que sur la résistance aux fissurations, tout en considérant les aspects économiques et environnementaux liés à leur utilisation.

Pour réaliser ce travail, nous avons réutilisé les déchets industriels provenant des ateliers de forgeron et en particulier les déchets de sciage des pièces en acier, en cuivre et en aluminium par des machines comme fibres renforcées un béton de sable avec des taux de 0.4%, 0.8% et 1.2% et étudier leur impact sur les propriétés à l'état frais, durci et sur sa durabilité.

La présente thèse est structurée en cinq chapitres, organisés de manière à présenter de façon progressive et cohérente l'ensemble du travail de recherche mené:

Dans le premier chapitre, nous présenterons une revue bibliographique consacrée au béton de sable. Dans un premier temps, nous examinerons sa composition et sa formulation, en précisant les différents constituants, leurs proportions ainsi que les principales méthodes de fabrication. Nous aborderons ensuite ses propriétés à l'état frais (ouvrabilité, densité, teneur en air occlus) et à l'état durci (résistances mécaniques et durabilité). Enfin, nous passerons en revue ses domaines d'application dans le bâtiment et les travaux publics, en mettant en évidence ses atouts et ses limites par rapport aux bétons conventionnels.

Une attention particulière sera portée aux fibres employées comme matériaux de renforcement dans le béton, qu'elles soient métalliques, synthétiques, minérales ou naturelles. Cette section mettra également en relief les principaux travaux de recherche réalisés dans ce domaine, en synthétisant les résultats obtenus et les conclusions majeures.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons de manière détaillée l'ensemble des matériaux utilisés ainsi que les caractéristiques spécifiques de chacun des constituants entrant dans la composition des différentes formulations élaborées pour nos essais expérimentaux. Les matériaux étudiés comprennent: le ciment, principal liant hydraulique assurant la cohésion du béton; le sable, utilisé comme granulats fins; les fines calcaires, jouant un rôle de filler minéral; les fibres métalliques issues des déchets de forge (acier, aluminium et cuivre), intégrées comme renforts; l'adjuvant de type superplastifiant, destiné à améliorer l'ouvrabilité et les performances mécaniques; ainsi que l'eau, élément indispensable au déclenchement des réactions d'hydratation du ciment. Chacun de ces composants fera l'objet d'une description approfondie, en mettant en évidence son rôle dans la formulation, ses propriétés physiques et chimiques, ainsi que son influence sur le comportement global du béton de sable renforcé par fibres.

Dans le chapitre trois, nous présentons de manière structurée le programme expérimental mis en place, ainsi que la méthode de formulation adoptée pour sa réalisation. Nous commencerons par détailler les différentes étapes de conception de notre plan d'expérimentation, en précisant les choix méthodologiques retenus et leur justification scientifique. Nous décrirons ensuite, de façon approfondie, l'ensemble des méthodes d'essais mises en œuvre sur les échantillons, en explicitant pour chacune d'elles les normes de référence, les conditions de réalisation, ainsi que les instruments et dispositifs utilisés.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons une analyse détaillée et systématique des résultats obtenus lors de l'évaluation expérimentale du béton de sable. L'étude sera conduite en deux grandes étapes: l'examen des propriétés à l'état frais, suivi de l'évaluation des performances mécaniques à l'état durci. Dans un premier temps, l'analyse portera sur les caractéristiques à l'état frais, à savoir la densité et l'ouvrabilité. Dans un second temps, nous nous intéresserons aux performances mécaniques à l'état durci, la résistance à la compression, la résistance en traction par flexion, la résistance mesurée au scléromètre, méthode non destructive donnant une estimation rapide de la dureté en surface et de la qualité globale du matériau, la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques et le module d'élasticité.

Dans le chapitre cinq, nous présenterons de manière détaillée les résultats obtenus lors des essais de durabilité réalisés sur les différents échantillons de béton de sable. L'objectif principal est d'analyser l'influence combinée du taux d'incorporation et du type de fibres recyclées utilisées à savoir les fibres d'acier, de cuivre et d'aluminium sur les principaux paramètres de durabilité de ce matériau.

Nous évaluerons notamment l'absorption d'eau par immersion et par capillarité, ainsi que la porosité accessible à l'eau, qui constituent des indicateurs essentiels de la compacité et de la résistance du béton face aux agents dégradants.

Par ailleurs, une étude approfondie de la résistance aux attaques chimiques sera menée. Les échantillons seront soumis à différents milieux agressifs, comprenant des solutions acides (acide chlorhydrique HCL, acide sulfurique H₂SO₄, acide acétique CH₃COOH) et basiques (hydroxyde de sodium NaOH). L'impact de ces environnements corrosifs sur l'intégrité physique et mécanique du béton de sable renforcé par fibres recyclées sera analysé, afin de déterminer la capacité du matériau à conserver ses performances au fil du temps et dans des conditions sévères.

Ce travail termine par une conclusion générale dans laquelle sont exposés et analysés les principaux résultats obtenus au cours de l'étude. Cette partie met en évidence les apports essentiels de la recherche, en soulignant les tendances observées et les performances mesurées. Elle présente également les domaines potentiels d'application des bétons de sable renforcés par des fibres recyclées, en tenant compte de leurs caractéristiques mécaniques et de durabilité. Enfin, des recommandations sont formulées afin d'orienter les perspectives de recherche future et d'optimiser l'utilisation pratique de ce matériau, que ce soit dans un cadre expérimental, industriel ou environnemental.

Chapitre I:
Etat de connaissance

I. Etat de connaissance

I.1. Introduction

Le béton de sable, également appelé béton sans gros granulats, est un matériau composé principalement de sable, de liant, d'eau et éventuellement d'adjuvants et de fibres, conçu pour répondre à des exigences spécifiques en termes de finesse et de compacité (**Kadri 2013**). Ce type de béton se caractérise par l'absence de granulats grossiers, ce qui permet d'obtenir une pâte homogène, facile à mettre en œuvre, notamment dans les éléments minces et préfabriqués (**Ben Kahla 2015**).

L'introduction de fibres recyclées et en particulier les fibres de déchets industriels dans la composition de ce type de matériaux peut améliorer considérablement ses performances mécaniques, l'adhérence entre la matrice/granulats et augmenter sa ductilité d'une part et réduire les impacts environnementaux d'autre part.

Dans ce chapitre, nous présenterons une revue bibliographique consacrée au béton de sable. Nous examinerons dans un premier temps sa composition et sa formulation, en détaillant les constituants utilisés, leurs proportions ainsi que les méthodes courantes d'élaboration. Nous analyserons ensuite ses propriétés à l'état frais (ouvrabilité, densité, air occlus) et à l'état durci (résistance mécanique et durabilité). Enfin, nous évoquerons ses domaines d'application dans le secteur du bâtiment et des travaux publics, en soulignant ses avantages et limites par rapport aux bétons traditionnels.

Par ailleurs, une attention particulière sera accordée aux fibres utilisées comme matériaux de renforcement dans le béton, qu'elles soient d'origine métallique, synthétique, minérale ou naturelle.

Cette partie mettra également en lumière les travaux de recherche antérieurs, en synthétisant les résultats obtenus.

I.2. Béton de sable

I.2.1. Introduction

Le béton de sable est un matériau composite obtenu par le mélange de ciment, de sable à granulométrie fine, d'eau et éventuellement d'adjuvants, sans incorporation de granulats grossiers tels que le gravier (**Maza 2016; Abi Farraj 2020**). Contrairement au béton traditionnel, qui comporte à la fois du sable et des gravillons, le béton de sable est caractérisé par une formulation exclusivement à base de fines particules minérales.

L'absence de gros granulats confère à ce type de béton une texture homogène, une meilleure maniabilité et une grande facilité de mise en œuvre, notamment dans des ouvrages aux formes complexes ou de faibles épaisseurs. Il est souvent utilisé dans des applications telles que la fabrication de produits préfabriqués (bordures, dalles minces), les couches de surface décoratives, ou encore pour des éléments architecturaux où une finition soignée est requise (**Abi Farraj 2020**).

Du point de vue des performances mécaniques, le béton de sable présente une résistance généralement inférieure à celle des bétons classiques, en raison de l'absence de squelettes

granulaires grossiers. Cependant, sa compacité et sa faible porosité peuvent offrir une durabilité satisfaisante, notamment dans des environnements modérément agressifs. Son comportement peut être amélioré par l'ajout d'adjuvants spécifiques ou de fibres.

I.2.2. Composition de béton de sable

La composition repose essentiellement sur un mélange de sable, de liant hydraulique (souvent du ciment), de fines (généralement des fines calcaires), d'eau et éventuellement d'adjuvants pour ajuster ses propriétés rhéologiques (**Kadri 2013**).

La courbe granulométrique du sable est un facteur clé influençant les performances du béton de sable. Une distribution équilibrée des tailles de grains favorise une compacité optimale et limite la porosité (**Ben Kahla 2015**). L'incorporation de fines, comme les fillers calcaires ou la fumée de silice, contribue à densifier la matrice et à en améliorer la cohésion, ce qui réduit les risques de ségrégation et augmente les performances mécaniques (**Kadri 2013**).

Le béton de sable est constitué essentiellement de:

- Ciment**, généralement du ciment Portland, servant de liant hydraulique,
- Sable fin**, constituant principal, souvent du sable de dune ou du sable concassé, utilisé pour sa disponibilité locale,
- Fine calcaire**, ajout minéral permettant d'améliorer la compacité du squelette granulaire, la rhéologie du béton à l'état frais ainsi que certaines propriétés mécaniques à l'état durci ,
- Adjuvants**, tels que des superplastifiants, pour améliorer les propriétés à l'état frais et durci,
- Eau**, indispensable pour l'hydratation du ciment et la maniabilité du mélange.

I.2.3. Propriétés du béton de sable

I.2.3.1. Propriétés à l'état frais

a. Ouvrabilité

Le béton de sable se distingue par une ouvrabilité généralement excellente, principalement en raison de la finesse de sa composition granulaire. Cette caractéristique facilite considérablement sa mise en œuvre, notamment dans les situations où le coffrage présente des formes complexes ou lorsque l'armature est dense.

Grâce à sa fluidité et à sa capacité à bien enrober les aciers sans ségrégation, il s'impose comme une solution idéale pour les ouvrages nécessitant une grande précision de remplissage et une bonne compacité, tout en réduisant les efforts de vibration lors du coulage (**ASMTCM 2014**).

L'ouvrabilité peut être effectuée par l'utilisation du cône d'Abrams (figure I.1) conforme à la norme NF P18-451.



Figure I.1: Cône d'Abrams

b. Densité

La masse volumique à l'état frais du béton de sable varie généralement entre 2000 et 2200 kg/m^3 , en fonction de la densité des matériaux utilisés, notamment le type de ciment, la granulométrie du sable et la teneur en eau. Cette plage de valeurs reflète les variations possibles selon les formulations et les proportions des constituants (**Ben Kahla 2015**). La mesure de la densité est effectuée conformément aux prescriptions de la norme (NF EN 1015-6) par la mesure des poids (figure I.2).



Figure I.2: Densité a l'état frais

c. Teneur en air occlus

Le béton de sable peut présenter un taux d'air occlus légèrement supérieur à celui des bétons traditionnels, notamment en raison de l'absence de gros granulats, ce qui peut avoir un impact sur sa durabilité et ses propriétés mécaniques (**Ben Kahla 2015**). La teneur en air occlus est mesurée par l'utilisation de l'aéromètre (figure I.3) conforme à la norme NF P18-583.



Figure I.3: Aéromètre a béton

I.2.3.2. Propriétés à l'état durci

a. Masse volumique

La masse volumique du béton de sable durci varie en fonction des matériaux constitutifs. Elle se situe généralement entre 2000 et 2400 kg/m³, mais peut être modifiée par l'emploi de composants spécifiques, notamment des matériaux légers ou recyclés.

b. Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton de sable peut être comparable à celle du béton traditionnel, à condition de bien contrôler le dosage et la courbe granulométrique. L'emploi de sable de dunes, associé à des adjuvants adaptés, permet d'atteindre des résistances à la compression pouvant aller jusqu'à 40 MPa. La résistance à la compression est déterminée à partir des essais de rupture par la machine de compression (figure I.4) réalisés sur des éprouvettes cylindriques ou cubiques après 28 jours de cure selon la norme NF EN 12390-3.



Figure I.4: Machine pour l'essai de compression

c. Résistance à la flexion

Cette caractéristique est fortement influencée par la nature du sable utilisé ainsi que par la présence éventuelle de fibres dans le mélange. L'ajout de fibres métalliques renforce significativement cette résistance, pouvant l'élever jusqu'à 5 MPa. La résistance en traction par flexion est obtenue par la rupture en flexion d'une éprouvette de dimension $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ à l'aide d'une machine de traction par flexion (figure I.5) conforme à la norme NF EN 12390-4.



Figure I.5: Machine de traction par flexion

d. Autre propriétés

- Le module d'élasticité du béton de sable est généralement plus faible que celui du béton traditionnel, principalement en raison de l'absence de granulats grossiers rigides qui contribuent habituellement à la rigidité du matériau (**Boulekbache 2009**).
- Grâce à la faible présence de pores inter-granulaires, le béton de sable présente généralement une perméabilité réduite, ce qui contribue positivement à sa durabilité (**Kadri 2013**).
- En raison de sa compacité, le béton de sable présente une bonne résistance au gel, particulièrement lorsqu'il est renforcé par des fibres (**Ben Kahla 2015**).
- La densité élevée de la matrice, combinée à une porosité réduite, renforce sa résistance face aux agents agressifs tels que les chlorures et les sulfates (**Boulekbache 2009**).

I.2.4. Approche de la formulation

La formulation du béton de sable est basé sur la méthode SABLOCRETE (**Sablocrete 1994**), et les indications de la norme NF 18-305 béton prêt à l'emploi. Dans son ouvrage; SABLOCRETE propose deux types d'approche:

- Une approche théorique qui constitue une base de formulation de béton de sable,

-Une approche expérimentale basée sur la réalisation de plusieurs gâchées successives afin d'optimiser les dosages.

La conception du béton de sable repose sur des principes analogues à ceux des bétons classiques, à la différence qu'elle exclut les granulats grossiers. Cette spécificité nécessite une attention particulière à la granulométrie du sable, à la compacité du mélange et à l'interaction entre les constituants, afin d'assurer les performances mécaniques et la durabilité souhaitées.

Les principes de formulation:

***Optimisation de la compacité:** l'objectif est de réduire au maximum les vides intergranulaires pour renforcer la résistance et limiter la perméabilité,

***Réduction de la porosité:** une matrice dense limite la pénétration des agents agressifs et améliore la durabilité,

***Atteinte des performances mécaniques cibles:** notamment la résistance à la compression, mais aussi les propriétés élastiques ou la résistance à la fissuration,

***Bonne ouvrabilité:** essentielle pour les ouvrages complexes ou fortement armés, sans compromettre la cohésion du mélange.

I.2.5. Avantage et inconvénients des bétons de sable

Dans le tableau I.1, on récapitule les avantages des bétons de sable.

Tableau I.1: Les avantages des bétons de sable	
Avantage	Description
Bonne ouvrabilité	Sa finesse granulaire le rend facile à mettre en œuvre, même dans les zones complexes.
Haute compacité	L'absence de gros granulats permet un bon remplissage des vides et une matrice dense.
Faible perméabilité	Moins de porosité inter-granulaire, donc meilleure durabilité face à l'eau et aux agents agressifs.
Excellente finition de surface	Texture lisse, idéale pour les bétons apparents ou les éléments esthétiques.
Bon comportement au gel	Surtout lorsqu'il est fibré, il présente une bonne résistance au gel/dégel.
Adapté aux éléments fins et armés	Idéal pour les éléments minces ou fortement ferrailés.
Utilisation de sables locaux	Permet la valorisation de sables naturels disponibles (ex. : sables de dunes).
Réduction de la consommation de granulats	Moins de pression sur les ressources en granulats grossiers.

Dans le tableau I.2, on présente les inconvénients des bétons de sable.

Tableau I.2: Les inconvénients des bétons de sable

Inconvénient	Description
Résistance mécanique parfois limitée	Peut être inférieure au béton traditionnel si la formulation est mal maîtrisée.
Module d'élasticité plus faible	Moins rigide que le béton classique, ce qui peut poser problème pour certaines structures.
Retrait plus élevé	Tendance au retrait plus prononcé, surtout en l'absence de fibres ou de bons adjuvants.
Dosage plus délicat	Exige une maîtrise fine de la courbe granulométrique et des ajouts (fillers, fibres).
Durabilité dépendante des matériaux utilisés	Qualité du sable, adjuvants et liant influencent fortement les performances.
Moins adapté aux ouvrages massifs	Plus indiqué pour les éléments fins ou de petite section.

I.2.6. Utilisations

Le béton de sable trouve des applications variées, allant du secteur du bâtiment à celui du génie civil, grâce à ses atouts techniques et économiques. Ses propriétés particulières en font un matériau bien adapté à de nombreux usages.

- Fabrications des éléments préfabriqués en béton mince comme des panneaux de façade, tuiles, bordures, éléments décoratifs (**Feraille et Baroth, 2004**),
- Réalisation de chapes et de revêtements de sol dans les bâtiments, notamment pour les ateliers, les trottoirs et les garages (**Neville 2012**),
- Réparation des structures en béton par injection dans les fissures ou remplacement des zones endommagées (**ACI 546R-14**),
- Coulage de béton dans des moules de formes complexes pour la réalisation d'éléments architecturaux moulés, tels que des ornements ou des colonnes décoratives,
- Travaux de stabilisation et de comblement, utilisant des bétons maigres pour renforcer les sols ou pour le remblaiement de cavités.

I.3. Différent types de fibres utilisées dans les matériaux de construction

I.3.1. Introduction

L'utilisation des fibres dans les matériaux de construction ne date pas d'hier: elle remonte à plusieurs millénaires. Déjà dans l'Antiquité, des fibres naturelles telles que la paille étaient incorporées à des briques en terre crue afin d'améliorer leur cohésion et leur résistance. Ce principe ancestral constitue l'une des premières formes de renforcement de matériaux composites, et inspire aujourd'hui encore les recherches contemporaines sur les bétons renforcés et autres matériaux innovants. Les avancées modernes s'appuient ainsi sur ces savoirs empiriques pour développer des composites plus performants, en intégrant non

seulement des fibres naturelles, mais aussi des fibres synthétiques ou métalliques aux propriétés mécaniques optimisées (**Setra-LCPC 2007**).

Les études les plus récentes se sont intéressées au renforcement du béton de sable par l'ajout de fibres, visant à créer une synergie entre rigidité, ténacité et résistance après fissuration (**Ben Kahla 2015**). L'incorporation de fibres dans le béton de sable vise également à améliorer la compacité du matériau et à optimiser la répartition des contraintes internes, notamment dans les ouvrages de génie civil léger ou les éléments préfabriqués (**Boulekbache 2009**).

Dans une démarche de développement durable, l'utilisation de fibres industrielles issues de la forgerie a été envisagée comme solution innovante pour le renforcement du béton de sable. Ces fibres, peuvent être valorisées dans le cadre d'une économie circulaire, leur intégration permet d'améliorer les propriétés mécaniques d'une part et de réduire son impact environnemental, en limitant l'extraction de matières premières vierges et en diminuant la quantité de déchets industriels mis en décharge d'autre part.

I.3.2. Différents types de fibres

Les fibres incorporées dans les matériaux de construction se répartissent généralement en trois grandes catégories selon leur origine: fibres métalliques, synthétiques et naturelles. Chaque type possède des propriétés mécaniques distinctes et répond à des usages spécifiques dans le domaine du génie civil.

I.3.2.1. Fibres métalliques

Ce groupe de fibres, englobant principalement les fibres d'acier et les fibres issues de la fonte amorphe, fait l'objet de recherches approfondies et continues à l'échelle mondiale en raison de ses performances remarquables dans les matériaux composites cimentaires. Toutefois, l'accent est généralement mis sur les fibres d'acier (figure I.6), qui demeurent les plus répandues et les plus utilisées dans les applications de génie civil.

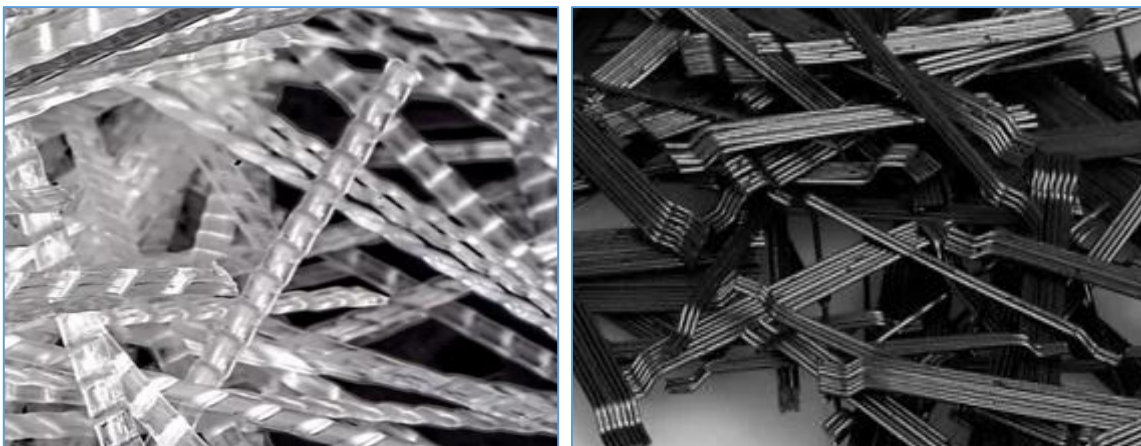


Figure I.6: Fibres d'acier (**Sika Belgium**)

Leur popularité s'explique par leur capacité à améliorer significativement les propriétés mécaniques du béton, notamment en termes de résistance à la traction, de ductilité, de ténacité et de comportement post-fissuration. Ces améliorations dépendent en grande partie de la qualité de l'interface fibre-matrice, plus précisément de la résistance d'adhésion interrassiale,

qui conditionne l'efficacité du transfert des contraintes entre la fibre et la matrice cimentaire (Ben Kahla 2015).

I.3.2.2. Fibres synthétiques

Le polypropylène, un polymère cristallisable appartenant à la famille des polyoléfines, s'est largement développé dans le domaine des matériaux en raison de ses propriétés avantageuses, telles qu'une grande capacité de déformation, une résistance à la putréfaction et de bonnes performances en traction.

Les fibres de polypropylène, généralement longues (entre 30 et 60 mm) et légères, présentent une bonne résistance à l'environnement alcalin du ciment, ce qui les rend stables dans le béton. En raison de leur module d'élasticité inférieur à celui de la pâte de ciment durcie, elles sont particulièrement adaptées au renforcement des éléments minces exposés à des ambiances agressives où l'acier risquerait de se corroder rapidement, ou soumis à des sollicitations mécaniques telles que les chocs (Kadri 2013).

Les avantages des fibres synthétiques (figure I.7) sont:

- Augmente la résistance à la flexion et à la traction,
- Augmente la résistance aux chocs,
- Augmente la durabilité,
- Réduit les risques de fissures de retrait plastique,
- Réduit la déformation plastique,
- Réduit l'efflorescence du béton,
- Alternative au réseau de lutte contre les fissures.



Figure I.7: Fibres synthétiques (Sika Belgium)

I.3.2.3. Fibres naturelles

L'utilisation des fibres naturelles (figure I.8), et en particulier des fibres végétales, comme renfort de matériaux composites présente plusieurs avantages. Tout d'abord, leur utilisation permet de valoriser une ressource locale, elles sont souvent disponibles à faible coût par rapport aux fibres synthétiques ou artificielles. D'autre part, la valorisation de ces fibres végétales dans les matériaux composites permet de réduire les impacts environnementaux par rapport à des composites conventionnels puisque ce sont des matières premières

renouvelables, biodégradables, ayant un bilan carbone neutre et demandant une faible quantité d'énergie pour leur production (**Page 2017; Bourgeois 2011**).

Plusieurs types de fibres ont été utilisés comme renfort dans plusieurs matériaux composite (fibres de lin, fibre de palmier, fibres de coco, fibres de sisal, fibres Alfa, fibres de Diss,...ect).

- Fibres de coco et de sisal pour améliorer les résistances mécaniques et la déformabilité des mortiers et l'adhérence (**Djohore et al., 2018; Romildo et al., 2000**),

-Fibres de lin pour augmenter la résistance en traction (**Page et al., 2015**),

-Fibres de chanvre et chènevotte qui peut être efficaces dans certaines propriétés, comme le retrait, le comportement sous élévation de la température et dans des milieux agressifs (**Gharibi 2015**),

- Fibres Alfa améliorent la résistance à la traction du béton et réduisent la propagation de fissuration, particulièrement au début de leur apparition (**Khelifa 2017**),

-Les fibres de palmier peuvent être intégrées aux mortiers afin d'en améliorer certaines propriétés. Utilisées comme éléments de renforcement, elles contribuent à accroître la résistance mécanique et la durabilité du matériau, tout en présentant des atouts intéressants sur le plan du développement durable, notamment par la réduction de la consommation énergétique (**kriker 2005; Abdelouahed et al., 2023**).

- Les fibres de jute atténue la fragilité de la matrice en flexion et le composite parait plus ductile (**Menadi et al, 2013**)

-Les fibres de Diss ont le rôle principal de reprendre les efforts et d'augmenter la ductilité du composite et permettent également de contrôler la propagation des fissures et de retarder la rupture finale du matériau par dissipation de l'énergie excédentaire. Les composites a base de fibres présentent l'avantage d'avoir une masse volumique réduite et des conductibilités thermiques inférieures (**Merzoud 2007**).



Figure I.8: Plantes et fibres naturelles

I.3.2.4. Fibres de déchets de forgeries

Les déchets issus du processus de forge, communément appelés scories ou résidus de forge, sont des sous-produits générés lors des opérations de transformation du fer et de l'acier, notamment par forgeage. Ces résidus comprennent principalement des scories; composées de mélanges d'oxydes métalliques, de silicates et d'autres composés minéraux ainsi que des fragments métalliques de tailles et de formes variées, résultant de la découpe, de l'ébarbage, du martelage ou encore de l'élimination d'imperfections au cours de la fabrication.

En forge, les résidus métalliques générés au cours des opérations peuvent être regroupés en deux catégories principales selon leur composition chimique.

La première concerne les métaux ferreux (figure I.9), représentés notamment par l'acier, qui contient du fer comme élément prédominant et se caractérise par sa résistance mécanique élevée et sa large utilisation dans les pièces structurales. A l'acier il s'ajoute le fer et la fonte.

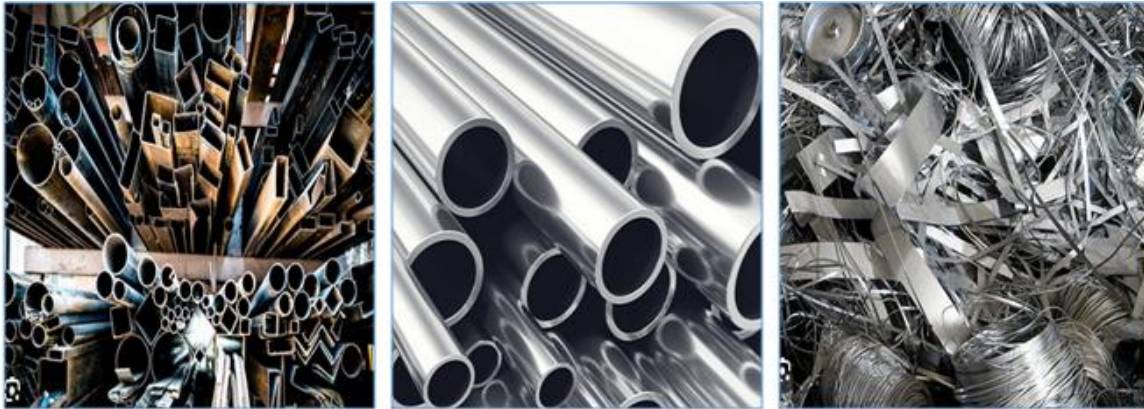


Figure I.9: Métaux ferreux

La seconde regroupe les métaux non ferreux (figure I.10), ce sont principalement l'aluminium, le cuivre, le plomb, le zinc, l'étain, le nickel et le chrome. Le cuivre, qui ne contiennent pas ou très peu de fer, et qui se distinguent par leurs propriétés spécifiques, comme une excellente conductivité thermique et électrique, ainsi qu'une bonne résistance à la corrosion.

Cette classification facilite la gestion, le recyclage et la valorisation des déchets métalliques, en orientant chaque type vers des filières de traitement adaptées (**Ghomari**).



Figure I.10: Métaux non ferreux

a. Déchets des métaux ferreux (acier)**-Chutes de fabrication**

Résidus métalliques produits lors des opérations de transformation de l'acier, telles que la découpe, le perçage, le fraisage, le limage ou le pliage (figure I.11). Ils peuvent se présenter sous forme de plaques, de bandes, de fragments ou de copeaux. Malgré leur statut de rebuts, ces matériaux conservent leurs propriétés mécaniques et peuvent être refondus ou recyclés, limitant ainsi le gaspillage de ressources.

-Copeaux d'usinage

Petites particules métalliques issues de l'usinage de pièces en acier à l'aide de machines-outils (tours, fraiseuses, perceuses, etc.). Leur taille, leur forme et leur aspect dépendent de la méthode employée et des paramètres de coupe. Bien que souvent souillés par des huiles ou lubrifiants, ces copeaux peuvent être nettoyés et recyclés pour fabriquer de nouveaux produits en acier.

-Pièces défectueuses ou rebutées

Éléments fabriqués en acier mais présentant des défauts dimensionnels, structurels ou esthétiques les rendant non conformes aux normes de production. Plutôt que d'être jetées, ces pièces peuvent être retravaillées ou refondues pour récupérer la matière première.

-Scories et laitier métallurgique

Sous-produits solides formés lors de la fusion ou du raffinage de l'acier, composés principalement d'oxydes métalliques et d'impuretés. Bien que non réutilisables directement comme métal, certaines scories peuvent être valorisées dans le secteur de la construction (granulats pour béton, matériaux routiers).



Figure I.11: Déchets d'acier

b. Déchets des métaux non ferreux (cuivre et aluminium)****Déchets de cuivre****-Chutes de fabrication**

Fragments ou bandes de cuivre générés lors des opérations de découpe, de poinçonnage, de pliage ou d'emboutissage. Le cuivre étant un métal coûteux et 100 % recyclable, ces chutes sont souvent collectées et fondues pour fabriquer de nouvelles pièces ou câbles (figure I.12).

-Copeaux et limailles

Particules issues de l'usinage de pièces en cuivre. Elles sont faciles à recycler mais nécessitent un tri rigoureux pour éviter la contamination avec d'autres métaux.

-Câbles et fils usagés

Déchets électriques composés de conducteurs en cuivre entourés d'isolants (PVC, caoutchouc, etc.). Après dépollution et séparation des matériaux, le cuivre peut être réutilisé dans la fabrication de nouveaux câbles ou composants électroniques.

-Pièces et composants obsolètes

Éléments en cuivre ou alliages de cuivre retirés de machines, d'installations électriques ou de systèmes de plomberie. Leur récupération contribue à réduire l'extraction minière et à préserver les ressources naturelles.



Figure I.12: Déchets de cuivre

**** Déchets d'aluminium**

Ils peuvent avoir diverses origines:

-Chutes et rebuts de production

Morceaux excédentaires issus des opérations de découpe, d'usinage ou de moulage dans l'industrie métallurgique ou la fabrication de pièces en aluminium (figure I.13).

-Matériels et équipements hors d'usage

Structures, pièces mécaniques, câbles, éléments de construction ou pièces automobiles arrivés en fin de vie.

-Emballages et contenants

Canettes, barquettes alimentaires, feuilles et films en aluminium utilisés dans le conditionnement.



Figure I.13: Déchets d'aluminium

Le recyclage des déchets ferreux et non ferreux est un processus essentiel qui joue un rôle majeur dans la préservation des ressources naturelles et la réduction de l'impact environnemental. Le recyclage des métaux ferreux et non ferreux s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire, où les matériaux sont continuellement réintégrés dans le cycle de production, contribuant à une industrie plus durable et responsable.

I.4. Valorisation des déchets comme fibres dans le béton de sable

Le béton de sable est devenu l'un des matériaux de construction concurrents du béton traditionnel en raison de ses propriétés mécaniques, physiques, thermiques et de sa durabilité. Il a été utilisé dans différents projets de construction, tels que les travaux souterrains, les barrages, les revêtements, les aéroports et les travaux routiers (**Fauteux et Fortin, 2002; Chauvin 1991**). De plus, il est également utilisé dans les travaux d'injection, la réhabilitation des bâtiments anciens et peut servir d'alternative au béton projeté (**Benaissa et al., 2008**). Cependant, ce type de béton présente encore certaines limitations qui suscitent l'intérêt des chercheurs, notamment les problèmes liés aux propriétés thermiques et acoustiques, ainsi que le problème de retrait, qui représente l'un des principaux obstacles pour le béton de sable, car

il est plus élevé que celui observé dans le béton traditionnel (**Fauteux et Fortin, 2002**). De plus, la résistance à la traction du béton de sable est souvent faible, ce qui entraîne une diminution de la résistance aux fissures.

De nombreuses études ont été menées pour rechercher des solutions économiques, écologiques et technologiques alternatives en vue de développer et d'améliorer les performances du béton de sable.

Le processus d'introduction de fibres recyclés dans la composition du béton est une nouvelle méthode et une solution efficace pour réduire les problèmes qui peuvent apparaître dans le béton de sable, cela dépend grandement de la géométrie et le type de ces fibres; telles que les fibres de verre, végétales, caoutchouc, métallique (ferreux et non ferreux), aramides et autres fibres industrielles, sa répartition à l'intérieur du béton est aléatoire, précise, discontinue, avec des longueurs et des géométries spécifiques (**Behbahani et Nematollahi, 2011**). Selon **Hannant 1978**, le béton renforcé par des fibres a une meilleure résistance à la traction en flexion que le béton ordinaire, tout en réduisant le retrait et les fissures résultantes.

Ammari et al., (2020), ont réalisé une étude sur le développement d'un nouveau béton de sable allégé à base de fibres hybrides: paille d'orge et fibres d'acier. L'objectif était d'améliorer les propriétés mécaniques en intégrant différentes proportions de fibres d'acier (0%, 0.5%, 1%, 1.5% et 2%) par rapport au volume. Le processus de renforcement a amélioré les propriétés physiques et mécaniques du béton, notamment la résistance à la compression, avec une légère augmentation de la conductivité thermique et de la densité, ainsi qu'une réduction notable du retrait et de la diffusion thermique.

L'effet des fibres de polypropylène et des fibres métalliques sur les propriétés du béton de sable a été étudié par **Melais et al., (2015)**. Les résultats ont montré une augmentation de la résistance à la compression et à la traction, ainsi qu'une amélioration de la cohésion et de la densité du béton. Une autre étude réalisée par **Ben Othman et al., (2016)** a conclu que le béton de sable renforcé par des fibres de polypropylène réduit légèrement les propriétés mécaniques, mais améliore considérablement le comportement de retrait. Une valeur optimale de 1% de ces fibres a été identifiée pour ce type de béton renforcé, destiné à la construction des trottoirs pour les routes à faible trafic.

Elrefaei et al., (2023) ont également mené une étude sur l'effet de l'utilisation de fibres métalliques pour renforcer les dalles en béton de sable, les résultats ont montré une amélioration de la résistance à la traction, de la dureté et de la ténacité après fissuration à une valeur optimale des fibres de 30 kg/m³. Une autre étude réalisée par **Ammari et al., (2020)** a évalué les effets des fibres hybrides à base de lignocellulose d'acier sur la durabilité du béton de sable. Les résultats ont montré que la profondeur de carbonatation diminue avec l'augmentation de la proportion de fibres d'acier. De plus, ces dernières contribuent à réduire la porosité du béton, ce qui se traduit par une diminution de l'absorption capillaire et de la porosité accessible à l'eau. Les fibres ont également un effet positif limité sur la résistance à la compression après des cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage, ainsi que sur la résistance aux milieux agressifs. Dans le même sens, des fibres végétales ont été utilisées dans le béton de sable afin d'améliorer ses performances thermiques, physiques et mécaniques réalisés par **Bederina et al., (2007)**; **Belhadj et al., (2014)**; **Bederina et al., (2009)**. Ils ont constaté que l'utilisation de fibres a donné de meilleurs résultats en termes de retrait, de diffusion thermique, de ténacité et de ductilité.

Dans le même contexte, le recyclage des déchets solides est une approche écologique durable et une source importante de matières premières pour diverses fibres qui peuvent être utilisées dans le béton. D'une part, la valorisation contribue à réduire l'impact de ces déchets sur l'environnement et la santé humaine, tout en réduisant la consommation de ressources naturelles et d'énergie (**Rihia et al., 2020**).

Parmi les déchets solides les plus répandus se trouvent les déchets métaux issus de la fabrication de l'acier, de l'inox, de la fonte et de différentes pièces métalliques, ainsi que l'aluminium, le cuivre, le nickel. Ces déchets se présentent sous forme de morceaux, de granules et de copeaux. En Algérie, l'industrie des produits métallique connaît un essor important, avec une production de 5 millions de tonnes de fer et d'acier en 2022. Cela correspond à une production de plus de 1.2 million de tonnes de différents déchets par an, avec un taux de récupération d'environ un tiers, soit environ 360 000 tonnes de déchets (**Business France 2017**). Ce qui pose de gros problèmes pour réduire leur impact sur l'environnement, compte tenu notamment du manque des dépôts de stockage approprié pour ce type de déchets.

Plusieurs études ont été menées sur la valorisation et le recyclage des déchets métalliques ferreux et non ferreux dans le béton et le mortier, sous forme de fibres de renforcement. Ces fibres améliorent la résistance mécanique, la résistance à la fatigue, aux chocs, à l'éclatement et à la corrosion, tout en réduisant la propagation des fissures dans le béton. Ces améliorations sont obtenues lorsque le pourcentage de renforcement est spécifié entre 1 et 2% du volume (**Roberto et al., 2020**).

Les déchets de cuivre font partie des déchets de métaux non ferreux, provenant principalement des usines de production ainsi que des travaux de réhabilitation électrique des bâtiments, des tuyaux d'eau et de chauffage. En raison de la nature anticorrosion et de la surface lisse des fibres de cuivre. **Ndruru et al., (2021)**, ont mené une recherche sur l'utilisation de déchets de fibres de cuivre provenant de câbles électroniques dans le béton utilisé pour les trottoirs. Ils ont introduit des proportions variables de 0%, 0.5%, 1% et 1.5% de fibres. Les résultats ont montré une augmentation de la résistance à la compression et à la traction du béton en fonction du pourcentage de fibres de déchets de cuivre. Pour remédier au problème des fissures dans le béton. **Mallikharjuna et Srinivasa, (2017)** ont réalisé une étude sur l'utilisation possible de fils de cuivre en tant que fibres. Ils ont utilisé des proportions de 0%, 0.5%, 1%, 1.5% et 2% du poids du ciment. Les résultats ont été encourageants, car la résistance du béton a augmenté et les fissures ont été réduites.

Nadhom et al., (2023), ont testé l'effet de l'utilisation de fibres de cuivre (issus de fils électriques endommagés) de différents diamètres sur le gypse pur. Ils ont enregistré une augmentation de la résistance à la compression lors de l'ajout de fibres de cuivre au mélange, en fonction de leur diamètre.

Un autre type de déchet métallique non ferreux est l'aluminium, qui se caractérise par sa faible densité, sa légèreté et sa résistance élevée à la corrosion par rapport à l'acier. Les déchets d'aluminium sont estimés à environ 17 millions de tonnes accumulées dans le monde, provenant des industries automobile, de la construction et de la métallerie dans les ateliers de forgeron en raison de sa facilité de recyclage. **Sabapathy et al., (2019)**, ont utilisé des fils électriques en aluminium comme fibres de renforcement pour le béton et ont étudié leur effet sur les propriétés mécaniques à des taux allant de 0% à 2%. Après 28 jours, les résultats des essais ont montré une amélioration relative de la résistance à la compression et à la traction en

fonction des proportions et de la forme des fibres utilisées. Dans le même sens, **Rajaraman, 2017**, a utilisé des fibres d'aluminium dans le béton en remplaçant différentes proportions de ciment et en analysant leur effet sur les propriétés mécaniques. Les résultats ont révélé une augmentation significative de la résistance à la compression et à la traction par rapport au béton de référence.

Mediyanto et al., (2019), ont étudié l'impact de l'introduction de fibres d'aluminium sur la résistance à la compression d'un béton allégé après exposition à haute température. Les résultats ont montré une amélioration de la résistance, avec un temps de récupération minimum de la résistance à la compression à 28 jours pour le béton léger fabriqué à partir de fibres d'aluminium, par rapport au béton de référence.

D'un autre côté, l'acier représente la grande majorité des déchets ferreux, cela est dû à son utilisation répandue dans divers domaines. Il est bien connu que ce type de déchet n'est pas biodégradable, mais il est recyclable et peut être utilisé sous forme de fibres dans le béton ou le mortier, d'autant plus qu'il se caractérise par sa résistance élevée à la compression et à la traction. Cela a été démontré par l'étude de **Kishore et al., 2019**, où l'utilisation de fibres d'acier dans le béton a entraîné une augmentation de la résistance à la compression et à la traction, avec un taux de 0.5% de fibres.

Dans l'étude de **Mello et al., 2014**, des fibres d'acier ont été ajoutées au béton avec d'autres fibres afin de déterminer leur impact sur les propriétés du composite. Les résultats ont montré une augmentation significative de la résistance à la compression et à la traction du béton par rapport aux autres mélanges. **Sarabi et al., (2017)**, ont réalisé une étude sur la réduction de la chaleur d'hydratation générée par l'eau, qui peut provoquer des contraintes thermiques entraînant des fissures dans le béton à masse volumique élevée, en utilisant des fibres de déchets d'acier tournées tout en réduisant la quantité de ciment. Les résultats ont montré une réduction des contraintes de la chaleur d'hydratation, ainsi qu'une augmentation de la résistance à la compression et à la traction avec un taux de 0.5% de fibres.

En se basant sur les études précédemment mentionnées, nous avons réalisé cette étude qui a pour but, la possibilité de réutiliser des déchets industriels provenant des ateliers de forgeron et en particulier les déchets de sciage des pièces en acier, en cuivre et en aluminium par des machines comme fibres renforcées un béton de sable.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons élaboré une banque de données complète sur les bétons de sable, en mettant particulièrement l'accent sur leur composition, les approches de formulation utilisées, ainsi que les différentes propriétés à l'état frais et durci. Nous y avons également recensé leurs avantages et inconvénients, en les comparant aux bétons traditionnels, ainsi que leurs domaines d'application dans le secteur de la construction.

Cette base d'informations constitue un outil de référence permettant non seulement de mieux comprendre le comportement des bétons de sable, mais aussi de guider les choix techniques en fonction des exigences de chaque projet, qu'il s'agisse de critères de performance mécanique, de durabilité, ou d'optimisation économique et environnementale.

Nous avons également mené une recherche approfondie sur les différents types de fibres utilisées dans le domaine de la construction, en mettant particulièrement l'accent sur l'intégration de fibres recyclées dans la formulation des bétons de sable.

Chapitre II:

Caractérisation des matériaux

II. Caractérisation des matériaux

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les matériaux et les caractéristiques des différents constituants utilisés dans les différentes formulations de nos essais expérimentaux, à savoir: le ciment, le sable, les fines calcaires, les fibres de déchets des forgerons (acier, aluminium, cuivre), l'adjuvant (super plastifiant) et l'eau.

II.2. Caractérisation des matériaux

Pour l'élaboration de différentes formulations nous avons utilisé des matériaux locaux dont les caractéristiques mécaniques et physiques ont été déterminées expérimentalement. Les matériaux utilisés sont:

- Ciment CPJ-CEMII/ A (S-L) 42.5, provenant de la cimenterie du groupe GICA de Hdjar soud-Skikda;
- Un sable de dune (SD) de classe 0/1 d'origine la sablière d'Oued Zhor-Skikda;
- Des fines calcaires recyclées (F) de la carrière de Ben Azzouz- Skikda;
- Des fibres des déchets industriels d'acier (FA), d'aluminium (FL) et de cuivre (FC) issu des ateliers des forgerons;
- Adjuvant superplastifiant (SP) haut réducteur d'eau de type Master Glenium 26;
- Eau de gâchage (E) du robinet du laboratoire de génie civil de l'université de Skikda.

II.2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude un CPJ-CEMII/ A (S-L) 42.5, provenant de la cimenterie du groupe GICA de Hdjar soud- Skikda (figure II.1).



Figure II.1: Ciment CPJ-CEMII/ A (S-L) 42.5, Hdjar soud- Skikda

Les essais effectués sur la poudre de ciment sont:

a. Densité

La densité absolue du ciment est de 3.08 g/cm^3 mesuré par un densimètre Le Chatelier en utilisant le toluène (figure II.2).



Figure II.2: Mesure de la densité du ciment

b. Surface spécifique de de Blaine

La **SSB** est de $3669 \text{ cm}^2/\text{g}$, a été mesuré par la méthode de perméabilité à l'air (figure II.3) conformément à la norme EN 196-1.



Figure II.3: Mesure de la finesse du ciment

c. Propriétés chimiques et minéralogiques

Les résultats des propriétés chimiques et minéralogiques sont mentionnés dans le tableau II.1. Ces propriétés sont mesurées par la méthode classique et la méthode de diffraction par rayon « X ». La composition minéralogique a été calculée par les équations de Bauge.

Tableau II.1: Composition chimique et minéralogique du ciment			
Composition	Teneur (%)	Composition	Teneur (%)
SiO ₂	20.41	Cl	<0.010
Al ₂ O ₃	4.77	Insoluble	0.80
Fe ₂ O ₃	2.95	P F	4.600
CaO	62.87	CO ₂	3.090
MgO	1.19	C3S	56.79
K ₂ O	0.84	C2S	11.47
Na ₂	0.11	C3A	5.85
SO ₃	2.02	C4AF	10.46
CaO libre	0.628	--	--

d. Les propriétés physiques

Les propriétés physiques du ciment sont présentées dans le tableau II.2.

Tableau II.2: Caractéristiques physiques du ciment		
Consistance normalisée	H ₂ O	27.0
Temps de prise	Début	210
	Fin	265
Stabilité	Froid	--
	Chaud	0.0

e. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques (résistance en traction par flexion et compression) sont obtenues par écrasement des éprouvettes en mortier normale de dimension 4x4x16 cm³, les résultats sont présentés dans le tableau II.3.

Tableau II.3: Caractéristiques mécaniques du ciment			
	Age en jours		
	2j	7j	28j
Résistance en compression en MPa	17.2	38	48
Résistance en traction par flexion en MPa	3.90	6.31	7.47

II.2.2. Sable

Le sable utilisé (figure II.4) est un sable de dune (SD) de classe 0/1, de nature roulée provenant du sablière d'Oued Zhor- Skikda. Les propriétés physiques mesurées par différents essais de caractérisations (figure II.5) sont représentées dans le tableau II.4.



Figure II.4: Sable de dune



Figure II.5: Essais de caractérisations effectués sur le sable

Tableau II.4: Propriétés physiques du sable

Masse volumique apparente (g/cm^3)	1.44
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.64
Coefficient d'absorption (%)	1
Valeur bleue de méthylène (%)	0.6
Module de finesse (%)	1.92
Equivalent de sable (%)	85
Quantité des fines (%)	0.82

Les résultats obtenus indiquent que le sable ordinaire présente des densités apparentes et absolues courantes et peuvent être utilisés comme un constituant dans la formulation des mélanges.

La valeur au bleu de méthylène est de 0.6 inférieure à 1.5 indique que le sable de dune est un sable à très faible pourcentage de fines argileuses. D'après ce résultat, nous pouvons déduire que ce sable est adéquat pour être utilisé dans nos essais.

L'essai de l'équivalent de sable est de 85% indique que le sable de dune utilisé est propre convenant parfaitement pour des mélanges à haute qualité.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont exprimés par la courbe d'analyse granulométrique de la figure II.6.

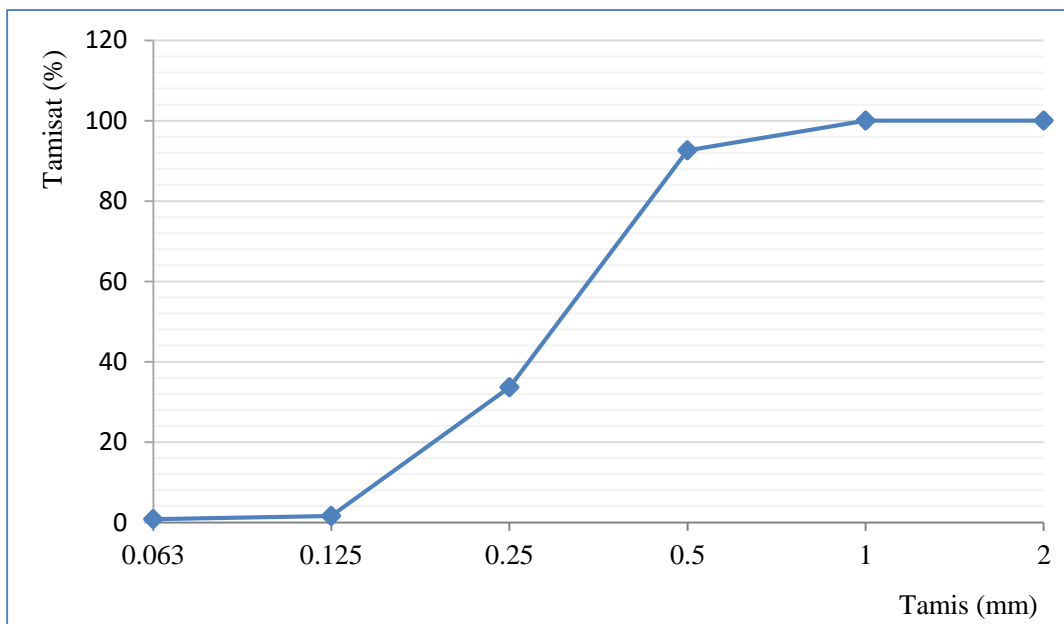


Figure II.6: Courbe granulométrique du sable

La granularité de ce sable est continue et le sable est à majorité de grain fin (Mf est de 1.92).

Les propriétés chimiques de ce sable sont données dans les tableaux II.5

Tableau II.5: Propriétés chimiques du sable			
Désignations	Teneurs (%)	Désignations	Teneurs (%)
CaO	7.23	Na ₂ O	0.13
Al ₂ O ₃	2.82	K ₂ O	0.71
Fe ₂ O ₃	1.91	SO ₃	0.01
SiO ₂	77.99	Na ₂ O	0.13
MgO	0.26	P.A.F	0.30

D'après les analyses chimiques, la teneur en silicium (SiO_2) est de 77.99%, donc le sable ordinaire est siliceux, selon la norme (NFP 18-011).

II.2.3. Fines calcaires

Les fines (**F**) utilisées dans cette étude sont des fines calcaires (figure II.7) récupérés des filtres de la carrière de Ben Azouz à l'est de l'Algérie, constitué à 95% de carbonate de calcium, plus de 70% passent à travers le tamis de 0.08 mm. Ces fines sont caractérisées par une couleur blanche et une densité absolue de 2.741 g/cm^3 .



Figure II.7: Fines calcaires

II.2.4. Fibres recyclées

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres de déchets d'acier, de cuivre et d'aluminium résultant des travaux d'ateliers de forgeron en particulier les déchets de sciage des pièces en acier, en cuivre et en aluminium par des machines (figure II.8).



a) Acier

c) Cuivre

b) Aluminium

Figure II.8: Déchets des forgerons

a. Préparation des fibres

Les fibres utilisées ont été obtenues à partir du sciage de différentes pièces métalliques dans les ateliers de forge. Elles se composent de deux types de fibres recyclées: les fibres des déchets de métaux ferreux, représentés par les fibres d'acier (FA), et les fibres des déchets de métaux non ferreux, représentés par les fibres de cuivre (FC) et d'aluminium (FL). Les déchets ont été récupérés, triés et découpés en longueurs spécifiques, comprises entre 2 et 3cm (figure II.9).



a) Fibres d'acier (FA)

b) Fibres de cuivre (FC)

c) Fibres d'aluminium (FL)

Figure II.9: Fibres recyclées

b. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue a été mesurée par un pycnomètre par mesure du poids de ce dernier plein et vide (figure II.10).



Figure II.10: Mesure de la densité ses fibres

Les résultats de cet essai sont donnés par le tableau II.6.

Tableau II.6: Densités des fibres recyclées

Désignations	Fibres d'acier FA	Fibres de cuivre FC	Fibres d'aluminium FL
Densité (g/cm ³)	7.980	9.270	2.490

c. Propriétés mécaniques et chimiques

Les propriétés mécaniques des différents types des fibres sont obtenues par traction dans la machine d'essai **Zwick/Roell** (figure II.11). Les fibres présentent des propriétés qui sont indiquées dans le tableau II.7.

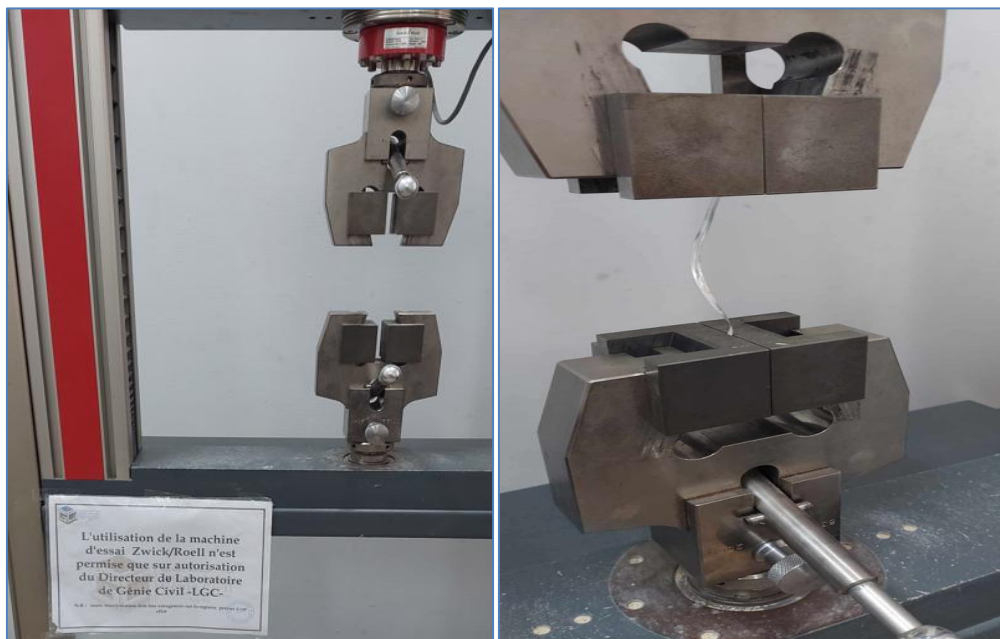


Figure II.11: Machine d'essai **Zwick/Roell**

Tableau II.7: Propriétés mécaniques et chimiques des fibres recyclées

Désignations	Fibres d'acier FA	Fibres de cuivre FC	Fibres d'aluminium FL
Résistance (MPa)	268.21	419.8	50.34
Allongement (mm)	3.74	17.75	8.48
Déformation	0.748	0.355	0.1696
Module de young (MPa)	358.57	1182.54	5.94
Fe	93%	--	--
Cu	--	≥ 99.90 %	--
AL	--	--	≥ 92 %

D'après les résultats de caractérisations des fibres recyclées, nous pouvons constater ce qui suit:

- Les fibres recyclées de cuivre et d'acier présentent les densités les plus élevées, ce qui signifie qu'elles sont plus lourdes et plus denses (**Elmsley 2001**), tandis que les fibres

recyclées d'aluminium ont la densité la plus faible. Les fibres d'aluminium rendent le béton plus léger.

- Les fibres recyclées de cuivre et d'acier ont des valeurs de contrainte plus élevées, avec des valeurs de 419.8MPa et 268.21MPa respectivement, par rapport aux fibres recyclées d'aluminium. Cela signifie que les fibres de cuivre et de l'acier peuvent supporter des charges plus élevées avant la déformation ou la rupture.
- La fibre recyclée de cuivre présente une valeur d'allongement plus élevée, ce qui indique qu'elle a une plus grande capacité à se déformer avant de se rompre. Plus l'allongement est élevé, plus la ductilité est élevée (**Mandel 1978**).
- Les fibres recyclées de cuivre et d'aciers ont une valeur élevée de module de Young, ce qui signifie qu'elles ont une rigidité plus élevée que les fibres d'aluminium.

II.2.5. Adjuvant (superplastifiant)

Le superplastifiant (SP) utilisé est le Master Glenium26. C'est un haut réducteur d'eau pour béton à faible rapport E/C. Il se présente sous la forme d'un liquide brun avec une densité de 1.08 g/cm³ (figure II.12) conforme à la norme NF EN 934-2, ces propriétés sont présentés dans le tableau II.8.



Figure II.12: Adjuvant Master Glenium 26

Tableau II.8: Propriétés de l'adjuvant	
Propriétés	Résultats
Couleur	Brun
Aspect	Liquide
Chlorures	< 0.01%
Taux des alcalins	< 2%
Densité à 25°C	1.08g/cm ³ ± 0.02
PH	7 ± 1
Plage de dosage recommandée	0.3 à 2% du poids de ciment

II.2.6. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée provient du robinet sa température est de 28C°. L'analyse chimique est représentée dans le tableau II.9, les résultats montrent qu'elle répond à toutes les prescriptions des normes NF P18-404.

Tableau II.9: Analyse chimique de l'eau de gâchage			
Paramètres	Résultat	Unité	Observation
T°	28	C°	Turbidité: 1,44ntu Eau de bonne qualité chimique
Ph	7.5	--	
Cl	0.1	Mg/l	
TDS	297	Mg/l	
Conductivité	541	Us/cm	
Salinité	0.2	--	

II.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné les principaux résultats des essais de caractérisation des différents matériaux constituant notre programme expérimental. Nous avons analysé les propriétés du sable ordinaire, le ciment, les fines calcaires, les fibres de déchets industriels (fibres en acier, en cuivre et aluminium), l'adjuvant et l'eau. D'après les résultats des essais de caractérisations nous concluons:

- Le sable de dune présente des densités apparentes et absolues courantes,
- Le sable de dune est un sable propre à faible pourcentage de fines, a majorité de grains fins et de granulométrie continue,
- Les fibres recyclées de cuivre et d'acier présentent les densités les plus élevées, ce qui signifie qu'elles sont plus lourdes et plus denses), tandis que les fibres recyclées d'aluminium ont la densité la plus faible, ils rendent le béton à base de ces fibres plus léger,
- Les fibres recyclées de cuivre et d'acier ont des valeurs de contrainte plus élevées, avec des valeurs de 419.8MPa et 268.21MPa respectivement, par rapport aux fibres d'aluminium. Cela signifie que les fibres de cuivre et de l'acier peuvent supporter des charges plus élevées avant la déformation ou la rupture,
- La fibre recyclée de cuivre présente une valeur d'allongement plus élevée, ce qui indique qu'elle a une plus grande capacité à se déformer avant de se rompre. Plus l'allongement est élevé, plus la ductilité est élevée,
- Les fibres recyclées de cuivre et d'aciers ont une valeur élevée de module de Young, ce qui signifie qu'elles ont une rigidité plus élevée que les fibres d'aluminium.

Chapitre III:

Programme expérimental et méthodologie d'essai

III. Programme expérimental et méthodologie d'essai

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous exposons le programme expérimental et la méthode de formulation utilisée pour exécuter notre programme. Par la suite une description détaillée des différentes méthodes d'essais appliquées sur l'ensemble du programme est présentée. Les paramètres fixes et variables et les méthodes de préparation des mélanges des bétons du sable seront également indiqués.

Le but de ce travail est de mettre en évidence l'influence de l'introduction des déchets d'acier, de cuivre et d'aluminium résultants des travaux d'ateliers de forgeron et à les réutiliser sous forme de fibres recyclées de renforcement dans le béton de sable.

Afin d'évaluer l'impact de ces fibres recyclées sur les propriétés du béton, nous les avons introduits à différentes proportions (0.4%, 0.8% et 1.2%). Ensuite, une série d'essais a été réalisée pour déterminer l'évolution des caractéristiques du béton à l'état frais (ouvrabilité et densité) et à l'état durci (résistance à la compression, traction par flexion, résistance en compression obtenue par scléromètre et la vitesse des ondes ultrasoniques). Ainsi, nous avons effectué des essais de durabilité du béton (coefficient d'absorption par immersion, par capillarité et la porosité accessible à l'eau). Enfin nous allons évaluer la vulnérabilité des mélanges obtenus, vis-à-vis les milieux agressifs (H_2SO_4 , HCL, CH_3COOH et NaOH) par la mesure de la perte en masse.

L'étude expérimentale a été réalisée au niveau du laboratoire national de l'habitat et de la construction LNHC de Skikda, ainsi qu'au laboratoire des matériaux de construction du département de génie de civil de l'université du 20 Août 1955 de Skikda.

III.2. Programme expérimental

L'objectif de ce travail est de réutiliser les déchets industriels provenant de forgeron (acier, cuivre et aluminium) comme fibres dans la composition d'un béton de sable. Le béton de sable de référence (B0%) sans fibres a été formulé par la méthode SABLOCRETE (**Sablocrete 1994**) décrit dans le chapitre I, et les indications de la norme [NF 18-305] béton prêt à l'emploi.

Les paramètres fixes sont:

- Le rapport E/C=0.68,
- La teneur en fine,
- La teneur en adjuvant.

Les paramètres variables sont:

Les fibres recyclés d'acier, cuivre et aluminium, avec des taux de 0.4%, 0.8% et 1.2% pour chaque type de fibres.

Dans le tableau III.1, on présente les différentes compositions utilisées dans le programme expérimental.

Tableau III.1: Différentes compositions utilisées dans l'étude	
Notation	Type de béton
B0%	Béton de sable à base de sable de référence sans fibres
BA0.4%	Béton de sable à base renforcé par 0.4% de fibres recyclés d'acier
BA0.8%	Béton de sable à base renforcé par 0.8% de fibres recyclés d'acier
BA1.2%	Béton de sable à base renforcé par 1.2% de fibres recyclés d'acier
BL0.4%	Béton de sable à base renforcé par 0.4% de fibres recyclés d'aluminium
BL0.8%	Béton de sable à base renforcé par 0.8% de fibres recyclés d'aluminium
BL1.2%	Béton de sable à base renforcé par 1.2% de fibres recyclés d'aluminium
BC0.4%	Béton de sable à base renforcé par 0.4% de fibres recyclés de cuivre
BC0.8%	Béton de sable à base renforcé par 0.8% de fibres recyclés de cuivre
BC1.2%	Béton de sable à base renforcé par 1.2% de fibres recyclés de cuivre

III.2.1. Formulation des mélanges

Les formulations retenues à base de fibres sont obtenue par l'introduction des fibres dans la masse du béton de la formulation de référence (B0%) avec des taux de 0.4%, 0.8% et 1.2% tout on conservant le même volume. Trois (03) formulations de base ont été obtenues:

- Béton de sable renforcé par des fibres recyclées d'acier (BA)
- Béton de sable renforcé par des fibres recyclées d'aluminium (BL)
- Béton de sable renforcé par des fibres recyclées de cuivre (BC)

Neuf (09) formulations ont été obtenues en totalité (tableau III.1).

Tableau III.2: Différentes compositions utilisées dans l'étude								
Type de béton	CEM II (g)	SD (g)	F (g)	SP (g)	E (g)	FA (g)	FC (g)	FL (g)
B0%	8934.82	25339.78	5628.94	82.71	6075.68	0	0	0
BA0.4%	8934.82	25116.47	5628.94	82.71	6075.68	675.00	0	0
BA0.8%	8934.82	24893.16	5628.94	82.71	6075.68	1350.00	0	0
BA1.2%	8934.82	24669.85	5628.94	82.71	6075.68	2025.00	0	0
BL0.4%	8934.82	25116.47	5628.94	82.71	6075.68	0	0	210.62
BL0.8%	8934.82	24893.16	5628.94	82.71	6075.68	0	0	421.24
BL1.2%	8934.82	24669.85	5628.94	82.71	6075.68	0	0	631.86
BC0.4%	8934.82	25116.47	5628.94	82.71	6075.68	0	784.12	0
BC0.8%	8934.82	24893.16	5628.94	82.71	6075.68	0	1568.24	0
BC1.2%	8934.82	24669.85	5628.94	82.71	6075.68	0	2352.35	0

a. Essais effectués sur mélange à l'état frais

- La densité ;
- L'ouvrabilité.

b. Essais effectués sur mélange à l'état durci

Les essais réalisés sur le béton de sable à l'état durci sont les suivants:

- Résistance en traction par flexion à 7, 28 et 90 jours;
- Résistance en compression à 7, 28 et 90 jours;
- Essai au scléromètre;
- Essai ultrasonique;
- Absorption d'eau par immersion ;
- Porosité accessible à l'eau;
- Absorption d'eau par capillarité;
- Attaques chimiques aux acides et bases (H_2SO_4 , HCL, CH_3COOH et NaOH) à 3, 7, 14, 21, 28, 56 et 90 jours.

III.3. La fabrication des mélanges

III.3.1. Le malaxage

Les mélanges de béton de sables ont été fabriqués à l'aide d'une bétonnière du laboratoire de Génie civil (figure III.1). Le volume de la cuve est de 132 L et le volume de malaxage est de 100 L. L'introduction des matériaux dans la cuve est sera comme suit:

- Sable;
- Fibres;
- Introduction du ciment et fines calcaires;
- Eau et adjuvant.



Figure III.1: Malaxeur des bétons

La durée de malaxage est fixée dans la norme NF P 18-404. Elle est de 60 secondes pour le malaxage à sec et 120 secondes pour malaxage humide.

III.3.2. Types des moules

Après le malaxage, les mélanges sont mis en place dans des moules normalisés en acier (figure III.2) permettant de réaliser les éprouvettes convenables aux essais programmés. Les différentes formes des moules sont:

- Cubiques, $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ pour l'essai de compression;
- Prismatiques, $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ pour l'essai de traction par flexion;

- Cubiques, 15x15x15 cm³ pour l'essai au scléromètre;
- Cubiques, 15x15x15 cm³ pour l'essai ultrasonique;
- Prismatiques, 4x4x16 cm³ pour l'essai d'absorption d'eau par immersion ;
- Prismatiques, 4x4x16 cm³ pour l'essai d'absorption capillaire;
- Prismatiques, 4x4x16 cm³ pour l'essai de porosité accessible à l'eau ;
- Cubiques, 5x5x5 cm³ pour l'essai de l'attaque chimique.



Figure III.2: Types de moules utilisés

III.3.3. Préparation des éprouvettes

Le remplissage des moules est réalisé nous introduisons le béton de sable en couches successives selon la forme de chaque moule (figure III.3). L'introduction de béton dans les moules est effectuée par vibration ou par piquage, en fonction de la maniabilité du béton. Le béton débordant sur le dessus du moule est arasé à l'aide d'une règle métallique.

Avant le remplissage, les moules sont lubrifiés sur leurs parois pour éviter toute adhérence du mélange frais.



Figure III.3: Préparations des éprouvettes

III.3.4. Conservation des éprouvettes

Avant le démoulage les moules remplis par le béton (figure III.4) sont conservées a l'air dans le laboratoire pendant $24h \pm 1h$ à une température $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ (figure III.5). Après décoffrage les éprouvettes (figure III.6) sont conservés dans l'eau a une température $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à le jour de l'essai.



Figure III.4: Conservation des moules après coulage



Figure III.5: Eprouvettes après décoffrage



Figure III.6: Conservation des éprouvettes après décoffrage

III.4. Méthodes d'essais

III.4.1. Essais effectués sur le béton frais

III.4.1.1. La masse volumique du béton

Pour déterminer la masse volumique de béton des différents mélanges du béton de sable nous avons suivi la norme NF EN 12350-6, qui décrit la méthode d'essai pour mesurer la densité du béton frais. Pour réaliser cet essai nous avons utilisé des moules cubiques 15x15x15 cm³ et prismatique de dimension 4x4x16 cm³ (figure III.7). La masse volumique du béton frais est déterminée par la formule III.1

$$\rho_{BF} = \frac{m_t - m}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad \text{III.1}$$

Avec :

ρ : La masse volumique du béton en g/cm³ ;

m : La masse du moule vide en g ;

V : Le volume du moule en cm³ ;

m_t : La masse totale du moule rempli en g.



Figure III.7: Mesure de la densité du béton frais

III.4.1.2. Ouvrabilité

La mesure de consistance du béton est effectuée par l'essai du cône d'Abrams selon les prescriptions de la norme NF P18-451, (figure III.8). Un cône de forme tronconique lubrifié avec une huile de démoulage est fixé sur la plaque d'appui. Nous introduisons le béton en trois couches d'égales hauteurs. Chaque couche est mise en place par piquage d'ordre de 25 coups à l'aide de la tige de piquage. Après nous arasons le bord supérieur, le moule est soulevé avec précaution. La mesure est prise dans la minute qui suit le démoulage du cône, sur le point le plus haut du béton. La valeur de mesure est exprimée en cm.



Figure III.8: Affaissement au cône d'Abrams

III.4.2. Essais effectués sur le béton durci

III.4.2.1. Essai de traction par flexion

La résistance à la traction par flexion a été déterminée selon la norme NF EN 12390-5. Cet essai est effectué à l'aide d'une machine de flexion 3 points de 100 KN, sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 7x7x28 cm³. Les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'à le jour de l'essai (7, 28 et 90 jours).

Les éprouvettes sont déposées dans la machine d'essais comme indiqué dans la figure III.9. Après un bon centrage de l'éprouvette, nous appliquons progressivement une charge jusqu'à la rupture (figure III.10). La résistance à la traction par flexion est déterminée par la formule III.2.

$$R_t = 1,5Fl/b^3$$

III.2

Avec:

R_t: Résistance en traction par flexion en MPa ;

F: Charge appliquée en N ;

l: Distance entre les appuis en mm ;

b: Coté de l'éprouvette en mm.



Figure III.9: Essai de traction par flexion

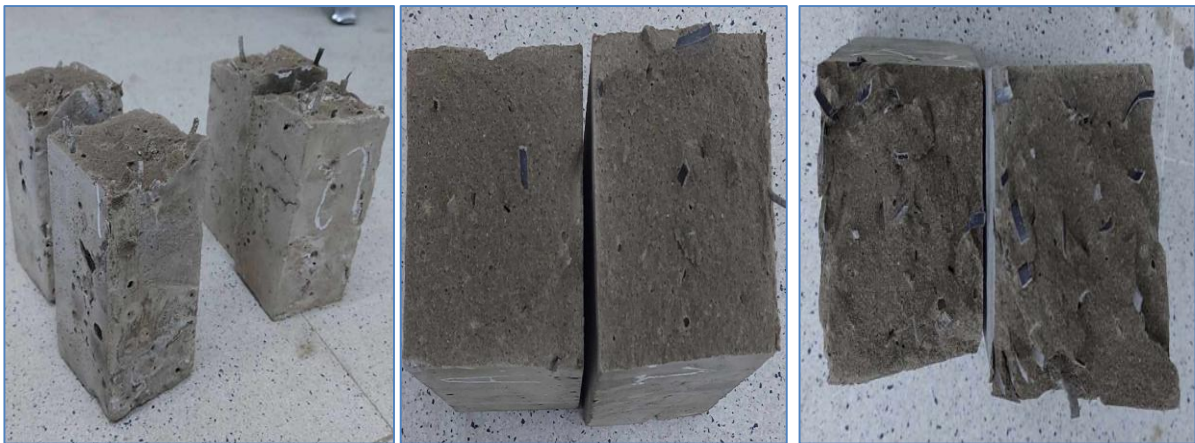


Figure III.10: Etat des éprouvettes après rupture en traction par flexion

III.4.2.2. Essai de compression

L'essai de compression est effectué conformément à la norme NF EN 12390-3. Il consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par compression axiale par une machine de compression, le cas de chargement de l'éprouvette doit se faire d'une manière continue jusqu'à rupture de celle-ci (figure III.11). L'essai de résistance à la compression est réalisé sur des demis prismes de dimensions $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$. Les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'à le jour de l'essai (7, 28 et 90 jours).

Nous considérons que la charge maximale atteinte $P(N)$ et la surface de chargement $S \text{ (mm}^2\text{)}$, la contrainte maximale (résistance à la compression) est déterminée par la formule III.3.

$$\sigma = P/S \quad \text{III.3}$$

Avec :

σ : Résistance à la compression en MPa ;

P : Charge de rupture en N ;

S : Surface d'éprouvette en mm^2 .



Figure III.11: Essai de résistance à la compression

III.4.2.3. Essai au scléromètre

L'essai au scléromètre (figure III.12) est exécuté conformément à la norme NF EN 12504-2. C'est une méthode non destructive permettant d'estimer la résistance du béton. Cet essai est facile à mettre en œuvre. Il nous permet d'avoir une meilleure expression de la qualité de l'ensemble de l'ouvrage. Le scléromètre est un appareil simple qui exprime la dureté aux chocs du béton auprès de la surface. Nous procédons à l'essai après la disposition des points de mesure sur la face externe de l'éprouvette selon la norme, nous la bloquons entre les deux amorces d'une presse de compression, ensuite nous exécutons le scléromètre sur les points de mesure. La tige en acier se retire du cylindre et pousse sur le béton en comprimant un ressort qui propulse une masse dans la tige. Cette masse de sa part rejoint la surface du béton, et entraîne de son retour un curseur permettant de lire l'indice de rebondissement.



Figure III.12: Essai au scléromètre

En faisant la moyenne de ces indices et en utilisant un abaque de référence de l'appareil nous pouvons déterminer la résistance du béton. Pour effectuer cet essai nous utilisons des éprouvettes de forme cubiques de dimension 15x15x15 cm³. Ces éprouvettes sont conservées dans l'eau pendant 28 jours.

III.4.2.4. Essai de vitesse ultrasonique

L'essai au scléromètre est exécuté conformément à la norme NF EN 12504-4. La méthode de mesure en transparence (directe) consiste à déterminer la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales entre deux points marqués sur la surface de l'objet testé, en connaissant la distance entre ces deux points (figure III.13).

Pour effectuer cet essai nous utilisons des éprouvettes de forme cubiques 15x15x15 cm³. Ces éprouvettes sont conservées dans l'eau pendant 28 jours. La vitesse de propagation du son en km/s peut être déterminée par la formule la formule III.4.

$$V = L/t \text{ (km/s)} \quad \text{III.4}$$

Avec:

V: La vitesse de propagation du son en km/s;

L: La longueur de parcours en mm;

T: Le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur en μ s.



Figure III.13: Essai de vitesse ultrasonique

Pour combiner les résultats nous appliquons la formule III.5.

$$R_{cc} = \frac{I_s^2}{[(3,64+0,023I_s)-(0,56xV_p)]^2} \quad \text{III.5}$$

Avec :

R_{cc}: La résistance à la compression combinée en MPa;

I_s: Indice sclérométrique;

V_p: Vitesse de propagation du son en m/s.

III.4.2.5. Mesure du module d'élasticité

Le module d'élasticité dynamique des bétons de sable a été évalué à 28 jours par la formule (III.7) (Neville, 1995), à partir des vitesses ultrasoniques mesurées.

$$E_d = \frac{\rho \cdot V^2 (1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (III.6)$$

Avec:

Ed: Le module d'élasticité dynamique (MPa),

ρ : La densité du béton durci (kg/m^3),

V : La vitesse des ultrasons (km/s),

ν : Le coefficient de Poisson.

III.4.2.6. Absorption d'eau par immersion

L'essai de l'absorption d'eau par immersion est effectué conformément à la norme NBN B 15-215. Cet essai consiste à mettre les éprouvettes cubiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ dans l'étuve à 105°C jusqu'à une masse constante, ensuite les immerger totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24 heures, jusqu'à saturation, puis les enlever et les peser (figure III.14).



Figure III.14: Essai d'absorption d'eau par immersion

Le coefficient d'absorption par immersion (A_b) est obtenu par le calcul de la moyenne des valeurs d'essais réalisés sur plusieurs éprouvettes d'un même échantillon. $A_b(\%)$ est donné par la formule III.7.

$$A_b\% = \frac{(M_h - M_s)}{M_s} \times 100 \quad III.7$$

Avec :

M_h : Masse de l'éprouvette humide en g,

M_s : Masse de l'éprouvette sèche en g,

A_b : coefficient d'absorption d'eau par immersion en %

III.4.2.7. Porosité accessible à l'eau

La mesure de la porosité accessible à l'eau du béton durci est effectuée suivant la norme (NF P18-459). C'est le rapport du volume des pores d'un corps d'épreuve à son volume apparent. Elle s'exprime en pourcentage. La mesure de la porosité accessible à l'eau du béton durci (figure III.15) implique la détermination par pesées des facteurs suivants:

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

La porosité ouverte est calculée à partir de ces résultats par la formule III.8.

$$\varepsilon = (M_{air} - M_{sec}) \times 100 / (M_{air} - M_{eau}) \quad \text{III.8}$$



Figure III.15: Essai de la porosité accessible à l'eau

III.4.2.8. Essai de l'absorption d'eau par capillarité

Cet essai effectué conformément à la norme NF EN 772-11 consiste à mettre les éprouvettes prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ dans l'étuve à 105°C pour être séchées. Ensuite ces éprouvettes sont pesées ce qui permet d'obtenir leur masse sèche. Après, elles sont mises en contact avec l'eau sur une de leur face avec des intervalles temporels bien déterminés (figure III.16). L'évolution de la masse est ensuite enregistrée à des intervalles réguliers et tracée sur un graphique en fonction de \sqrt{t} . A la fin nous pouvons dire que le coefficient de capillarité (exprimé en $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$) reflète la capacité d'absorption d'eau lorsque seule une de ses faces est en contact avec l'eau.

Pour effectuer cet essai nous utilisons des éprouvettes de forme prismatique $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Ces éprouvettes sont conservées à l'eau jusqu'à l'âge 28 jours.



Figure III.16: Essai de l'absorption d'eau par capillarité

Le coefficient de capillarité (C) est déterminé par le calcul de la pente de la droite de régression correspondant à la première phase d'absorption, en appliquant la formule III.9.

$$C = (m_i - m_d) \times 100 / (A \times \sqrt{t}) \quad \text{III.9}$$

Avec:

m_i : la masse au temps i ;

m_d : la masse sèche;

A : la surface en contact avec l'eau.

III.4.2.9. Essai des attaques chimiques

L'essai des attaques chimiques est effectué conformément à la norme ASTM C-267-96. Après 28 jours de conservation dans l'eau (figure III.17), les éprouvettes de dimensions $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ sont pesées pour déterminer leur masse initiale M_1 , ensuite elles sont exposées aux milieux chimiques suivants:

- 5% d'acide sulfurique (H_2SO_4) ;
- 5% d'acide chlorhydrique (HCl) ;
- 5% d'acide acétique (CH_3COOH) ;
- 5% hydroxyde de sodium (NaOH).



Figure III.17: Éprouvettes conservées dans 28 jours dans l'eau

Après leur immersion dans ces milieux agressifs (figure III.18), les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec l'eau douce pour éliminer le béton altéré, laissé sécher pendant 30 minutes. Ensuite, nous procédons à la pesée de ces dernières pour déterminer la masse M_2 (figure III.19). Cette opération est effectuée après 3, 7, 14, 21, 28, 56 et 90 jours d'immersion.

Il faut noter que les solutions utilisées sont renouvelées chaque 14 jours. Enfin la résistance chimique est évaluée par la mesure de la perte de masse de l'éprouvette. L'attaque est déterminée par la formule III.10.

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100 (\%) \quad \text{III.10}$$

Avec :

M_1 : masse de l'éprouvette avant l'immersion;

M_2 : masse de l'éprouvette après l'immersion.



Figure III.18: Conservation des éprouvettes dans les solutions



Figure III.19: Mesure du poids après attaque

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté:

- Le programme expérimental de l'étude;
- La formulation des différents mélanges de béton de sable, les paramètres de composition ainsi que le mode de fabrication et de conservation des éprouvettes;
- L'ensemble des essais réalisés sur les bétons de sable obtenus ainsi que les méthodes d'essais qui se résument à:
 - Essai de mesure de la densité ;
 - Essai de mesure de l'ouvrabilité;
 - Essai de traction par flexion;
 - Essai de la compression;
 - Essai au scléromètre;
 - Essai de vitesse ultrasonique;
 - Module d'élasticité dynamique;
 - Essai d'absorption d'eau par immersion;
 - Essai de la porosité accessible à l'eau;
 - Essai de l'absorption d'eau par capillarité;
 - Essai d'attaques chimiques par les acides et les bases.

L'interprétation des résultats des essais effectués et les discussions sont présentées dans les chapitres suivants.

Chapitre IV:

Influence du taux et types de fibres sur les propriétés du béton de sable

IV. Influence du taux et types de fibres sur les propriétés du béton de sable

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons traiter et analyser l'ensemble des résultats trouvés à l'état frais (densité et ouvrabilité). Les performances mécaniques à l'état durci à savoir la résistance en compression et en traction par flexion, la résistance obtenue par scléromètre, les vitesses ultrasoniques et le module d'élasticité seront aussi étudiées.

IV.2. Influence du taux et de types de fibres sur les propriétés béton à l'état frais

IV.2.1. Densité

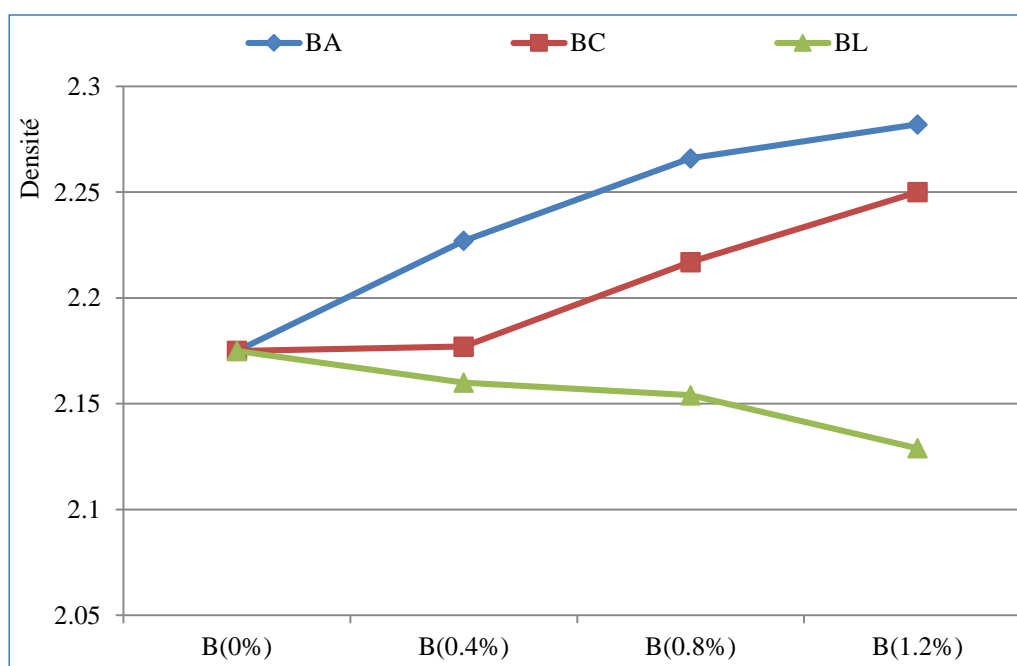


Figure IV.1: Variation de la densité en fonction du taux et du type de fibres

D'après les résultats présentés dans la figure IV.1, nous observons que la densité du béton augmente avec l'augmentation du taux d'incorporation des fibres de déchets en acier et en cuivre, atteignant une valeur maximale de 2.282 g/cm^3 et 2.25 g/cm^3 respectivement pour le taux de 1.2% en comparaison avec le béton de référence et le béton à base de fibres d'aluminium. Cette augmentation de densité peut s'expliquer par la densité élevée des fibres de déchets en acier et en cuivre, qui est trois fois supérieure à celle du béton sans fibres métalliques (Ikraïam et al., 2009).

En revanche, la densité a diminué avec l'augmentation du pourcentage de fibres d'aluminium dans le mélange, où la valeur minimale de la densité a été enregistrée à 2.129 g/cm^3 pour le taux de 1.2%. Cela est dû à l'avantage de l'aluminium dans la réduction de la densité des composites (Surappa 2003).

IV.2. 2. Ouvrabilité

Les résultats d'ouvrabilité pour les différents mélanges sont présentés dans la figure IV.2.

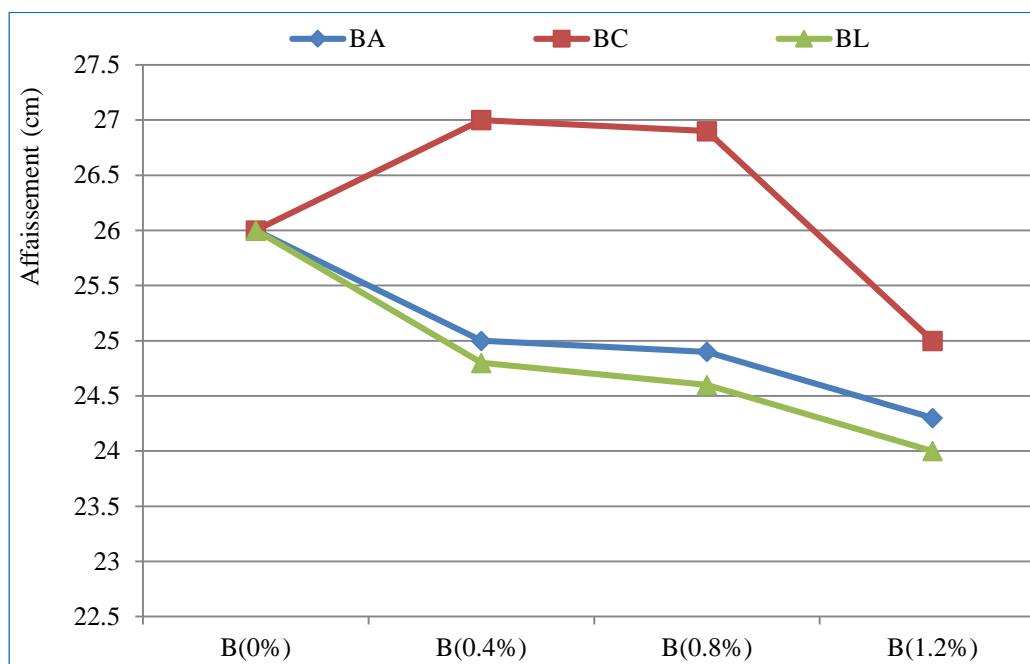


Figure IV.2: Variation de l'ouvrabilité en fonction du taux et type de fibres

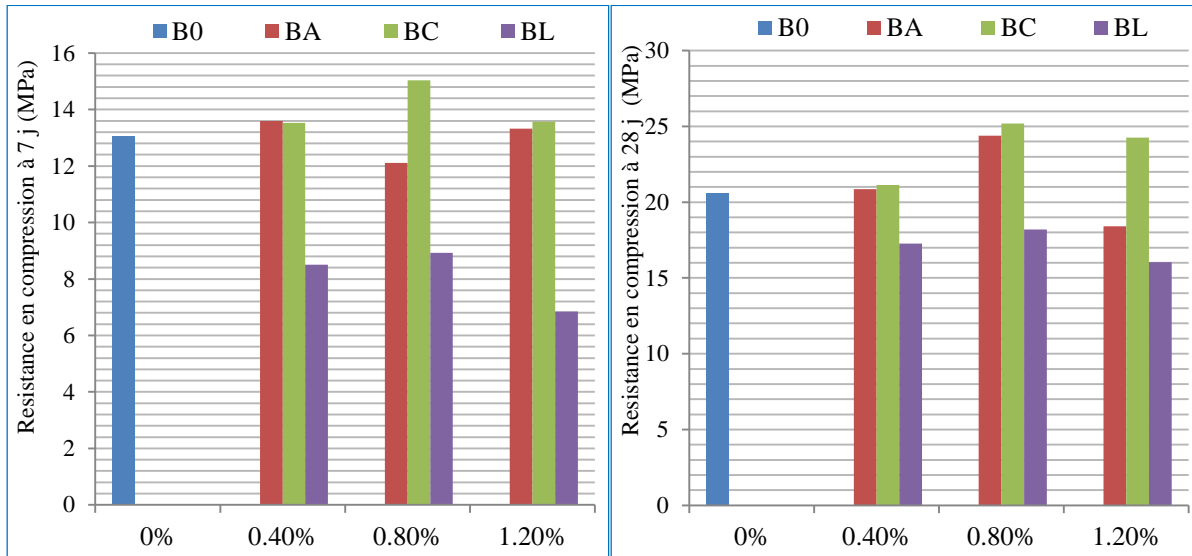
Les résultats présentés dans la figure IV.2 montrent que l'incorporation des fibres recyclés d'acier et aluminium dans le béton de sable conduit à une diminution de sa maniabilité, quelle que soit la proportion des fibres. En effet, l'affaissement est passé de 26 cm dans le béton de référence à 24.3 cm et 24 cm respectivement pour les mélanges BA et BL avec un taux de 1.2% des fibres. Cette diminution peut être attribuée à l'entrelacement des fibres entre elles dans le mélange de béton et à leur distribution non uniforme, ce qui crée des propriétés de rigidité et de difficulté de l'ouvrabilité (Elrefaei et al., 2023; Akhund et al., 2017).

Pour le mélange BC, le comportement de l'ouvrabilité est inverse par rapport aux autres mélanges, car nous avons observé une augmentation de la maniabilité qui a atteint une valeur maximale de 27cm avec un taux optimal de fibres de 0.4%. Au-delà de cette valeur, la maniabilité du béton diminue pour atteindre 25cm avec un taux de 1.2 % de fibres de cuivre. Plus la proportion de fibres augmenté, plus la maniabilité diminue en raison de l'effet des fibres sur la quantité de flux de la pâte, où l'augmentation des fibres de 0.4% à 1.2% diminue la quantité de courant d'affaissement (Saber et al., 2011).

IV.3. Influence du taux et de type de fibres sur les propriétés à l'état durci

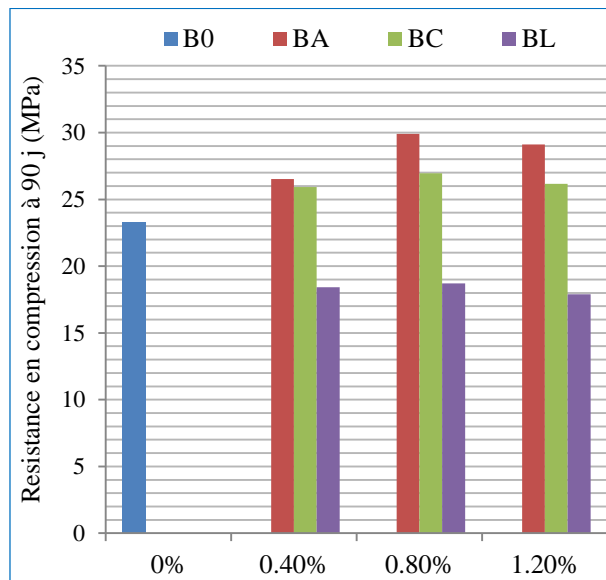
IV.3.1. Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression pour les différents mélanges sont présentés dans la figure IV.3.



a) Résistance à la compression à 7 jours

b) Résistance à la compression à 28 jours



c) Résistance à la compression à 90 jours

Figure IV.3: Variation de la résistance en compression en fonction du taux et de type de fibres recyclées.

L'introduction de fibres recyclées d'acier dans le béton de sable a entraîné une légère augmentation de la résistance à la compression à 7 jours, avec des valeurs de 0.4 % et 1.2 % des fibres. Cependant, nous observons une diminution de la résistance à un taux de 0.8 %. De même, les résultats à 28 jours étaient similaires à ceux à court terme, montrant une augmentation de la résistance avec l'augmentation du taux de fibres jusqu'à 0.8 %. Au-delà de cette valeur, la résistance à la compression diminue par rapport au béton de référence.

À 90 jours, nous pouvons observer une augmentation considérable de la résistance, quel que soit le taux de fibres, avec une valeur maximale de 29.9 MPa pour le taux de 0.8% de fibres. Cette augmentation de résistance est attribuée au rôle des fibres d'acier en tant qu'éléments de renforcement dans la matrice cimentaire, empêchant ainsi l'apparition de fissures et de déformations sous la charge. La baisse de résistance à la compression observée à certains

taux de fibres d'acier peut être due à leur forme, à leur orientation et à leur distribution au sein des échantillons (Elrefaei et al., 2023; Li 1992; Norambuena-Contreras et al., 2018).

Dans le cas du mélange BC, les résultats présentés dans la figure IV.3 montrent que l'incorporation de fibres de déchets de cuivre a conduit à une augmentation de la résistance à la compression, quel que soit leur proportion dans le mélange, à 7, 28 et 90 jours, avec une valeur optimale au taux de 0.8% où nous avons obtenu la plus grande résistance. Cette amélioration peut être attribuée à la distribution aléatoire des fibres à l'intérieur du mélange de béton (Ganesh et Sofi, 2021).

Les résultats indiquent que la résistance à la compression du béton contenant des proportions de 0.4%, 0.8% et 1.2% de fibres de déchets d'aluminium a diminué à tous les âges. En effet, plus que la proportion de fibres augmente, plus la résistance diminue. Cette baisse peut être attribuée à la faible densité du béton BL due à la faible densité des fibres d'aluminium (Gulmez 2020). De plus, la diminution de la résistance à la compression pourrait être attribuée à la possibilité d'une réaction entre les fibres de déchets d'aluminium et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formé par l'hydratation du ciment Portland, ce qui entraîne la libération de gaz d'hydrogène. Cela peut conduire à la formation de vides et à une structure poreuse dans le béton (Tang Van et al., 2019), qui deviennent visibles en surface des échantillons (figure IV.4).

En comparant les différentes formulations étudiées, nous observons que les fibres d'acier et de cuivre ont eu un effet positif sur la résistance à la compression du béton par rapport aux autres formulations. Le comportement mécanique du béton s'est amélioré en fonction du pourcentage d'incorporation de ces fibres. Par contre, les fibres d'aluminium ont eu un impact négatif important sur la résistance à tous les pourcentages et à tous les âges.

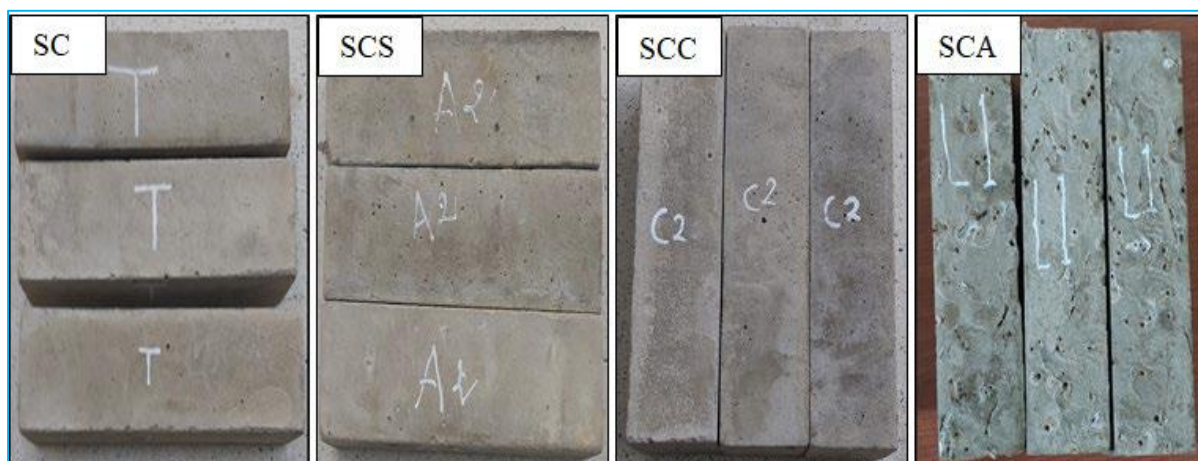
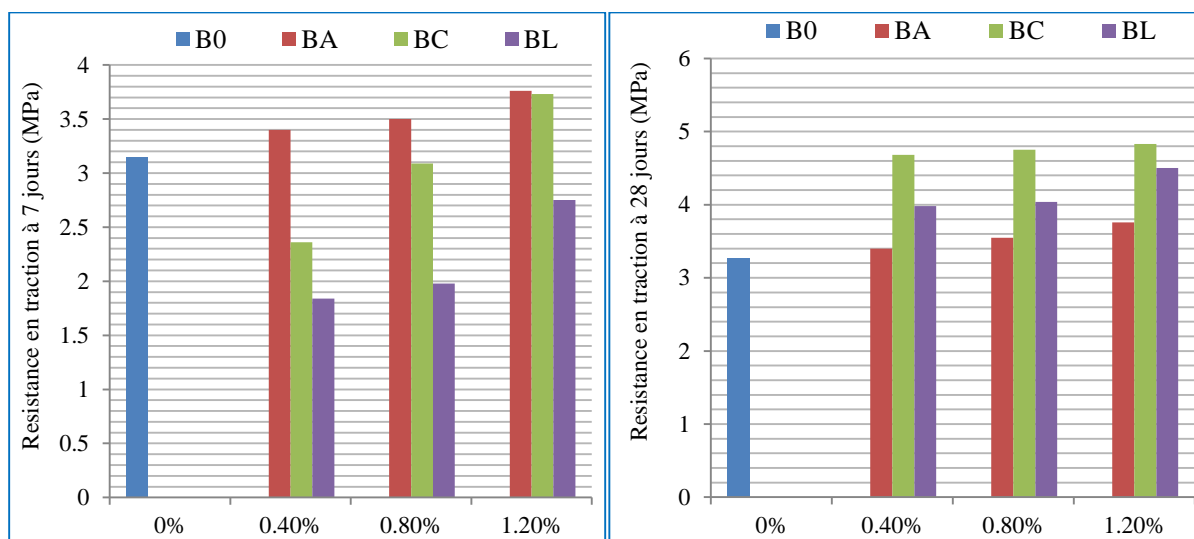


Figure IV.4: Etat des éprouvettes après décoffrage

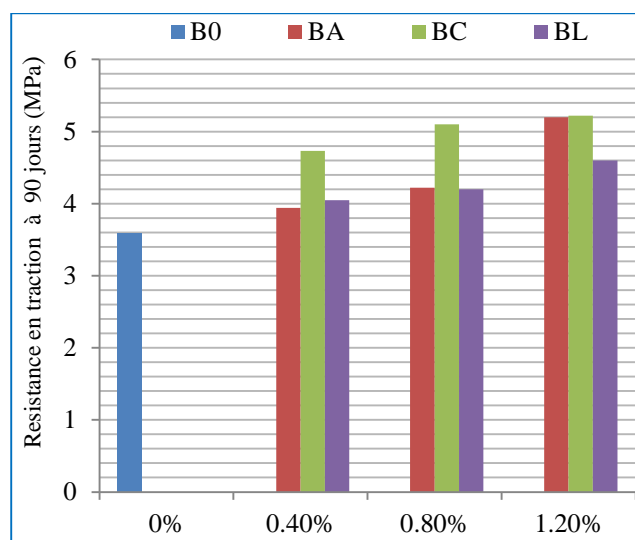
IV.3.2. Résistance en traction par flexion

Les résultats de la résistance à la traction par flexion pour les différents mélanges sont présentés dans la figure IV.5



a) Résistance à la traction par flexion à 7 jours

b) Résistance à la traction par flexion à 28 jours



c) Résistance à la traction par flexion à 90 jours

Figure IV.5: Variation de la résistance en traction par flexion en fonction du taux et de type de fibres recyclées

Les résultats de la figure IV.5 montrent une augmentation significative de la résistance à la traction par flexion du béton avec l'augmentation du pourcentage de fibres d'acier par rapport au béton de référence, à court, moyen et long terme. Nous pouvons dire que le pourcentage maximal de 1.2% de fibres d'acier a donné les valeurs les plus élevées de résistance à tous les âges. Cela est dû à la contribution des fibres d'acier à l'amélioration de la résistance au glissement des microfissures préexistantes (Li 1992).

Concernant le mélange BC, l'ajout de fibres de cuivre à des proportions de 0.4% et 0.8% a entraîné une diminution de la résistance à la traction de 25.07 % et 1.90 % respectivement à 7 jours. Ceci peut être attribué aux fissures qui se forment en raison du frottement interne entre les composants de la pâte de ciment et les fibres de cuivre (Sobuz et al 2022) à cet âge. Par contre, la valeur maximale de fibres a contribué à améliorer la résistance par rapport au béton de référence à court terme. La résistance a continué à augmenter avec la croissance du pourcentage de fibres de cuivre à 28 et 90 jours, qui atteint des valeurs maximales à un taux

de 1.2%, enregistrant une augmentation de 47.70% et 45.40% respectivement. Cela est dû au renforcement de la liaison entre les fibres et la matrice cimentaire, augmentant ainsi la résistance à la flexion (Naser et al., 2020). Il convient de noter que les fibres de cuivre se caractérisent par une contrainte et module de Young élevée par rapport aux autres fibres. Cela offre une résistance à la rupture élevée, ce qui renforce la résistance à la traction par flexion du béton, même au début de l'apparition initiale des fissures, grâce à l'effet de pontage continu induit par les fibres (Choï et al., 2019).

Le comportement de la résistance à la traction du mélange BL à 7 jours est similaire à la résistance à la compression, où l'on observe une forte diminution de la résistance pour toutes les proportions de fibres d'aluminium, ce qui peut être attribué à la surface lisse des fibres qui réduit l'adhérence entre les fibres et la matrice à cet âge précoce (Norambuena-Contreras et al., 2018). Cependant, les performances du BL s'améliorent avec l'augmentation du pourcentage de fibres d'aluminium à 28 et 90 jours, en particulier à la valeur maximale de 1.2%. Cela s'explique par le fait qu'une augmentation du taux de fibres contribue à renforcer la propriété de confinement de la matrice de béton fibreux, réduisant ainsi les déformations transversales inévitables (Sabapathy et al., 2019).

Les résultats mettent en évidence l'effet positif des fibres d'acier sur la résistance à la traction par rapport aux autres fibres et au béton de référence, à tous les âges. D'autre part, le mélange de béton BC a donné les valeurs maximales de résistance à la traction à moyen et long terme.

IV.3.3. Résistance en compression obtenue par l'essai scléromètre

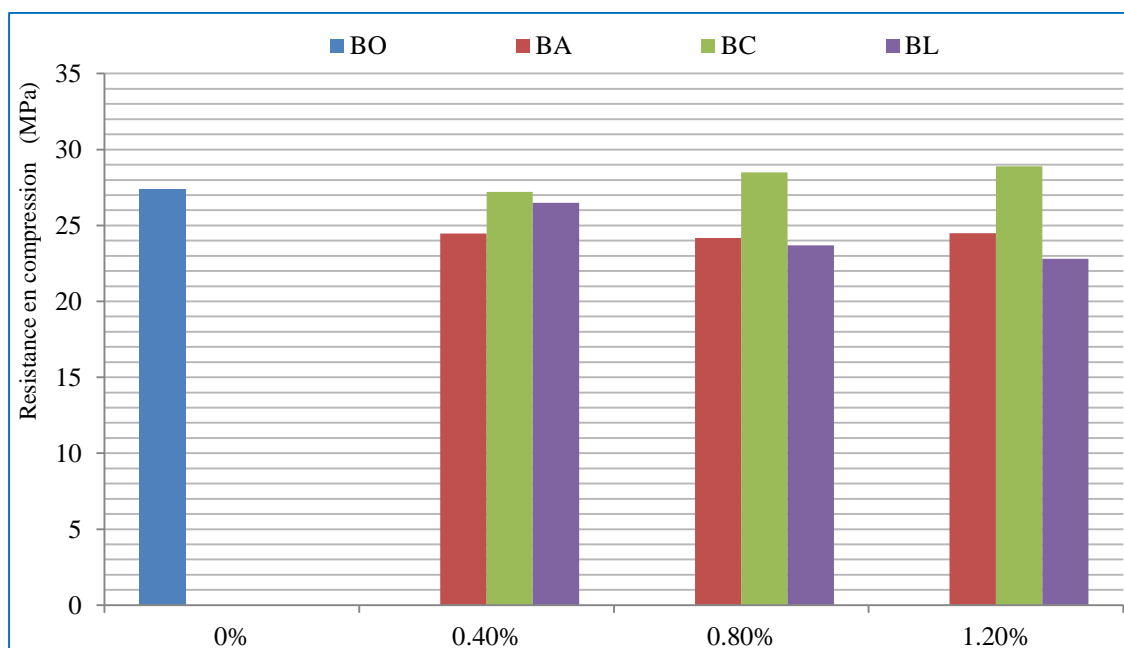


Figure IV.6: Résistance en compression obtenue par scléromètre

D'après la figure IV.6, l'introduction de fibres d'acier dans le béton de sable entraîne une diminution de la résistance de surface mesurée à l'aide du scléromètre à 28 jours, quelles que soient les proportions de ces fibres, par rapport au béton de référence qui était plus homogène, en raison de la teneur élevée en silice du sable de dune, ce qui améliore la résistance du B0 à cet âge (Rihia et al., 2019). La diminution de la résistance peut être attribuée à la forme, à l'orientation et à la distribution des fibres d'acier à l'intérieur des

échantillons (Li 1992; Elrefaei et al., 2023; Norambuena-Contreras et al., 2018) qui affectent négativement l'homogénéité du béton.

Les résultats pour le mélange BC ont montré une légère augmentation de la résistance à 0.8% et 1.2% de fibres de cuivre par rapport au béton de référence, qui atteint une valeur maximale de 28.5 MPa et 28.9 MPa respectivement. Cela peut être attribué à l'amélioration de l'homogénéité, de l'intégrité et de la qualité du béton durci (Mahapatra et Barai, 2018), en raison de la bonne dispersion des fibres de cuivre à l'intérieur du béton.

Les résultats obtenus par l'essai de scléromètre pour le mélange BL montrent un comportement similaire aux résultats précédents de la résistance à la compression à 28 jours. En effet, plus la proportion de fibres d'aluminium augmente de 0.4% à 1.2%, plus la résistance diminue, ce qui peut être due à la diminution de la densité du béton BL (Gulmez, 2020). En outre, la formation de vides en surface de l'échantillon, qui pourrait résulter d'une réaction entre les fibres de déchets d'aluminium et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Tang Van et al., 2019), pourrait avoir affaibli la résistance en surface.

Effectivement, les résultats suggèrent que les fibres de déchets de cuivre ont un effet positif sur l'homogénéité, l'intégrité et la qualité du béton de sable durci à 28 jours, par rapport aux fibres de déchets d'acier, d'aluminium et au béton de référence également.

IV.3.4. Vitesse de propagation du son obtenue par ultrason

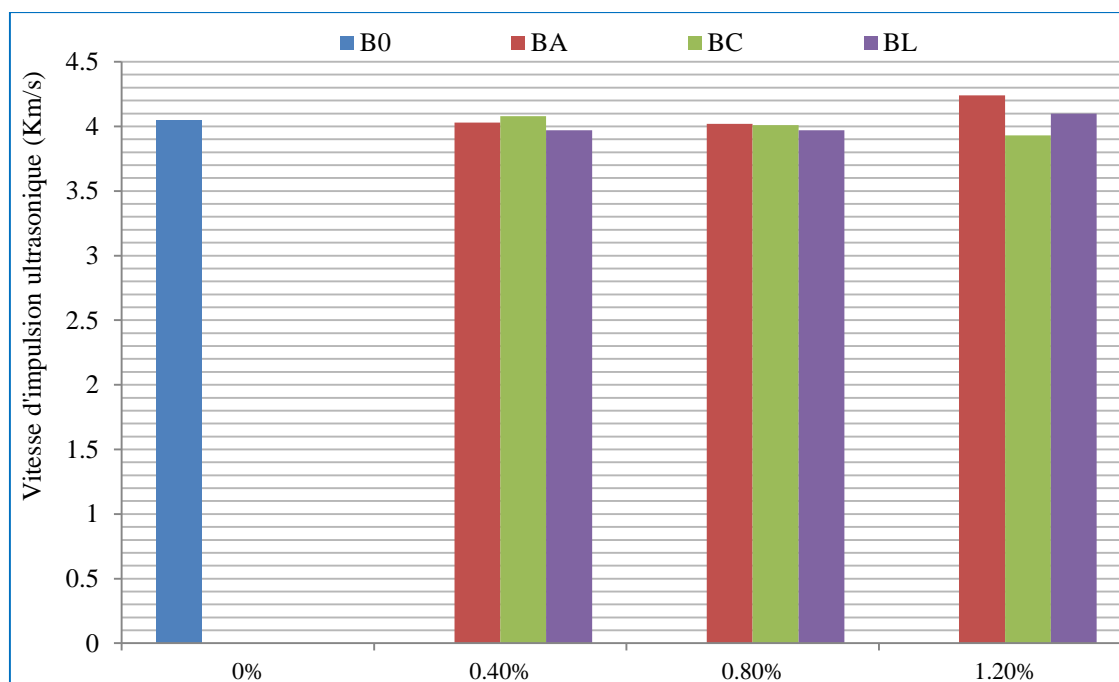


Figure IV.7: Variation de la vitesse ultrasonique en fonction du taux et type de fibres recyclées

Les résultats d'essai par ultrasons (figure IV.7) montrent clairement l'effet positif des fibres d'acier sur la structure interne du béton de sable durci à 28 jours, en particulier à une proportion de 1.2%. La vitesse d'onde ultrasonique a augmenté de 4.05 km/s dans le béton de référence à 4.24 km/s avec des vitesses similaires enregistrées aux proportions de 0.4% et

0.8% de fibres d'acier. Cela est attribué au renforcement des fibres d'acier de la structure interne du béton durci par l'augmentation de sa densité (Mahapatra et Barai, 2018).

L'introduction de 0.4% de fibres recyclés de cuivre dans le béton de sable conduit à une légère augmentation de la vitesse d'impulsion des ondes ultrasoniques, atteignant 4.08 m/s, ce qui peut être attribué au renforcement de l'homogénéité de la structure interne du béton. Cependant, nous observons une diminution de la vitesse avec l'augmentation des fibres recyclés de cuivre, ce qui peut être dû à la manière dont les fibres sont distribuées et réparties dans la matrice cimentaire du béton (Li 1992).

En ce qui concerne le mélange BL, les résultats de la vitesse des ondes ultrasonores est inférieurs à ceux du B0, en particulier aux taux de 0.4% et 0.8% de fibres d'aluminium, mais ils sont devenus plus proches de ceux du béton de référence à 1.2%. Cela peut être dû à la diminution de la densité de la composition enregistrée précédemment (Gulmez 2020).

En fait, les résultats ont montré des valeurs de vitesse des ondes ultrasoniques relativement proches pour toutes les formulations, avec une légère augmentation dans le mélange BA à 1.2% de fibres de déchets d'aciers à 28 jours.

IV.3.5. Résistance à la compression obtenue par la méthode combinée ultrason/scléromètre

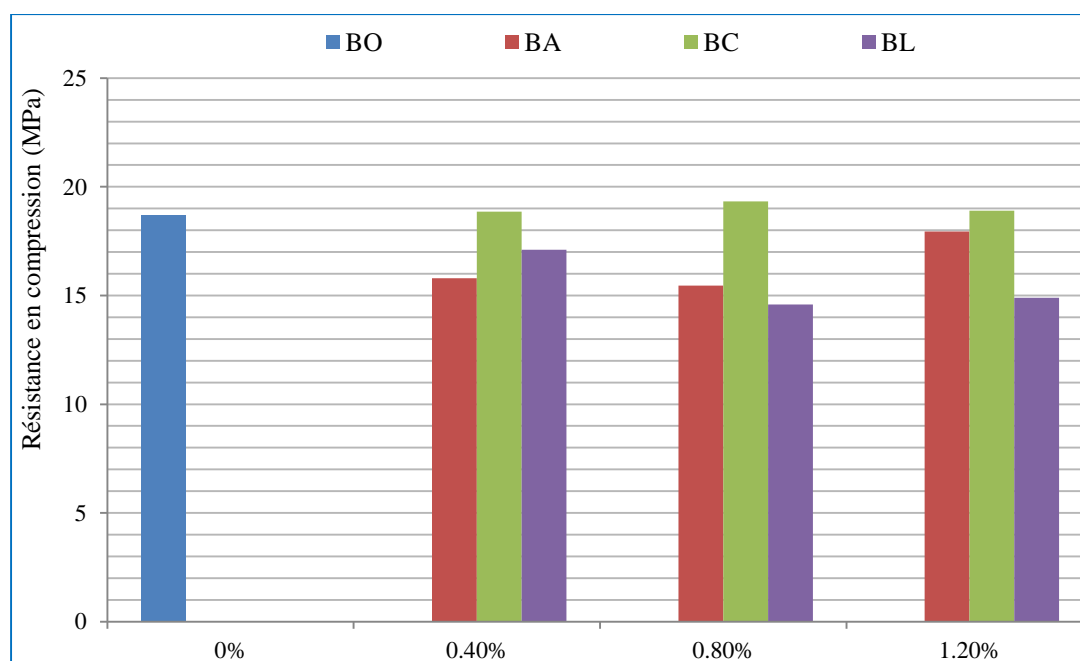


Figure IV.8: Variation de la résistance en compression obtenue par la méthode combinée en fonction du taux et type de fibres recyclées

Les résultats obtenus (figure IV.8) par la combinaison scléromètre/ultrasons montrent que le mélange BC avec 1.2% de fibres de cuivre présente une résistance maximale en compression qui atteint une valeur de 19.33 MPa. Ceci est expliqué par l'amélioration de l'homogénéité, l'intégrité et de la qualité du béton de sable durci, ce qui lui confère une microstructure plus dense et plus imbriquée (Mahapatra et Barai, 2018). D'autre part, nous observons que les

fibres recyclées d'acier ont diminué la résistance à la compression obtenue à partir de la combinaison scléromètre/ultrasons dans toutes les proportions, ce qui est le même comportement pour les fibres d'aluminium.

IV.3.6. Module d'élasticité dynamique

Les résultats du module d'élasticité dynamique sont présentés dans la figure IV.9

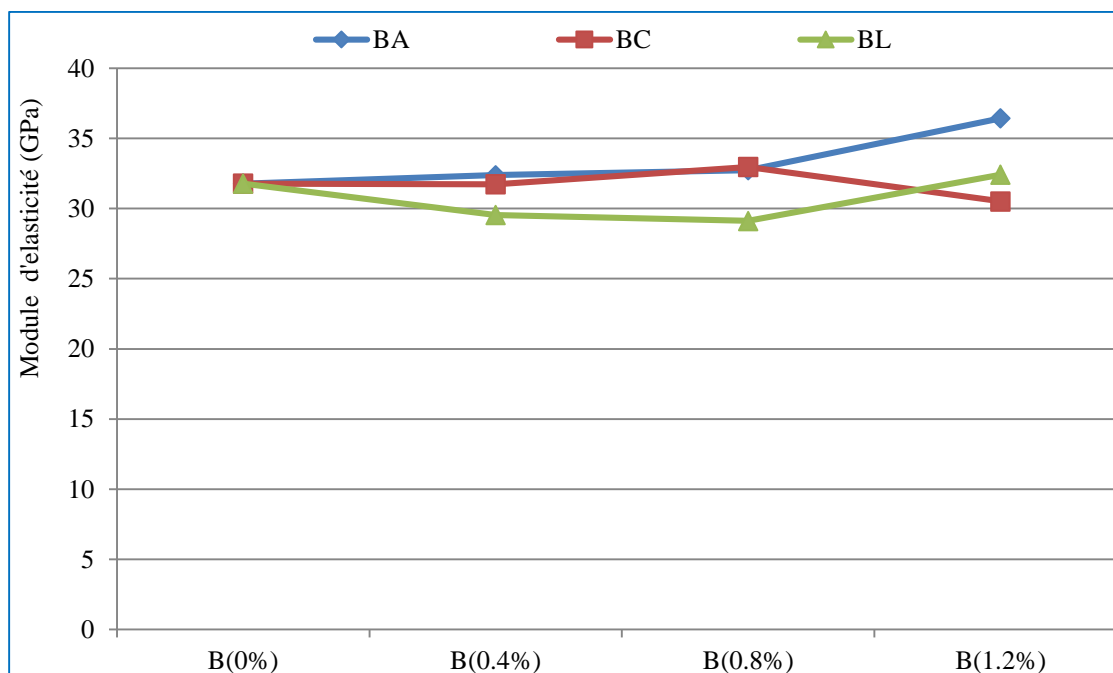


Figure IV.9: Variation du module d'élasticité en fonction du taux et type de fibres recyclées

En comparant les mélanges de béton de référence et le mélange BA, nous observons une augmentation du module d'élasticité du béton avec l'augmentation de la teneur en fibres d'acier, qui atteint une valeur maximale de 36.44 GPa pour un taux de 1.2% de ces fibres. Cette augmentation peut être attribuée à la dureté des fibres d'acier, ce qui conduit à un module d'élasticité plus élevé dans le béton par rapport au béton de référence (Nataraja et al., 1999).

En ce qui concerne le mélange BC, nous remarquons une variation dans les résultats, où nous avons enregistré la valeur maximale du module d'élasticité avec un taux de 0.8% des fibres de déchets de cuivre, tandis qu'il a légèrement diminué pour les bétons de taux de 0.4% et 1.2%. Cela pourrait être dû à l'effet négatif de l'air piégé autour des fibres, ce qui affecte le module d'élasticité (Hu et al., 2018), en raison des frottements entre les fibres et les autres composants de la pâte de ciment.

L'introduction de fibres recyclées d'aluminium à des proportions de 0.4% et 0.8% entraîne une légère diminution du module d'élasticité par rapport au mélange B0. Cette diminution peut être expliquée par le faible module d'élasticité de l'aluminium. Par contre, le béton a base d'un taux de 1.2% a entraîné une amélioration significative du module d'élasticité, qui atteint une valeur maximale de 32.42 GPa. Cela peut être dû au fait que la proportion élevée

de fibres contribue à renforcer la résistance d'emboîtement et de liaison, ce qui fournit un module d'élasticité plus élevé pour le béton (**Kayali et al., 2003**).

D'une manière générale, les résultats obtenus indiquent que les proportions élevées de fibres recyclées d'acier et d'aluminium (1.2%) améliorent le module d'élasticité du béton de sable, contrairement aux fibres de déchets de cuivre.

IV.4. Conclusion

En se basant sur les résultats obtenus, plusieurs conclusions significatives peuvent être tirées:

- Les fibres de déchets d'acier et de cuivre ont augmenté considérablement la densité du béton, tandis que les fibres de déchets d'aluminium l'ont réduite quel que soit leur proportion,
- Les fibres d'acier ont amélioré l'ouvrabilité du béton de sable à des proportions de 0.4% et 0.8%, tandis qu'il a diminué avec la croissance de la quantité de fibres de cuivre et d'aluminium dans le mélange,
- Les fibres d'acier ont amélioré la résistance en compression du béton à long terme, alors que les fibres de cuivre ont amélioré la résistance à court et moyen terme. Par contre, les fibres d'aluminium ont généralement diminué la résistance en compression à tous les âges,
- L'introduction de fibres de déchets d'acier et de cuivre a augmenté la résistance à la traction à tous les âges et quel que soit leur taux, sauf dans le mélange BL à court terme,
- Les fibres à 1.2%, ont amélioré la structure interne et l'homogénéité du béton en augmentant la résistance à la compression par scléromètre pour les bétons à base de fibres d'acier et la vitesse des ondes ultrasonique pour les bétons à base de fibres de cuivre et d'aluminium,
- Le module d'élasticité dynamique du béton de sable a augmenté avec la croissance des proportions de fibres d'acier et d'aluminium jusqu'à 1.2%.

Chapitre V:

***Influence du taux et du type
de fibres sur les paramètres de
durabilité du béton de sable***

V. Influence du taux et du type de fibres sur les paramètres de durabilité du béton de sable

V.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats des essais de durabilité et étudier l'influence des taux et le type de fibres recyclées utilisées (fibres d'acier, cuivre et aluminium) sur les paramètres de durabilité du béton de sable à savoir l'absorption d'eau par immersion, capillaire et la porosité accessible à l'eau. Les résistances aux attaques chimiques dans les différents milieux de conservation (HCL, H₂SO₄, CH₃COOH et NaOH) seront aussi examinées.

IV.2. Influence du taux de substitution et du type de fibres sur les paramètres de durabilité du béton

V.2.1. Absorption d'eau par immersion

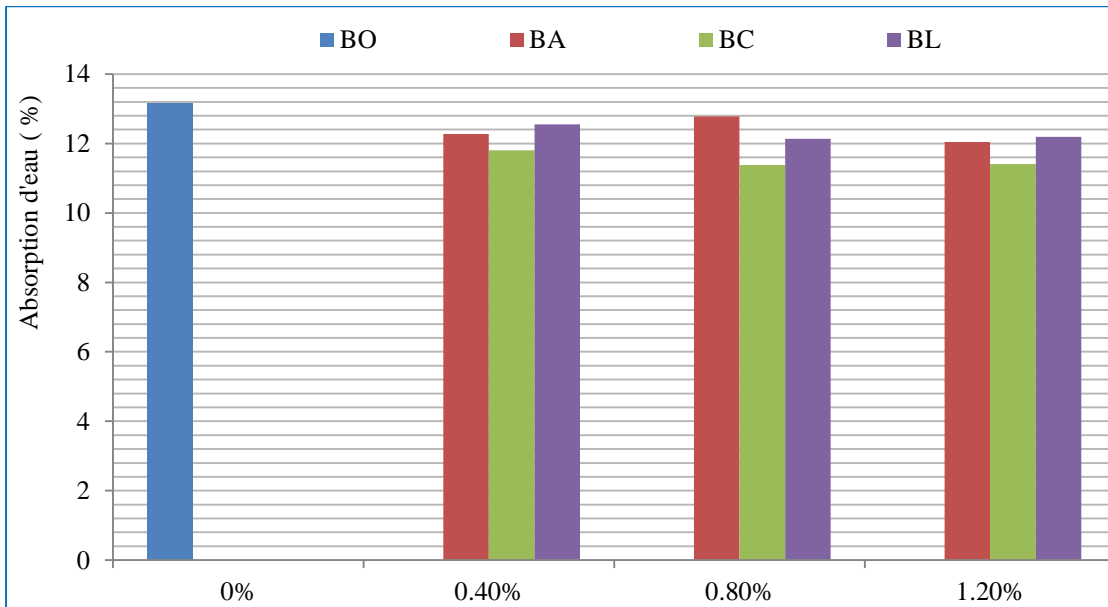


Figure V.1: Variation de l'absorption d'eau par immersion en fonction du taux et du type de fibres recyclées

Le coefficient d'absorption par immersion est considéré comme un indicateur de la durabilité du béton. Les résultats donnés par la figure V.1 présentent une réduction du coefficient d'absorption par immersion en fonction des proportions et du type de fibres recyclées utilisés. Ils indiquent que l'introduction de fibres de déchets de cuivre contribue à réduire considérablement la quantité d'eau absorbée par immersion par rapport aux autres mélanges, en particulier à 0.8% et 1.2%. Cela nous renvoie à ce que nous avons trouvé dans les essais scléromètre/ultrasons, qui ont démontré une amélioration de l'homogénéité, de l'intégrité et de la qualité du béton durci ce qui a conduit à des effets pouzolaniques plus favorables sur les propriétés physiques et chimiques des structures poreuses (Mahapatra et Barai, 2018).

Pour les mélanges BA et BL, nous observons un comportement similaire pour toutes les proportions. Malgré une légère augmentation à 0.8% de fibres d'acier par rapport aux autres fibres, le coefficient d'absorption reste inférieur à celui du béton de référence. Cela peut être

attribué au renforcement de la structure interne du béton durci qui contribue à la réduction de l'absorption d'eau par immersion. Les résultats de cette étude sont différents de celle de **Norambuena-Contreras et al., 2018**, où une augmentation significative des structures poreuses a été observée lors de l'utilisation de fibres dans le béton. Cette différence peut être attribuée à la manière dont les fibres sont positionnées, orientées et réparties dans la matrice cimentaire.

V.2.2. Porosité accessible à l'eau

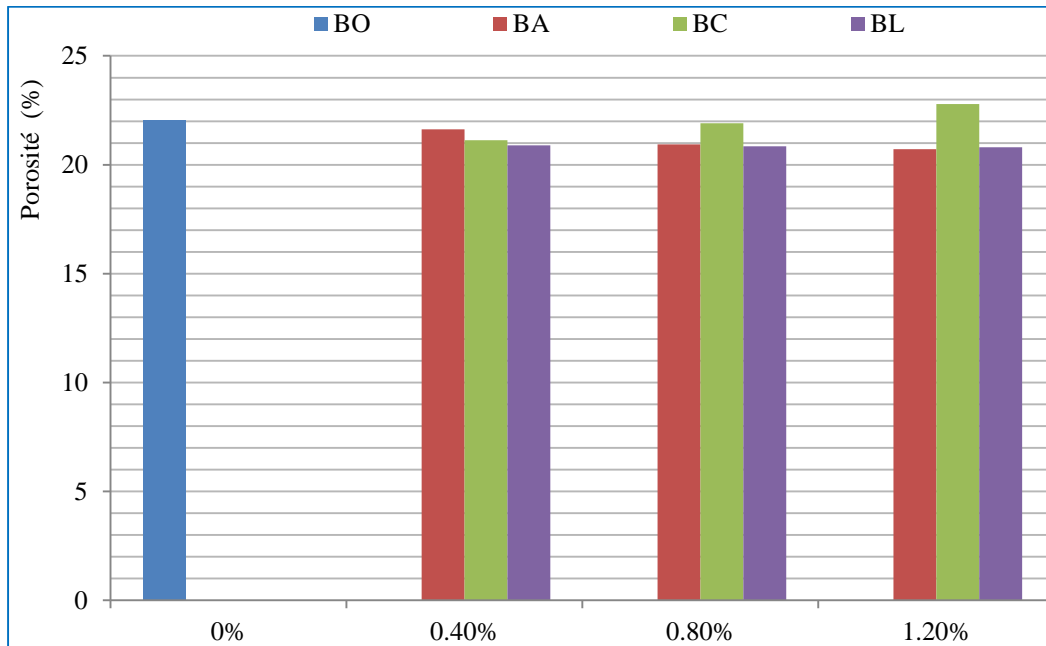


Figure V.2: Variation de la porosité accessible à l'eau en fonction du taux et type de fibres recyclées

Les résultats de l'essai de la porosité accessible à l'eau (figure V.2) montrent que l'augmentation de la teneur en fibres de déchets d'acier réduit la porosité du béton durci, avec une diminution de 5.94% enregistrée au taux maximum de 1.2% de fibres d'acier. Cela peut être attribué à la densité élevée enregistrée du mélange résultant de l'amélioration de la structure microscopique poreuse du béton solide (**Mahapatra et Barai, 2018**).

Dans le mélange BC, l'introduction de fibres de déchets de cuivre à des taux de 0.4% et 0.8% entraîne une légère réduction de la porosité accessible à l'eau à 21.12% et 21.91% respectivement, par rapport au béton de référence. Cela peut être dû à l'amélioration et à l'uniformité de la structure interne du béton. Par contre, la porosité augmente lorsque le taux de fibres est élevé à un taux de 1.2%, ce qui pourrait être expliqué par la formation des pores résultant de l'air emprisonné autour de ces fibres (**Hu et al., 2018**).

L'ajout de fibres de déchets d'aluminium a donné des résultats positifs en réduisant la porosité accessible à l'eau, quel que soit leur taux dans le mélange, jusqu'à atteindre la valeur minimale de porosité à la proportion maximale de 1.2%. Cela peut être attribué à un renforcement de l'interconnexion et la liaison de la structure interne en béton (**Kayali et al., 2003**).

V.2.3. Absorption d'eau par capillarité

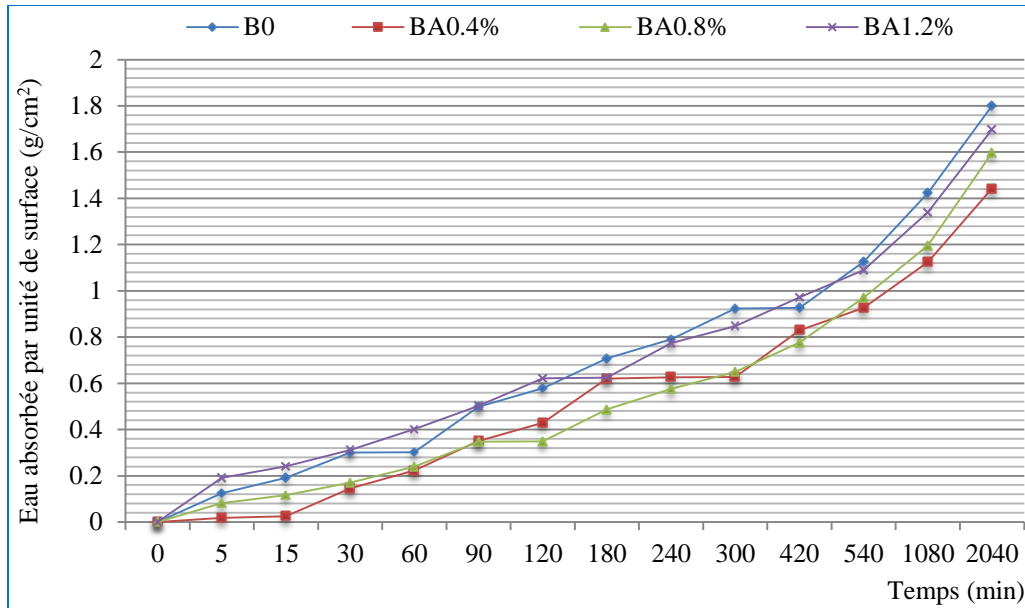


Figure V.3: Eau absorbée par unité de surface en fonction du temps pour la formulation à base de fibre d'acier

Les premières observations des courbes de la figure V.3 montrent que le taux d'absorption pour le béton de référence et le mélange BA évolue lentement, de la même manière et avec la même dynamique, quel que soit le taux de fibres d'acier incorporées dans le mélange. L'ajout de 04% et 08% de fibres d'acier a conduit à une réduction du coefficient d'absorption par capillarité par rapport au béton de référence, ce qui est justifié par l'augmentation de la densité des mélanges BA. Il convient de noter que l'ajout de 1.2% de fibres d'acier augmente parfois le coefficient d'absorption (entre 5 - 90 minutes), ce qui peut être dû à l'orientation de certaines fibres de manière verticale. C'est-à-dire que les fibres étaient alignées dans le sens du flux capillaire, facilitant ainsi le processus d'absorption d'eau (Ammari et al., 2020).

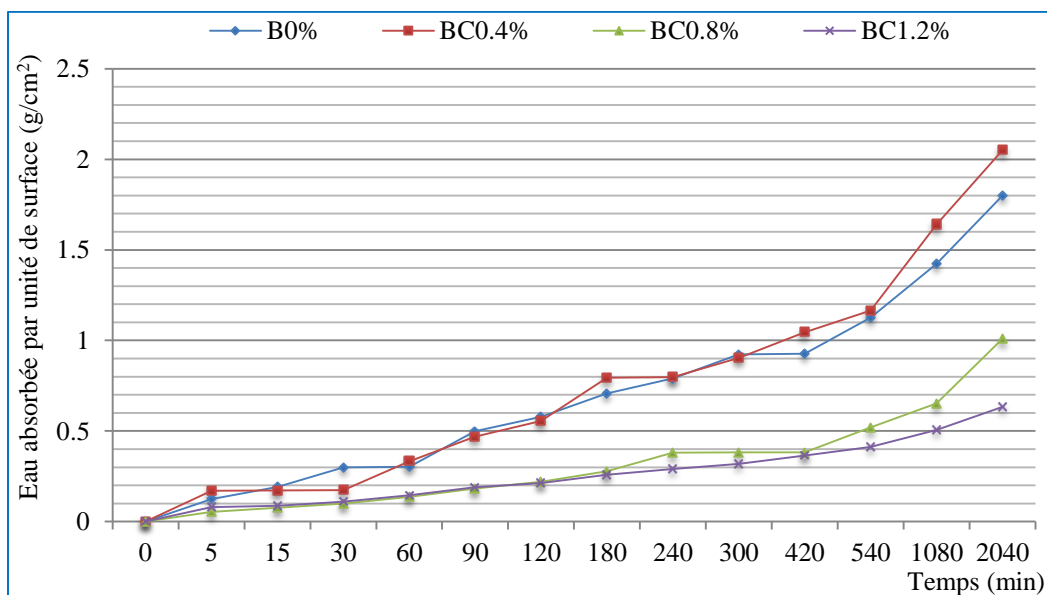


Figure V.4: Eau absorbée par unité de surface en fonction du temps pour la formulation à base de fibre de cuivre

Le coefficient d'absorption capillaire a augmenté lors de l'ajout de 0.4 % de fibres de déchets de cuivre (figure V.4). En fait, la plupart des valeurs obtenues sont supérieures à celles du béton de référence, où le coefficient d'absorption maximal a été enregistré à 2.051 g/cm². L'effet négatif des fibres sur les valeurs du coefficient d'absorption par capillarité peut être attribué à leur élasticité, qui leur permet de se lier facilement au béton (Usman 2020). Ensuite, le coefficient d'absorption diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres de cuivre, avec la valeur la plus basse enregistrée à 1.2% de fibres de cuivre. Cette diminution est liée à l'augmentation de la densité du mélange BC en raison de l'effet pouzzolanique sur les propriétés physiques et chimiques de la structure poreuse (Mahapatra et Barai, 2018), ce qui empêche la liaison entre ces pores.

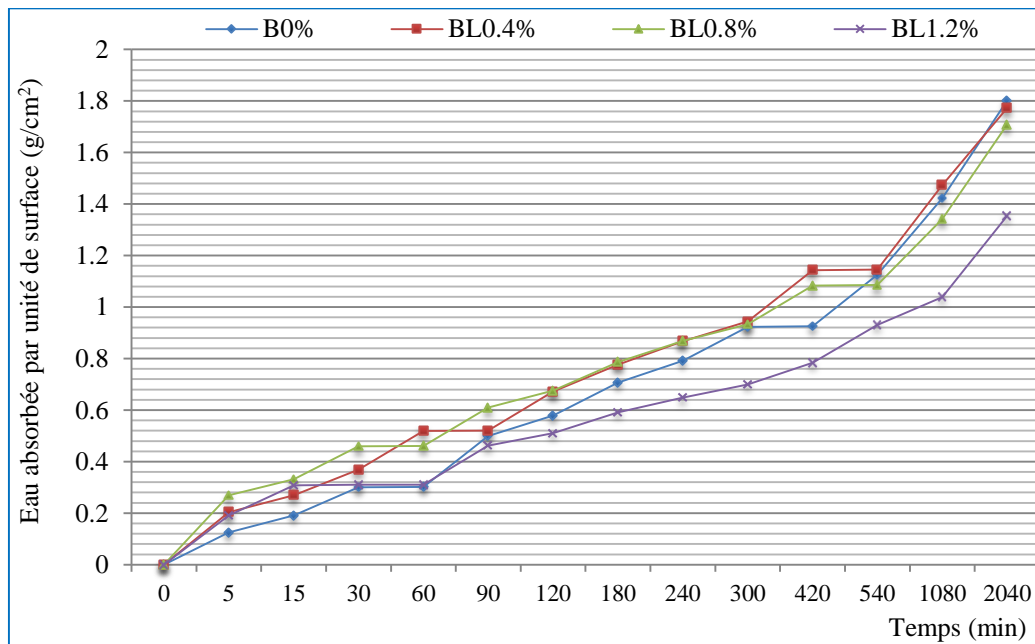


Figure V.5: Eau absorbé par unité de surface en fonction du temps pour la formulation à base de fibre d'aluminium

Les résultats présentés sur la figure V.5 montrent une augmentation du coefficient d'absorption par capillarité avec l'introduction de fibres d'aluminium dans le béton de sable par rapport au béton de référence pendant la période allant de 0 à 60 minutes de l'essai. Cette augmentation se poursuit surtout dans les pourcentages de 0.4% et 0.8%. Probablement en raison de la forme, de la longueur et des propriétés des fibres, qui peuvent augmenter la longueur des pores interconnectés (Meddah 2009; Usman 2020). Par contre, l'effet du contenu de 1.2% de fibres d'aluminium après les 60 minutes est positif sur le coefficient d'absorption, où il diminue par rapport aux autres mélanges pour atteindre une valeur maximale de 1.131 g/cm². Cela peut être attribué au renforcement de l'interconnexion et de la force de liaison de la structure interne, empêchant ainsi la liaison entre les pores capillaires du béton (Kayali et al, 2003).

En comparant de l'absorption capillaire des différents bétons, l'absorption maximale est donnée par le béton à base de 0.4% de fibres recyclées de déchets de cuivre. Tandis que les valeurs minimales sont enregistrées dans le béton de 1.2% de fibres de déchets de cuivre.

V.2.4. Résistances chimiques aux acides et bases

V.2.4.1. Attaque par l'acide sulfurique (5% H₂SO₄)

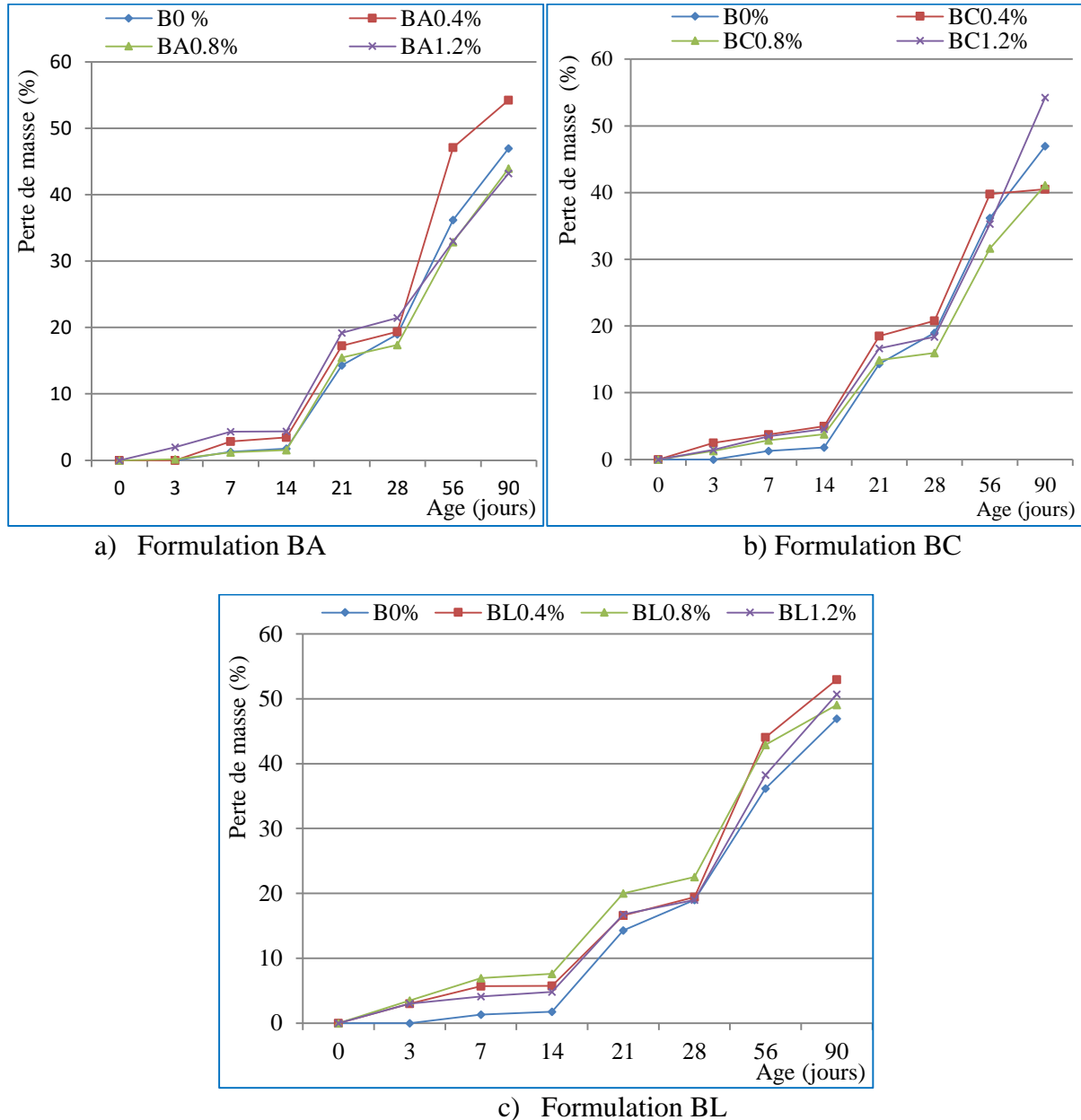


Figure V.6: Variation de la perte de masse pour les différents types des bétons en fonction de temps d'immersion dans 5% de H₂SO₄

Les résultats des essais de résistance aux acides, mesurés par la perte de masse due à l'attaque de l'acide sulfurique H₂SO₄ sur les échantillons BA (figure V.6 (a)), nous pouvons observer qu'après 3, 7, 14 et 21 jours, une augmentation de la perte en poids par rapport au béton de référence B0. Cela est dû à l'attaque acide de la couche superficielle du béton qui réagit avec la portlandite Ca(OH)₂ résultant de l'hydratation du ciment (**Khelifa 2009**), formant des carbonates de calcium insolubles dans l'eau qui s'accumulent dans les pores, entraînant l'éclatement du béton (**Huber et al., 2017**). Cependant, après 28 et 56 et 90 jours, la perte de poids due à l'acide sulfurique diminue considérablement avec l'ajout de 0.8% et 1.2% de

fibres d'acier jusqu'au 7.98% à 90 jours de conservation, ce qui confirme les résultats précédents indiquant que l'ajout de fibres d'acier limite le développement et la formation de fissures initiales, tout en réduisant la porosité du béton (**Huang et Xie, 2011**).

Avec le même comportement du mélange BA, les résultats des essais de perte de masse due à l'attaque de l'acide sulfurique H_2SO_4 sur les échantillons BC (figure V.6 (b)) montrent une augmentation de la perte de poids par rapport au béton de référence B0 jusqu'à 21 jours, dans toutes les proportions. Cela est dû à la vitesse d'érosion qui dépend du taux de pénétration de l'acide sulfurique dans la structure du béton et pour atteindre de $Ca(OH)_2$ et de $3CaO.Al_2O_3$ (**Ahmad et al., 2020**), comme le montrent les réactions chimiques données par les équations V.1 et V.2.



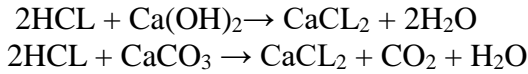
Après cela, la dynamique de perte de masse dans le mélange contenant 0.8% de fibres de cuivre diminue considérablement par rapport aux autres proportions, qui avaient des comportements similaires ou supérieurs à celui du mélange de référence, à 28 et 56 jours. Il est important de noter que la perte de masse dans le mélange BC0.4% diminue également à 90 jours jusqu'à 12.5%, équivalente à la valeur du mélange BC0.8%. Cette amélioration de la résistance à l'attaque de l'acide sulfurique est due à l'augmentation de la densité du béton résultant de l'ajout de fibres qui renforcent la structure poreuse (**Mahapatra et Barai, 2018**).

L'incorporation des fibres de déchets d'aluminium a un effet négatif sur la résistance à l'attaque chimique et repousse la pénétration de l'acide sulfurique (figure V.6 (c)). Les résultats montrent une augmentation significative et rapide de la perte de masse du béton, quel que soit le taux de fibres d'aluminium, en raison de l'attaque de l'acide sulfurique sur la couche superficielle du béton, entraînant ainsi son éclatement (**Huber et al., 2017**). D'autre part, la forme, la longueur et les caractéristiques des fibres d'aluminium peuvent également avoir un impact négatif sur la porosité du béton, augmentant ainsi la longueur des pores interconnectés (**Usman 2020**). Ceci, sans oublier la formation des pores dans les échantillons BL en résultat de la réaction potentielle de l'aluminium avec le portlandite $Ca(OH)_2$ (**Tang Van et al., 2019**), qui facilite la pénétration et la perméabilité de l'acide sulfurique à travers le béton.

Nous pouvons, dire que l'effet des fibres de déchets d'acier et de cuivre sur la résistance à l'attaque par l'acide sulfurique a été positif en réduisant le taux de perte de poids en fonction de la teneur en fibres au sein du béton de sable par rapport au béton de référence. Alors que l'effet des fibres d'aluminium était négatif, quel que soit leur pourcentage dans le béton.

V.2.4.2. Attaque par l'acide chlorhydrique (5%HCL)

Les résultats d'essai de résistance à l'attaque de l'acide HCL sur les mélanges BA, BC et BL (figure V.7), montrent une perte de masse dans toutes les phases et quel que soit le taux de fibres utilisé, mais elle reste toujours inférieure à celle du béton de référence B0. Grâce à la réaction chimique de l'acide chlorhydrique avec le portlandite $Ca(OH)_2$ et la chaux libérée par l'hydratation du ciment, qui produit du chlorure de calcium ($CaCl_2$) hautement soluble et très nocif pour le béton. Cela peut être expliqué par les équations V.3 et V.4



V.3
V.4

Il est évident que l'augmentation du contenu en fibres de déchets d'acier (figure V.7 (a)) réduit considérablement le taux de perte de masse du béton de sable étudié à toutes les phases. À une proportion de 1.2% de fibres d'acier, le taux de perte de masse a diminué de 37.19% après 90 jours d'immersion dans la solution chimique par rapport au mélange B0, confirmant ainsi le rôle des fibres d'acier dans la réduction des pores du béton et la limitation du développement des fissures (Ammari et al., 2020).

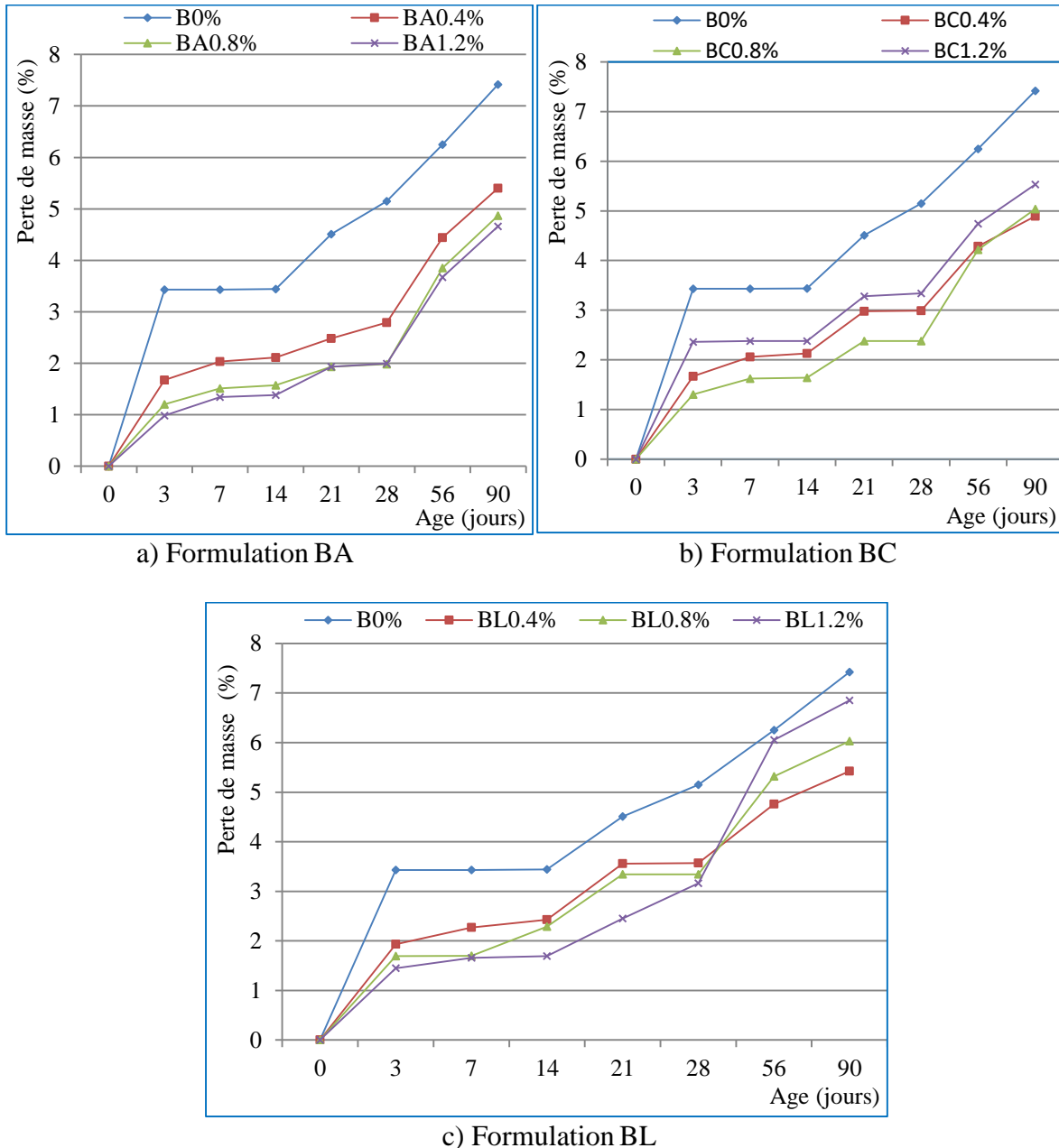


Figure V.7: Variation de la perte de masse pour les différents types des bétons en fonction de temps d'immersion dans 5% HCl

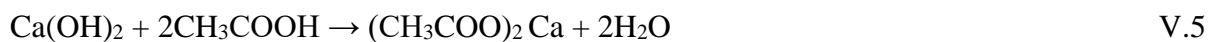
Dans le même sens, les fibres de déchets de cuivre ont contribué à limiter la pénétration de l'acide chlorhydrique dans le béton en réduisant le taux de perte de masse (figure V.7 (b)). On peut considérer la proportion de 0.8% de fibres de cuivre une valeur optimale, car on a enregistré une réduction de 32.07% du taux de perte de masse après 90 jours. Cela est dû à l'augmentation de la densité du mélange BC résultant de l'effet pouzzolanique sur les propriétés physiques et chimiques de la structure poreuse (**Mahapatra et Barai, 2018**), empêchant ainsi la perméabilité de l'acide HCL entre ces pores à l'intérieur du béton de sable.

Le même comportement a été observé dans le mélange BL (figure V.7 (c)), où les fibres de déchets d'aluminium ont clairement contribué à réduire la perte de masse résultant de l'attaque de l'acide chlorhydrique de manière variable selon le taux de fibres et la durée d'immersion dans le milieu chimique, par rapport au béton de référence B0. Une réduction de 26.95% de la perte de masse a été enregistrée dans le mélange BL0.4% après 90 jours. Cela reflète directement à la capacité des fibres d'aluminium à renforcer la cohésion et la force d'adhérence de la structure interne du béton, limitant ainsi l'attaque de l'acide HCL (**Kayali et al., 2003**).

Les résultats montrent clairement que les fibres de déchets d'acier ont été les plus efficaces en termes de résistance à l'attaque de l'acide chlorhydrique par rapport aux autres mélanges. Cependant, il est important de souligner que toutes les fibres, quelle que soit leur proportion dans le béton de sable, ont eu un effet positif en réduisant la perte de masse.

V.2.4.3. Attaque par l'acide acétique (5%CH₃COOH)

Les figures V.8 (a), (b), (c) montrent les résultats de la perte de masse due à l'attaque de l'acide acétique CH₃COOH sur toutes les formulations B0, BA, BC et BL à différentes périodes. Il semble évident que le comportement de la perte en poids augmente avec le temps d'une manière similaire dans tous les mélanges, étant faible pendant une période de 3 à 14 jours. Ce qui peut être dû au fait que l'acide acétique est partiellement déprotéiné, le rendant relativement faible en tant qu'acide. D'autre part, la réaction entre l'acide acétique (CH₃COOH) et l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) entraîne la formation d'acétate de calcium en tant que couche superficielle sur les échantillons, ce qui temporairement réduit la pénétration de l'acide à l'intérieur des échantillons (**Rihia 2019; Perumal et al., 2020**). Par la suite, la perte en poids augmente considérablement après 28 jours. Le processus de réaction chimique peut être illustré par la relation V.5.



D'une manière générale, l'incorporation de fibres dans le béton de sable n'a pas eu un impact significatif sur la durabilité du béton et la résistance à l'attaque chimique de l'acide acétique. Nous pouvons observer une variation dans la perte de masse dans le mélange BA, à la fois croissante et décroissante à certains moments, tout en présentant un comportement similaire au béton de référence pour les taux de 0.4% et 0.8% de fibres. Par contre, l'effet d'un taux de 1.2% de fibres d'acier était largement positif, réduisant relativement la perte de masse du béton. Cela peut être attribué à la réaction chimique distincte entre les éléments du béton, notamment les fibres d'acier et la pâte de ciment, ainsi qu'à la liaison physique résultant de l'interaction de l'eau dans le béton en même temps (**Kim et al., 2015**).

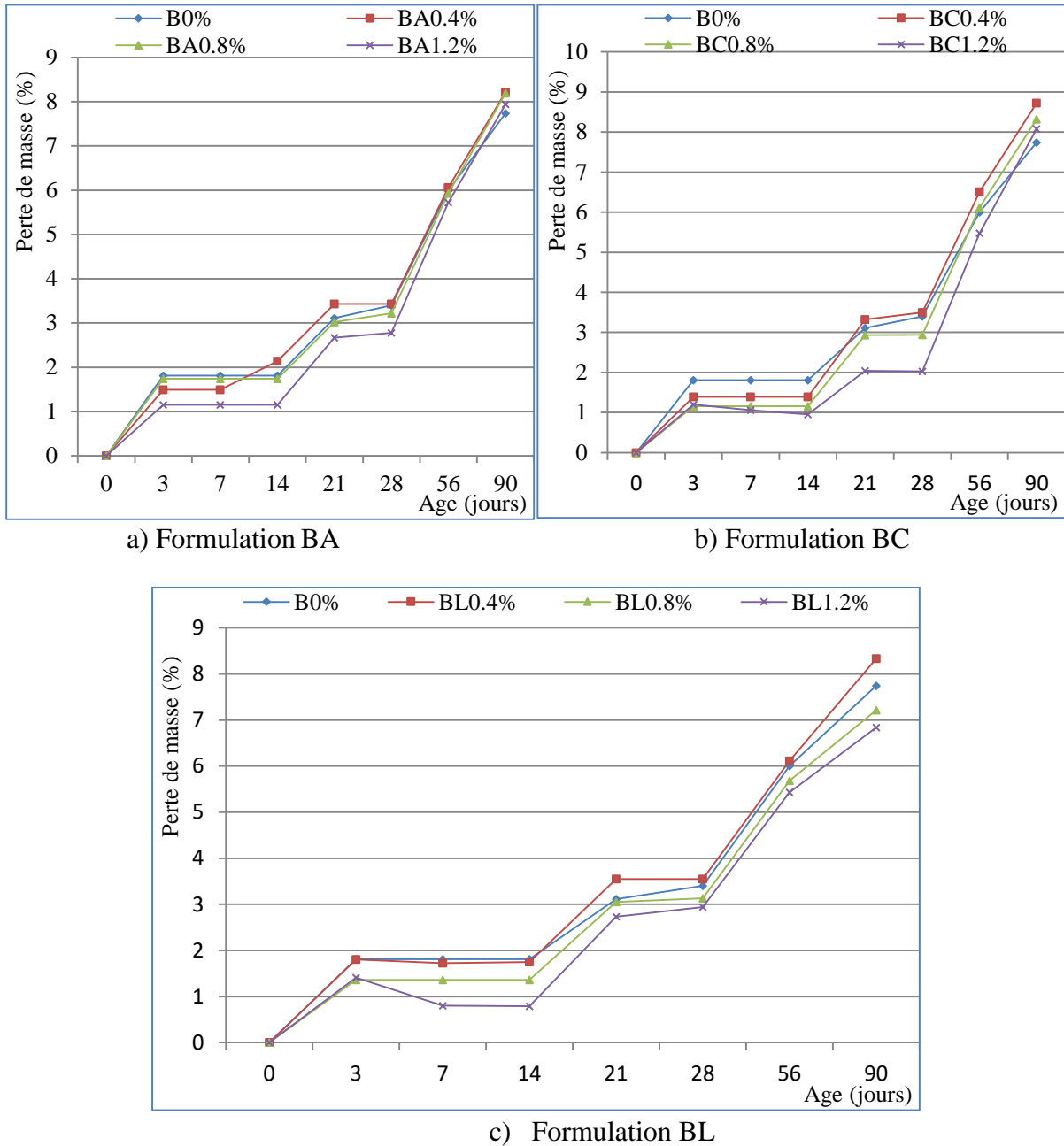


Figure V.8: Variation de la perte de masse pour les différents types des bétons en fonction de temps d'immersion dans 5% CH_3COOH

Concernant les fibres de cuivre, en particulier pour les taux de 0.8% et 1.2%, la perte de masse a généralement diminué dans les mélanges par rapport au béton de référence, avec une légère augmentation à 90 jours. Cela confirme le rôle des fibres dans le renforcement de la structure interne du béton, améliorant ainsi ses propriétés chimiques et physiques (Mahapatra et Barai, 2018) pour empêcher la pénétration de l'acide acétique dans le béton.

Dans le mélange BL, la perte de masse due à l'attaque de l'acide acétique diminue en fonction de l'augmentation du taux des fibres d'aluminium. Cela est clairement observé avec un taux de 1.2% et de manière moins remarquable avec un taux de 0.8% dans toutes les périodes d'âge. Cela peut être attribué au renforcement de la propriété de confinement de la matrice du béton

fibres rapporté par **Sabapathy et al., 2019**, ce qui pourrait améliorer la résistance du béton à l'attaque de l'acide acétique.

En général, à partir des résultats obtenus, nous pouvons conclure que l'effet des fibres d'aluminium était plus efficace que celui des fibres de cuivre et d'acier pour réduire la perte de masse dans le milieu CH_3COOH .

V.2.4.4. Attaque par l'hydroxyde de sodium (5%NaOH)

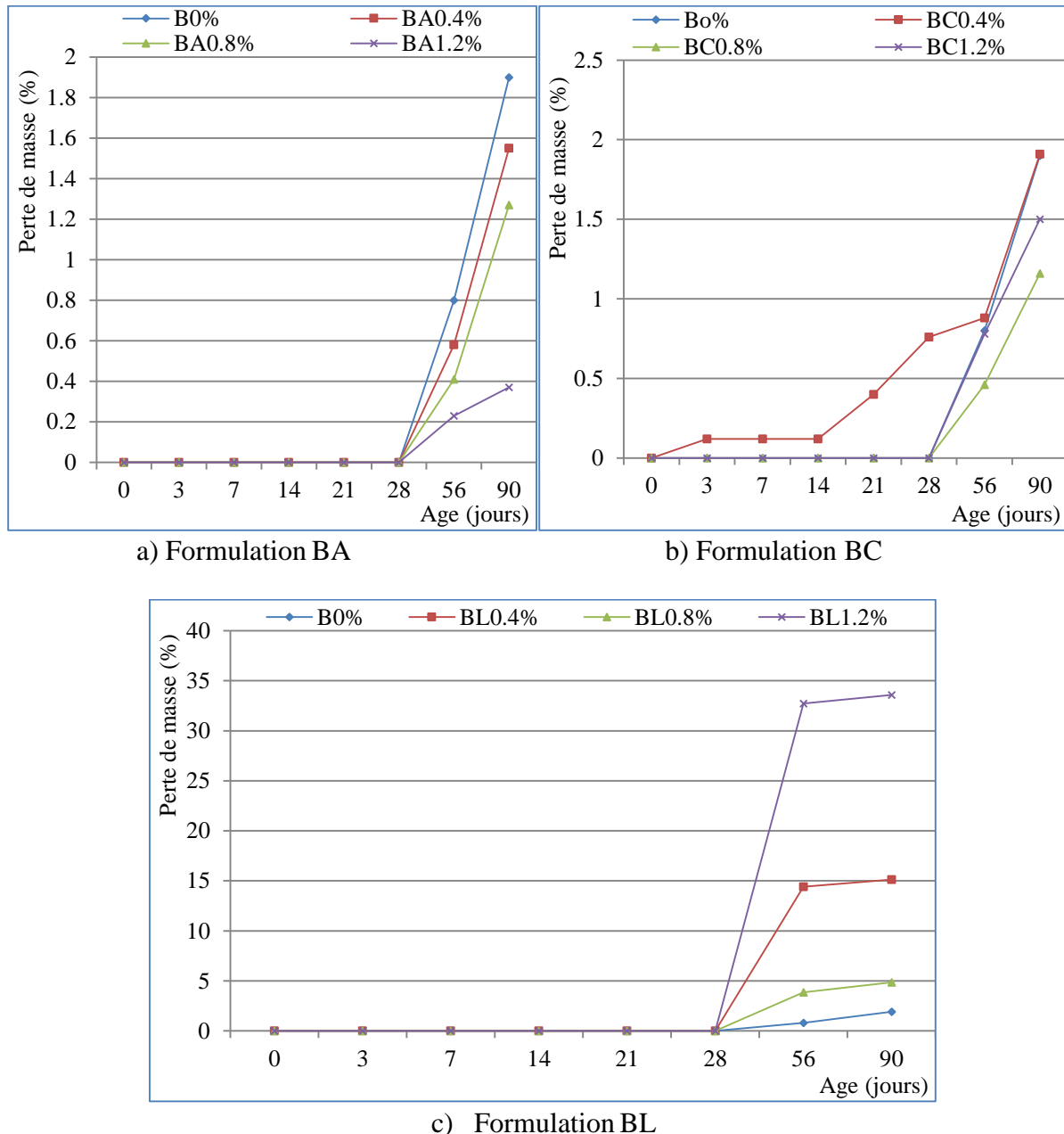


Figure V.9: Variation de la perte de masse pour les différents types des bétons en fonction de du temps d'immersion dans 5% NaOH

La figureV.9 montre les résultats de la perte de poids dans toutes les formulations étudiées dans un milieu basique d'hydroxyde de sodium (NaOH). Nous pouvons constater une perte de poids dans toutes les formulations, mais de manière différente et variée. La perte de poids

a été très significative dans le mélange d'aluminium, et plus faible dans les mélanges d'acier et de cuivre.

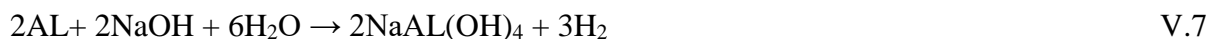
Les résultats indiquent que l'impact de l'attaque de l'hydroxyde de sodium sur le mélange BA est très faible. Les échantillons commencent à perdre du poids après 28 jours de traitement dans la solution chimique, et cette perte s'est accrue jusqu'à 56 jours, mais elle reste inférieure à celle du béton de référence B0, en particulier avec des teneurs en fibres d'acier de 0.8% et 1.2%, avec des pertes de poids de 0.37% et 1.27%. Ces valeurs sont très faibles. Cela est dû à la forte liaison de la structure interne du béton, ainsi qu'à l'absence de lixiviation de la chaux et à l'environnement alcalin, qui ne provoque pas de détérioration du béton, rendant ainsi le béton plus durable face à l'attaque de NaOH. De plus, plus la proportion de fibres d'acier est élevée, plus la résistance chimique est renforcée, empêchant ainsi la dégradation de la structure du béton (Chaudhary et al., 2001; Ji et al., 2022).

En ce qui concerne le mélange BC, le cuivre est considéré un métal résistant aux milieux basiques. Cependant, les résultats montrent un début rapide de perte de poids dès le troisième jour de traitement dans une solution d'hydroxyde de sodium NaOH, en comparaison avec le béton de référence B0 avec un taux de 0.4% de fibre de cuivre. Cette perte de poids atteint une valeur maximale à 90 jours jusqu'à de 1.91%. La forme, l'orientation et la distribution des fibres à l'intérieur du béton pourraient influencer l'homogénéité de la structure interne, entraînant une diminution de la durabilité et les propriétés du béton (Li 1992; Elrefaei et al., 2023; Norambuena-Contreras et al., 2018). Par contre, les taux de 0.8 et 1.2% ont renforcé la résistance du béton à l'attaque de l'hydroxyde de sodium NaOH et ont réduit la perte de masse. La valeur la plus faible a été enregistrée à 90 jours dans le mélange contenant 1.2% de fibres de cuivre, avec une perte de poids de 1.16%. Ces résultats sont cohérents avec les résultats des essais d'absorption par immersion et capillarité en raison de l'effet pouzzolanique des fibres de cuivre sur les propriétés physiques et chimiques du béton (Mahapatra et Barai, 2018).

L'introduction de fibres d'aluminium au béton entraîne une augmentation très significative de la perte en masse à 56 et 90 jours pour toutes les proportions, cette augmentation étant croissante avec la teneur en fibres. Les valeurs maximales de perte de masse sont atteintes dans le mélange BL à une proportion de 1.2% de fibres d'aluminium, et sont évaluées à 32.72% et 33.59% respectivement. Cette tendance peut être attribuée à la réaction potentielle entre l'aluminium et l'hydroxyde de calcium formé par le portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), qui produit du gaz d'hydrogène. Ce dernier gaz génère des vides à l'intérieur du béton, affaiblissant ainsi la durabilité du béton lorsqu'il est exposé à l'hydroxyde de sodium (NaOH) (Tang Van et al., 2019). Cette réaction peut être représentée par l'équation V.6.



D'autre part, l'aluminium peut réagir avec l'hydroxyde de sodium pour former d'autres composés, ce qui peut entraîner la formation de vides supplémentaires à l'intérieur de la structure du béton en raison du dégagement d'hydrogène, comme le montre la réaction donnée par l'équation V.7 (Belitskus 1970).



De manière générale, à partir des résultats obtenus de la perte de poids dans le milieu basique de l'hydroxyde de sodium NaOH, il semble que les fibres d'acier et de cuivre contribuent à améliorer la résistance chimique du béton par rapport aux fibres d'aluminium, qui ont un effet très négatif sur la résistance du béton à l'hydroxyde de sodium, entraînant ainsi une dégradation importante de la durabilité du béton en raison d'une perte de masse accrue.

V.3. Conclusion

D'après cette étude nous pouvons conclure:

- L'absorption d'eau par immersion a diminué pour toutes les proportions des bétons à base des fibres recyclées,
- La porosité accessible à l'eau a diminué dans les mélanges BA et BL, mais a augmenté dans le mélange BC avec l'augmentation de la teneur en fibres,
- Les fibres recyclées ont réduit l'absorption d'eau par capillarité du béton de sable, en particulier avec un taux 1.2% de fibres de cuivre,
- L'incorporation des fibres d'acier et de cuivre ont amélioré la durabilité et ont réduit légèrement la perte en masse du béton vis-à-vis l'attaque d'acide sulfurique H_2SO_4 , tandis que les fibres d'aluminium ont eu un effet négatif à toutes les proportions,
- On peut dire que les fibres de déchets d'acier, de cuivre et d'aluminium empêchent la pénétration de l'acide chlorhydrique HCL et réduisent la perte de masse du béton de sable à toutes les proportions,
- L'introduction de fibres d'aluminium a significativement réduit la perte de poids lors de l'exposition à l'acide acétique CH_3COOH , particulièrement avec un taux de 1.2%, tandis que des tendances similaires ont été observées pour les mélanges BA et BC,
- Les fibres d'acier et de cuivre ont amélioré la résistance chimique du béton vis-à-vis de l'hydroxyde de sodium NaOH, tandis que les fibres d'aluminium ont eu un impact négatif important sur la durabilité du béton, avec une perte de masse plus élevée.

Conclusions générales

Conclusions générales

Cette étude s'inscrit dans une démarche de valorisation des ressources locales et de réduction de l'empreinte environnementale des matériaux de construction. Elle a porté sur l'exploration du potentiel d'utilisation des déchets issus des activités de forge, transformés en fibres (acier, aluminium, cuivre), comme éléments de renforcement dans un béton de sable. L'objectif était non seulement de proposer une alternative durable et écologique aux fibres synthétiques ou industrielles coûteuses, mais également d'évaluer de manière approfondie l'influence de ces fibres recyclées sur les propriétés physico-mécaniques et de durabilité du béton.

A partir de cette étude des conclusions ont été tirées:

- Les fibres de déchets d'acier et de cuivre ont augmenté considérablement la densité du béton, ils ont convenables parfaitement pour les structures portantes et les ouvrages soumis à des chocs ou vibrations (chaussées industrielles, quais, zones de manutention),
- Les fibres d'acier ont amélioré l'ouvrabilité du béton de sable à des proportions de 0.4% et 0.8%, facilitant ainsi sa mise en place et son compactage,
- Les fibres d'acier ont amélioré la résistance en compression du béton à long terme, donc ce type de béton peut être utilisé dans les ouvrages soumis à des charges permanentes et à des sollicitations à long terme (dalles industrielles, ouvrages d'art, fondations massives), alors que les bétons à base des fibres de cuivre peut être employer dans des applications nécessitant une résistance rapide, par exemple pour des travaux de réparation ou de préfabrication où un décoffrage anticipé est souhaité,
- Les fibres d'aluminium ont généralement diminué la résistance en compression à tous les âges, donc il faut éviter l'utilisation de ces fibres dans les bétons structurels lorsque la résistance en compression est critique. Elles peuvent cependant être exploitées dans des bétons allégés ou décoratifs où l'objectif est de réduire la densité plutôt que d'optimiser la résistance,
- L'introduction de fibres de déchets d'acier et de cuivre a augmenté la résistance à la traction à tous les âges, cette propriété peut être exploitée dans plusieurs applications où la performance en traction et la tenue à la fissuration sont déterminantes.
- À un taux d'incorporation de 1.2%, les fibres ont contribué à améliorer la structure interne et l'homogénéité du béton. Cette amélioration s'est traduite par une augmentation de la résistance à la compression mesurée au scléromètre pour les bétons renforcés de fibres d'acier, ainsi que par une hausse de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques pour ceux contenant des fibres de cuivre ou d'aluminium.
- Le module d'élasticité dynamique du béton de sable a augmenté avec la croissance des proportions de fibres d'acier et d'aluminium jusqu'à 1.2%,
- L'absorption d'eau par immersion diminue pour toutes les teneurs en fibres recyclées incorporées au béton ce qui indique que les bétons sont plus étanches, résistants et durables,

- La diminution de la porosité accessible à l'eau observée dans les mélanges contenant des fibres d'acier indique une meilleure compacité et une résistance accrue à la pénétration de l'eau. Ce type de béton peut donc être recommandé pour des applications nécessitant une durabilité élevée et une faible perméabilité, telles que les ouvrages hydrauliques, les dalles ou structures exposées aux intempéries, aux environnements marins ou aux cycles gel-dégel,
- Les fibres recyclées ont réduit l'absorption d'eau par capillarité du béton de sable, en particulier avec un taux 1.2% de fibres de cuivre, sont recommandées pour les bétons à des ouvrages exposés à l'humidité. Cette réduction de l'absorption d'eau par capillarité améliore la durabilité et limite la pénétration de substances nocives, prolongeant ainsi la durée de vie de la structure,
- L'incorporation de fibres d'acier et de cuivre a renforcé la durabilité du béton et amélioré sa résistance face à l'attaque d'acide sulfurique (H_2SO_4), tandis que l'ajout de fibres d'aluminium, quelle qu'en soit la proportion, a exercé un effet défavorable,
- Les fibres issues de déchets d'acier, de cuivre et d'aluminium contribuent à limiter la pénétration de l'acide chlorhydrique (HCL) et renforcent la résistance du béton de sable,
- L'ajout de fibres d'aluminium a entraîné une réduction significative de la perte de masse sous l'action de l'acide acétique (CH_3COOH), effet particulièrement marqué pour une teneur de 1.2%. Des comportements similaires ont également été relevés pour les mélanges BA et BC,
- Les fibres d'acier et de cuivre ont renforcé la résistance chimique du béton face à l'hydroxyde de sodium (NaOH), tandis que l'incorporation de fibres d'aluminium a fortement compromis sa durabilité, entraînant une perte de masse plus importante.

Donc on peut dire que:

- Les fibres recyclées d'acier augmentent fortement la densité du béton et améliorent son ouvrabilité (mise en place et compactage facilités), ainsi que sa résistance en compression et en traction (réduction de la fissuration), sa compacité et sa résistance chimique face au H_2SO_4 , au HCL et au NaOH. Ces bétons sont adaptés aux ouvrages portants et soumis à des chocs ou vibrations, tels que les dalles industrielles, les ponts, les fondations massives, ainsi que les ouvrages hydrauliques, marins ou soumis au gel/dégel.
- Les fibres recyclées de cuivre augmentent la densité et la résistance en traction du béton, permettent une acquisition rapide de la résistance, améliorent l'homogénéité interne et les performances aux ultrasons, réduisent l'absorption d'eau par capillarité et renforcent la résistance chimique face au H_2SO_4 , au HCL et au NaOH. Ces bétons sont idéaux pour les travaux de réparation et la préfabrication (avec possibilité de décoffrage anticipé).
- Les fibres recyclées d'aluminium confèrent une faible résistance en compression, ce qui les rend inadaptées aux bétons structurels, mais elles améliorent le module d'élasticité et offrent une bonne résistance face à l'acide acétique (CH_3COOH).

D'après ce travail, on peut affirmer que le recyclage des déchets de forgerons dans la formulation du béton de sable a un effet bénéfique et encourage la recherche dans ce domaine.

****Recommandations & Perspectives**

Cette recherche a permis d'apporter des réponses à certaines interrogations et de mettre en évidence des pistes prometteuses à explorer, afin de mieux comprendre les différents aspects du comportement des bétons de sable incorporant des fibres recyclées, notamment:

- L'étude de retrait du béton de sable,
- L'étude de la durabilité des bétons de sable à base des fibres recyclées à long terme (plus de 360 jours),
- Etude des caractéristiques thermiques,
- Etude de la durabilité vis-à-vis de la corrosion,
- Etude de la résistance au gel/dégel,
- Etude de la microstructure.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdelouahed, A., Kechkar, C., Hebhouh, H., Merzoud, M., & Boukhatem, G.** (2023). Enhancing the performance and durability of eco-friendly mortar with Diss fibers (*Ampelodesmos mauritanicus*). *Revue des composites et des matériaux avancés*, 33(4), 219.
- Abi Farraj, F.** Substitution Totale du Sable Naturel par du Sable Concassé dans le Béton: Une Solution Pertinente pour le Liban, *Academic Journal of Civil Engineering*, 38(1) 2020, 293-300.
- ACI 546R-14.** (2014). Recommande des mélanges fins pour les réparations structurelles ciblées, notamment les bétons de sable. *Guide to Concrete Repair*. American Concrete Institute.
- Ahmad, J., Manan, A., Ali, A., Khan, M. W., Asim, M., & Zaid, O.** (2020). A study on mechanical and durability aspects of concrete modified with steel fibers (SFs). *Civ. Eng. Archit*, 8(5), 814-823.
- Akhund, M. A., Sannd, A., Memon, U., & Oad, S. J.** (2017). Utilization of soft drink tins as fiber reinforcement in concrete. *age*, 1, 1-38.
- Ammari, M. S., Bederina, M., Belhadj, B., & Merrah, A.** (2020). Effect of steel fibers on the durability properties of sand concrete with barley straws. *Construction and Building Materials*, 264, 120689. Ammari, M.S., Belhadj, B., Bederina, M., Ferhat, A., Quéneudec, M.
- Ammari, M. S., Belhadj, B., Bederina, M., Ferhat, A., & Quéneudec, M.** (2020). Contribution of hybrid fibers on the improvement of sand concrete properties: Barley straws treated with hot water and steel fibers. *Construction and building materials*, 233, 117374.
- Standard, A.** (2014). *Methods of testing concrete. Method 9: Compressive strength tests: Concrete, mortar and grout specimens*. Sydney, NSW, Australia: Standards Australia Limited.
- Bederina, M., Laidoudi, B., Goullieux, A., Khenfer, M. M., Bali, A., & Quéneudec, M.** (2009). Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1311-1315.
- Bederina, M., Marmoret, L., Mezreb, K., Khenfer, M. M., Bali, A., & Quéneudec, M.** (2007). Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modelling. *Construction and Building Materials*, 21(3), 662-668.
- Behbahani, H., Nematollahi, B., & Farasatpour, M.** (2011, December). Steel fiber reinforced concrete: a review. In *Proceedings of the International Conference on Structural Engineering Construction and Management (ICSECM2011)* (pp. 1-12).
- Belhadj, B., Bederina, M., Montrelay, N., Houessou, J., & Quéneudec, M.** (2014). Effect of substitution of wood shavings by barley straws on the physico-mechanical properties of lightweight sand concrete. *Construction and Building Materials*, 66, 247-258.
- Benaissa, A., Kamen, A., Chouicha, K., & Malab, S.** (2008). Sand concrete 3D panel. *Materials and Structures*, 41(8), 1377-1391.

- Ben Kahla, N.** (2015). Contribution à l'étude du comportement mécanique du béton fibré à matrice cimentaire renforcé par des fibres d'acier et de polypropylène (Doctoral thesis). Université de Lorraine, France.
- Ben Othman, R., El Euch Khay, S., Loulizi, A., & Neji, J.** (2019). Laboratory evaluation of an ecological pavement construction material: sand concrete reinforced with polypropylene fibres. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(3), 287-299.
- Boulekbache, B.** (2009). Étude expérimentale et modélisation du comportement du béton fibré à l'état frais et durci, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France.
- Bourgeois, M.** (2011). Fibres agrosourcées. In *Techniques de l'ingénieur*.
- Business France.** (2017). Algérie – 360 000 tonnes de déchets ferreux récupérés annuellement par l'ENR. France. Retrieved from <https://www.businessfrance.fr/algérie-360-000-tonnes-de-dechets-ferreux-recuperes-annuellement-par-l-enr>
- Chaudhary, S. K., Kurmaiah, N., & Ghoshal, B. T.** (2001). Performance of concrete exposed to corrosive environment. National Seminar on Corrosion and Its Prevention, 13–14. Retrieved September 8, 2023, from <http://eprints.nmlindia.org/4174>.
- Chauvin, J. J.** (1991). Sand concrete in the Soviet Union. *Newsletter of the Laboratory for Bridges and Roadways*. France, 174.
- Christine, D. A., Séraphin, D. A., Olivier, B. M., & Edjikémé, E.** (2018). Effet de l'addition de fibres de coco traitées à la potasse sur les propriétés mécaniques des matériaux de construction à base d'argile–ciment. *Eur Sci J ESJ*, 14(36), 104-116.
- Choi, W. C., Jung, K. Y., Jang, S. J., & Yun, H. D.** (2019). The influence of steel fiber tensile strengths and aspect ratios on the fracture properties of high-strength concrete. *Materials*, 12(13), 2105.
- Emsley, J.** (2001). Manganese. *Nature's building blocks: An AZ Guide to the Elements*. Oxford University Press, Oxford, UK, 249-253.
- Elrefaei, A. E., Alsaadawi, M. M., & Wagdy, W.** (2023). Characteristics of high-strength concrete reinforced with steel fibers recovered from waste tires. *Key Engineering Materials*, 945, 145-156.
- Fauteux, E., & Fortin, S.** (2002). Sand concrete applied to road pavements and infrastructures. *CERIU*, 9(5). Montreal, Canada.
- Feraille, A., & Baroth, J.** (2004). Le béton de sable: Étude expérimentale et modélisation. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (253). Étude sur les performances mécaniques et le comportement en traction de ces éléments préfabriqués.
- Fibres. Sika Belgium.** <https://bel.sika.com/fr/produits/beton/fibres.html>
- Gopu, G. N., & Sofi, A.** (2021). Electrical waste fibers impact on mechanical and durability properties of concrete. *Civ. Eng. Archit*, 9(6), 1854-1868.

Gharibi, W. (2015). Influence des fibres végétales sur le comportement des BAP sous environnement agressif (Mémoire de Magister). Université Frères Mentouri, Constantine, Algérie.

Ghomari, F. (n.d.). **Métaux ferreux et non ferreux. Science des matériaux de construction.** Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, Algérie. Retrieved from https://ft.univ-tlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/partie2/metaux_ferreux.pdf

Gulmez, N. (2020). Roles of aluminium shavings and calcite on engineering properties of cement-based composites. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124104.

DJ, H. (1978). Fibre cements and fibre concretes..

Huang, G., & Xie, X. (2011). Experimental study on the effect of nano-SiO₂ to durability in hydraulic concrete. *Yellow River*, 33, 138-140.

Hu, H., Papastergiou, P., Angelakopoulos, H., Guadagnini, M., & Pilakoutas, K. (2018). Mechanical properties of SFRC using blended manufactured and recycled tyre steel fibres. *Construction and Building Materials*, 163, 376-389.

Huber, B., Hilbig, H., Drewes, J. E., & Müller, E. (2017). Evaluation of concrete corrosion after short-and long-term exposure to chemically and microbially generated sulfuric acid. *Cement and Concrete Research*, 94, 36-48.

Ikraiam, F. A., Ali, J. M., Abd El-Latif, A., & Abd ELazziz, A. (2009). Effect of steel fiber addition on mechanical properties and gamma-ray attenuation for ordinary concrete used in El-Gabal El-Akhdar area in Libya for radiation shielding purposes.

Ji, Y., Xu, W., Sun, Y., Ma, Y., He, Q., & Xing, Z. (2022). Grey correlation analysis of the durability of steel fiber-reinforced concrete under environmental action. *Materials*, 15(14), 4748.

Kadri, A. (2013). Étude du comportement mécanique et thermique des bétons légers fibrés à matrice cimentaire (Doctoral thesis). Université de Toulouse, France.

Kayali, O., Haque, M. N., & Zhu, B. (2003). Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Cement and concrete composites*, 25(2), 207-213.

Khelifa, M. R. (2009). Effect of external sulphate attack on the durability of self-compacting concrete (Doctoral dissertation, PhD thesis).

Khelifa, M. R. (2018). Formulation et caractérisation d'éco-bétons renforcés aux fibres d'alfa pour des bâtiments verts et durables (Doctoral dissertation).

Kim, B., Boyd, A. J., Kim, H. S., & Lee, S. H. (2015). Steel and synthetic types of fibre reinforced concrete exposed to chemical erosion. *Construction and Building Materials*, 93, 720-728.

- Kishore, K., & Gupta, N.** (2019). Experimental analysis on comparison of compressive strength prepared with steel tin cans and steel fibre. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 7(4), 169–172. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.4030>.
- Kriker, A.** (2005). Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec (Doctoral dissertation, Alger, Ecole Nationale Polytechnique).
- Li, V. C.** (1992). A simplified micromechanical model of compressive strength of fiber-reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 14(2), 131-141.
- Mahapatra, C. K., & Barai, S. V.** (2019). Sustainable self compacting hybrid fiber reinforced concrete using waste materials. *Structural Concrete*, 20(2), 756-765.
- Mallikharjuna, R. K., & Srinivasa, R. P.** (2017). Comparative study of normal concrete with partial addition of copper wire as fibre for the grade of M40. *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, 4(6), 258–265.
- Mandel, J.** (1978). *Mechanical properties of materials*. Eyrolles Editions, France.
- Maza, M.** (2016). Analyse des propriétés physiques et mécaniques du mortier à base de sable mixte (sable de dune et sable concassé) (Doctoral thesis). Université de M'sila, Algérie.
- Meddah, M. S., & Bencheikh, M.** (2009). Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials. *Construction and building materials*, 23(10), 3196-3205.
- Mediyanto, A., Santosa, B., & Purwanto, E.** (2019, February). Recovery compressive strength aluminum fiber lightweight concrete (with part of a roof tiles as coarse aggregate) after burning with a variation of water curing time. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 235, No. 1, p. 012053). IOP Publishing.
- Melais, S., Melais, F. Z., & Achoura, D.** (2015). Influence of fiber type and volume contents on the physical and mechanical behaviour of sandcrete with blast furnace slag fillers. *Synthese Revue des Sciences et de la Technologie*, 30, 91–102. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1277372>.
- Mello, E., Ribellato, C., & Mohamedelhassan, E.** (2014). Improving concrete properties with fibers addition. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 8(3), 249-254.
- Menadi, S., Benazzouk, A., Douzane, O., Merzoud, M., Habita, M. F., & Langlet, T.** (2013). Etude de la faisabilité d'un composite à matrice cimentaire renforcée de fibres de jute. *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 27, 40-49.
- Merzoud, M.** (2007). Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de diss dans la fabrication de la maçonnerie (Doctoral thesis). Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.

- Shubber, A. N., Abbas, F. S., Al-Taweel, H. M., Ibrahim, S. K., Al-Balhawi, A., Al-Badran, Y. M., ... & Al-Ridha, A. S.** (2023). The Evaluation Effect of Copper Fibre Diameter on Enhancing Compressive Strength of Pure Gypsum. *Journal of Ecological Engineering*, 24(11).
- Naser, M. H., Naser, F. H., & Dhahir, M. K.** (2020). Tensile behavior of fiber reinforced cement mortar using wastes of electrical connections wires and galvanized binding wires. *Construction and Building Materials*, 264, 120244.
- Nataraja, M. C., Dhang, N., & Gupta, A. P.** (1999). Stress–strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. *Cement and concrete composites*, 21(5-6), 383-390.
- Ndruru, H., Simanjuntak, R. M., & Tampubolon, S. P.** (2021, October). Utilization of copper fiber waste to increase compressive strength and split tensile strength of rigid pavement. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 878, No. 1, p. 012052). IOP Publishing.
- Neville, A. M.** (2011). *Properties of concrete fifth edition. Green technology an A-to-Z guide.* SAGE Publication, California.
- Neville, A. M.** (2012). *Properties of concrete (5th ed.).* Pearson.
- Norambuena-Contreras, J., Cartes, A., Gonzalez-Torre, I., Chavez, M., & Kanellopoulos, A.** (2018). Effect of metallic waste addition on the physical and mechanical properties of cement-based mortars. *Applied sciences*, 8(6), 929.
- Norambuena-Contreras, J., Quilodran, J., Gonzalez-Torre, I., Chavez, M., & Borinaga-Treviño, R.** (2018). Electrical and thermal characterisation of cement-based mortars containing recycled metallic waste. *Journal of Cleaner Production*, 190, 737-751.
- Page, J., Boutouil, M., Khadraoui, F., & Moussa, G.** (2015, November). Etude des propriétés mécaniques d'un béton renforcé par des fibres de lin. In *Conférence Internationale Francophone NoMaD, Mines Douai, France* (pp. 1-10).
- Page, J.** (2017). *Formulation et caractérisation d'un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée (Doctoral dissertation, Normandie Université).*
- Perumal, P., Paul, T., Luukkonen, T., Röning, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M.** (2020, September). Performance of fibre-reinforced slag-based alkali activated mortar in acidic environment. In *Current Topics and Trends on Durability of Building Materials and Components: Proceedings of the XV edition of the International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020).* Barcelona, Spain 20-23 October 2020. International Center for Numerical Methods in Engineering.
- Rajaraman, J.** (2017). Study on Structural Behaviour of Aluminium Fiber in Concrete. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(11), 9182-9183.
- Rihla, C., Hebhouh, H., Djebien, R., & Abdelouahed, A.** (2019). Valorization of waste in sand concrete based on plant fibres.

- Merli, R., Preziosi, M., Acampora, A., Lucchetti, M. C., & Petrucci, E.** (2020). Recycled fibers in reinforced concrete: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119207.
- Tolêdo Filho, R. D., Scrivener, K., England, G. L., & Ghavami, K.** (2000). Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and concrete composites*, 22(2), 127-143.
- Sabapathy, Y. K., Sabarish, S., Nithish, C. N. A., Ramasamy, S. M., & Krishna, G.** (2021). Experimental study on strength properties of aluminium fibre reinforced concrete. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 33(1), 23-29.
- Saberi, H., Saberi, V., Noorani, S. M., & Sadeghi, A.** (2021). Improvement of Mechanical Parameters of Self-Compacting Concrete Using Copper and Plastic Fibers. *New Approaches in Civil Engineering*, 4(4), 26-43.
- Sablocrete.** (1994). *Sand concretes: Characteristics and practical applications*. Presses of the National School of Bridges and Roads, France.
- Sarabi, S., Bakhshi, H., Sarkardeh, H., & Nikoo, H. S.** (2017). Thermal stress control using waste steel fibers in massive concretes. *The European Physical Journal Plus*, 132(11), 491.
- Setra-LCPC.** (2007). *Bétons de granulats recyclés – Guide de recommandations*.
- Sobuz, M. H. R., Saha, A., Anamika, J. F., Houda, M., Azab, M., Akid, A. S. M., & Rana, M. J.** (2022). Development of self-compacting concrete incorporating rice husk ash with waste galvanized copper wire fiber. *Buildings*, 12(7), 1024.
- Surappa, M. K.** (2003). Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. *Sadhana*, 28(1), 319-334.
- 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. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 97, p. 02005). EDP Sciences.
- Rashid, M. U.** (2020). Experimental investigation on durability characteristics of steel and polypropylene fiber reinforced concrete exposed to natural weathering action. *Construction and Building Materials*, 250, 118910.